

DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.01.020

· 诊断与治疗/论著 ·

# 质子束治疗中 Bragg 峰分布特性的 SRIM 模拟研究

田丽霞<sup>1</sup>, 房冰冰<sup>2</sup>, 朱光昊<sup>1</sup>, 杜震<sup>1</sup>

1. 东华理工大学核科学与工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 成都理工大学工程技术学院

**摘要:** 目的 在质子治疗中, 对 SRIM 程序在模拟质子 Bragg 峰分布特性方面进行探讨。方法 基于 SRIM 程序, 对 50~250 MeV 的不同能量的质子束入射到水、聚苯乙烯, 有机玻璃以及铝、铁等不同介质中的输运过程进行了模拟分析, 对不同的质子入射能量、介质材料及厚度与其 Bragg 峰深度的关系进行了研究, 并与专业的蒙特卡罗程序 Fluka2011 以及 MCNPX 模拟结果进行对比。结果 随着入射质子能量的增加, 其 Bragg 峰深度逐步增大并伴随展宽增大; 相同质子入射能量下不同介质的 Bragg 峰深度与水 Bragg 峰深度之比随质子的入射能量变化不大, 近似为一常数, 所得结果与成熟的 Fluka 及 MCNPX 程序模拟值是一致的。结论 SRIM 程序在模拟质子束输运方面其精度是可行的, 对于初学者可以采用简单易学的 SRIM 来替代繁琐的 Fluka 及 MCNPX 程序。

**关键词:** SRIM; Bragg 峰; 质子

中图分类号: R815.2 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2021)01-0091-03

## Simulation on the bragg peak distribution based on SRIM in proton therapy

TIAN Lixia<sup>1</sup>, FANG Bingbing<sup>2</sup>, ZHU Guanghao<sup>1</sup>, DU Zhen<sup>1</sup>

1. School of Nuclear Science and Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013 China;

2. The Engineering &amp; Technical College of Chengdu University of Technology

**Abstract: Objective** To discuss the distribution characteristics of the Bragg peak in proton therapy using the SRIM code.

**Methods** Based on the SRIM code, the transport processes of a high-energy proton beam injecting into different materials (H<sub>2</sub>O, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O, C<sub>8</sub>H<sub>8</sub>, Al and Fe) with incident energies of 50 MeV~250 MeV have been simulated and analyzed. And the relationship between the incident energies, different materials and thickness, and the depth of the Bragg peak was also discussed when the protons injected into different materials and compared with the simulation results of professional Monte Carlo code, such as Fluka 2011 and MCNPX. **Results** The simulation results indicate that the depths of the Bragg peak increase gradually and the peaks broaden with the increase of incident proton energies for different materials; The ratio of the depth of the Bragg peak in different materials to that in water under the same incident energy changes little and is approximately a constant which doesn't depend on the proton incident energy. A good consistency was found between the results and those obtained using Fluka and MCNPX programs. **Conclusion** The simulation accuracy of the SRIM on the proton beam transport is acceptable, and is suitable for the beginning learners.

**Keywords:** SRIM; Bragg Peak; Proton

质子治疗是放射治疗的一种新兴技术, 近年来得到快速发展<sup>[1-3]</sup>。与其他常规的放射治疗相比, 质子束的优越性主要是利用质子束的 Bragg 峰, 可根据肿瘤在体内的深度, 使质子束精确地定位在肿瘤位置处, 将高剂量准确地释放在靶体积中, 从而显著地减少对周围正常组织和器官的辐射损伤。质子精确治疗受到 Bragg 峰位置的不确定性的制约, 因此确定质子的深度分布剂量至关重要。

早在 1946 年, 美国的 Wilson 博士<sup>[4]</sup>就描述了人

体内质子的深度剂量分布图。随着电子计算机技术的迅速发展, 使得 Monte-Carlo 方法在物理学以及医学研究中得到了广泛的应用<sup>[5-12]</sup>。目前医学研究中可以借助 MCNPX, Fluka, Geant4 等 Monte Carlo 程序对粒子在材料中的输运过程进行详细的模拟计算和验证。但上述 Monte Carlo 程序较为复杂, 很多过程都需要自己编写相应的子程序才能实现, 对于初学者来说较为困难。因此, 本文采用基于 Monte Carlo 方法思想的 SRIM 程序, 该程序能够对能量在 10 eV~

基金项目: 国家自然科学基金 (12075056), 核技术应用教育部工程研究中心开放基金资助项目 (HJSJYB2015-12)

作者简介: 田丽霞 (1981—), 女, 河北石家庄人, 讲师, 主要从事辐射测量与辐射防护方面的研究, E-mail: tianlixia@ecut.cn

2 GeV/amu 范围内的入射离子在靶物质中的输运情况进行模拟分析, 简单易操作, 常常作为模拟离子与物质相互作用的基本模拟软件<sup>[9-12]</sup>。本文采用 SRIM-2013 对 50~250 MeV 的质子束入射到不同介质中的能量沉积特性进行了模拟分析, 并对入射质子能量、介质材料以及厚度等因素对质子束 Bragg 峰位置分布的影响进行了研究, 并与基于 Fluka<sup>[7]</sup> 及 MCNPX<sup>[5]</sup> 程序的模拟结果进行对比分析, 对软件的模拟精度进行验证。

## 1 材料与方法

基于 SRIM 程序的 TRIM 计算模块, 模拟了不同能量质子束入射到不同介质中的能量沉积分布情况。介质材料选择上涵盖了常见的组织等效材料, 如水 (H<sub>2</sub>O), 聚苯乙烯 (PS), 有机玻璃 (PMMA), 以及用于质子临床治疗设备中的铝 (Al), 铁 (Fe) 等材料。质子垂直入射到介质表面, 介质厚度根据随着入射质子能量的增加而增加, 确保其 Bragg 峰落在介质内部。

在临床质子治疗时, 入射质子的能量通常在 50~250 MeV<sup>[8]</sup>, 因此, 本次模拟工作中入射质子能量为 50~250 MeV, 能量间隔为 10 MeV, 设置入射质子数总数为 10<sup>5</sup> 个, 跟踪记录每个质子在介质中的能量沉积分布情况, 对所有质子在介质中产生的 Bragg 峰深度值取平均值, 以得到不同能量的质子在介质中的 Bragg 峰深度。

## 2 结果

采用 SRIM 程序对 50~250 MeV 的质子入射到靶材料 (H<sub>2</sub>O、PS、PMMA、Al、Fe) 中的输运过程进行模拟分析, 计算得到了质子在上述介质中的能量沉积分布, 图 1 为 60~160 MeV 的质子束入射到水中的能量沉积分布图。由于质子在人体中沉积能量的方式主要为电离碰撞损失, 因此重带电粒子在材料中的质量碰撞阻止本领 (S/ρ)<sub>col</sub> 可以表示为:

$$\left(\frac{S}{\rho}\right)_{col} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl}\right)_{col} = 4\pi r_e^2 N_e \frac{z^2 \mu_e}{\beta^2} \left[ \ln \frac{2\mu_e \beta^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right] \quad (1)$$

其中,  $r_e$  为电子的经典半径,  $\beta$  是入射粒子速度与光速之比,  $N_e$  则代表每克靶物质中的电子数,  $\mu_e$  为电子的静止质量,  $I$  是靶物质原子的平均激发能,  $z$  为带电粒子的电荷数, 由公式 1) 可知, 电离损失近似与质子的能量成反比, 与速度平方成反比, 这是因为带电粒子速度越慢, 与轨道电子相互作用的时间越长, 轨道电子获得的能量也就越大。由图 1 可见, 质子在

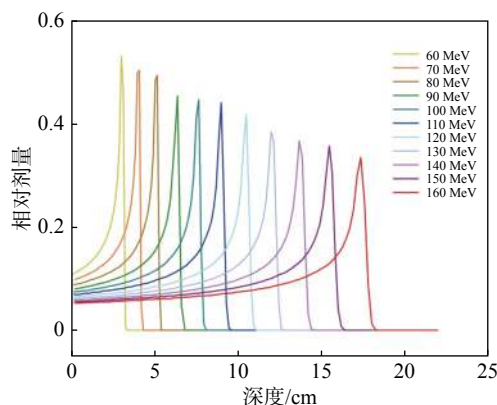


图 1 水中质子的相对剂量与入射深度的关系

Figure 1 The relationship between the relative dose and the incident depth of protons in water.

射程末端沉积大部分能量并形成尖锐的 Bragg 峰, 超过 Bragg 峰之后能量急剧下降到零, 并且随着入射质子能量的增加, Bragg 峰深度逐步增大并伴随展宽增大, 这与文献 [5] 中应用 MCNPX 程序模拟结果一致。

基于 SRIM 程序模拟得出了不同质子入射能量下, 不同介质中质子束的 Bragg 峰的深度值, 结果见图 2 所示。我们将所得结果与谢朝等<sup>[7]</sup> 应用 Fluka 程序计算得到的质子束的 Bragg 峰深度值进行了对比, 结果表明, 对于 50~250 MeV 的质子入射到 H<sub>2</sub>O、PS、PMMA、Al 以及 Fe 靶时, 二者所模拟得到的 Bragg 峰值位最大偏差仅为 2.5%, 由此可见, SRIM 程序在模拟质子在物质中的输运方面其精度是可靠的。

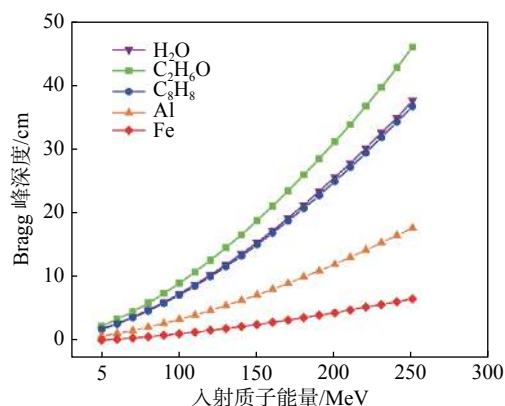


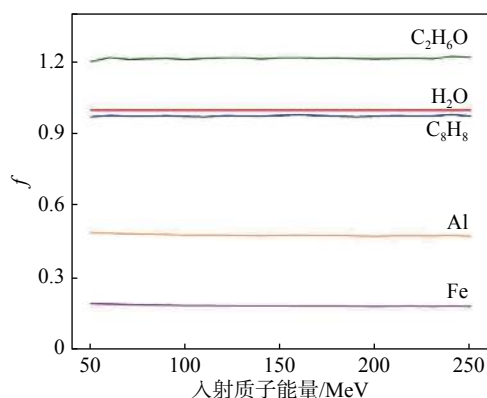
图 2 用 SRIM 程序得到的质子初始能量与 Bragg 峰位置图

Figure 2 The relationship between the Bragg peaks and incident proton energies using the SRIM

基于公式 2), 计算得到相同能量下不同介质中质子的 Bragg 峰深度  $D_{介质}$  与水中的 Bragg 峰深度  $D_{水}$  之比, 其结果见图 3 所示。

$$f = \frac{D_{介质}}{D_{水}} \quad (2)$$

从图中可以看出, 在不同介质中 Bragg 峰深度比  $f$  值随质子的初始能量变化不大, 近似为常数, 这与文

图3 不同介质的 $f$ 值Figure 3 The  $f$  values for different materials

献[7]中应用 Fluka 模拟结果也是一致的。当 $f$ 值取平均值,结果如表1所示,表中还列出了文献[7]中应用 Fluka 程序模拟计算的结果。由表1可以看出,基于 SRIM 模拟得到的不同介质的 $f$ 值一般略高于 Fluka 的计算结果,最大偏差为 Fe 介质,约为 1.08%。因此,我们只需要算出各种质子能量下水中 Bragg 峰的位置,并作为数据库存放,若知道介质的 $f$ 值,就可以根据水的 Bragg 峰位置方便地算出介质中的 Bragg 峰位置。

表1 基于 SRIM 和 Fluka 程序模拟得到的 $f$ 值Table 1 The  $f$  values based on the SRIM and Fluka simulations

介质	SRIM	Fluka <sup>[7]</sup>	偏差/%
H <sub>2</sub> O	1	1	0
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	1.2189	1.2154	0.29
C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	0.9734	0.9756	0.22
Al	0.4825	0.4787	0.79
Fe	0.1871	0.1851	1.08

### 3 讨论

本文基于简单易学的 SRIM 程序,对 50~250 MeV 质子入射到不同介质中的能量沉积分布进行了模拟分析。结果表明,随着入射质子能量的增加,其形成的 Bragg 峰深度逐步增大并伴随展宽增大。对于不同介质中,其 Bragg 峰深度比 $f$ 值随质子的初始能量变化不大,近似为常数。基于 SRIM 的模拟结果与应用 Fluka 及 MCNPX 程序所得结论一致,模拟得到的 Bragg 峰位与 Fluka 模拟结果最大偏差仅为 2.5%,表明 SRIM 软件在模拟质子输运方面其精度是可行的,对于初学者而言,可以采用简单易学的 SRIM 来替代繁琐的 Fluka 及 MCNPX 程序。

**利益冲突声明** 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展,排名无争议。文章不涉及任何利益冲突

**作者贡献声明** 田丽霞,负责软件建模及模拟;房冰冰,负责软件模拟及分析;朱光昊,负责数据处理;杜震,负责软件作图

### 参考文献

- [1] 张新,孙启玉,谢宜学,等.质子放疗[J].中国医学物理学杂志,2005,22(5):621-624. DOI: 10.3969/j.issn.1005-202X.2005.05.001.
- [2] Zhang X, Sun QY, Xie YX, et al. Proton therapy[J]. Chin J Med Phys, 2005, 22(5): 621-624. DOI: 10.3969/j.issn.1005-202X.2005.05.001.
- [3] 宋帅,罗辉,葛红.质子束放疗在肿瘤中的研究进展[J].国际放射医学核医学杂志,2020,44(4):253-261. DOI: 10.3760/cma.j.cn121381-201901009-00012.
- [4] Song S, Luo H, Ge H. Overview of proton beam therapy in cancer treatment[J]. Int J Radiat Med Nucl Med, 2020, 44(4): 253-261. DOI: 10.3760/cma.j.cn121381-201901009-00012.
- [5] 吉喆,姜玉良.质子放疗的临床应用研究进展[J].西部医学,2016,28(4):580-584,封3. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3511.2016.04.036.
- [6] Ji Z, Jiang YL. Developments of clinical application of proton beam radiotherapy[J]. Med J West China, 2016, 28(4): 580-584, 封3. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3511.2016.04.036.
- [7] Wilson RR. Radiological use of fast protons[J]. Radiology, 1946, 47(5): 487-491. DOI: 10.1148/47.5.487.
- [8] 李聪,王志朋,马玉刚,等. MC法模拟质子治疗中靶区定位[J].核电子学与探测技术,2016,36(12):1240-1244. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.12.013.
- [9] Li C, Wang ZP, Ma YG, et al. Target location in proton therapy: a Monte Carlo study[J]. Nucl Electron Detect Technol, 2016, 36(12): 1240-1244. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.12.013.
- [10] 邹剑明,许志强,耿继武,等.基于蒙特卡罗方法的质子治疗室屏蔽防护探讨[J].中国辐射卫生,2019,28(4):443-446. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714x.2019.04.026.
- [11] Zou JM, Xu ZQ, Geng JW, et al. Radiation shielding design of proton therapy treatment room based on the Monte Carlo method[J]. Chin J Radiol Heal, 2019, 28(4): 443-446. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714x.2019.04.026.
- [12] 谢朝,邹炼,侯氢,等.质子束治疗中非均匀组织的等效水厚度修正研究[J].物理学报,2013,62(6):475-479. DOI: 10.7498/aps.62.068701.
- [13] Xie C, Zou L, Hou Q, et al. Study of inhomogeneous tissue equivalent water thickness correction method in proton therapy[J]. Acta Phys Sin, 2013, 62(6): 475-479. DOI: 10.7498/aps.62.068701.

(下转第 122 页)

能的可持续发展。但是我国的公众普遍缺乏对核辐射的了解,对核事故的认知也停留在“巨大灾难”、是如原子弹爆炸一样的情景。《中国核能发展报告(2020)》提到,“十四五”期间核电建设有望按照每年6~8台持续稳步推进。为了让公众对核能、核事故有正确的理性认知,亟需开展有关核能、核事故的公众科普,以提高公众对核能的接受性。

**利益冲突声明** 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展,排名无争议。文章不涉及任何利益冲突

**作者贡献声明** 雷翠萍负责研究设计、研究开展、论文撰写及修改;袁龙负责论文设计、论文修改;孙全富负责研究指导、设计、论文撰写及修改

## 参考文献

- [1] International Atomic Energy Agency. IAEA reactor status reports[EB/OL]. [2020-12-21]. <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx> (2020-12-21/2020-12-21), 2020.
- [2] World Nuclear Association. Nuclear power in the world today[EB/OL]. [2020-12-01]. <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx> (2020-11/2020-12-01), 2020.
- [3] 邹正宇, 苏鲁明. 三哩岛事故和切尔诺贝利事故: 核电史上两起严重事故详情[M]. 北京: 原子能出版社, 2008.
- [4] Zou ZY, Su LM. Three Mile Island and Chernobyl nuclear accidents: details of two serious accidents in the history of nuclear power[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2008.
- [5] 斯维特拉娜·阿列克谢耶维奇. 切尔诺贝利的祭祷[M]. 北京: 中信出版社, 2018.
- [6] Svetlana Alexievich. Voices from Chernobyl[M]. Beijing: CITIC Press Group, 2018.
- [7] 格里戈里·梅德韦杰夫. 亲历切尔诺贝利[M]. 北京: 民主与建设出版社, 2019.
- [8] Grigori Medvedev. The truth about Chernobyl[M]. Beijing: Democracy and Construction Publishing House, 2019.
- [9] 艾玛纽埃尔·勒巴热. 切尔诺贝利之春[M]. 北京: 后浪、北京联合出版公司, 2017.
- [10] Emmanuel Lepage. Un printemps à Tchernobyl. Beijing: Houlang publishing House[M]. Beijing United Publishing House, 2017.
- [11] 门田隆将. 福岛核事故真相[M]. 上海: 上海人民出版社, 2015.
- [12] Mentian LJ. The truth of Fukushima accident[M]. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 2015.
- [13] 船桥洋一. 危机倒计时[M]. 北京: 海洋出版社, 2018.
- [14] Yoichi Funabashi. Countdown to crisis[M]. Beijing: China Ocean Pres, 2018.
- [15] 郭位. 核电·雾霾·你——从福岛核事故细说能源、环保与工业安全[M]. 北京: 北京大学出版社, 2014.
- [16] Guo W. Nuclear power · haze · you——from Fukushima nuclear accident to energy, environmental protection and industrial safety[M]. Beijing: Peking University Press, 2014.
- [17] 松本春野. 福岛来的孩子[M]. 北京: 北京联合出版公司, 2017.
- [18] Matsumoto Haruno. The Children from Fukushima[M]. Beijing: United Publishing House, 2017.

收稿日期: 2020-12-24

## (上接第 93 页)

- [8] 林辉, 谢聪, 张拥军, 等. Geant4不同物理模型对放疗质子束模拟的影响[J]. 原子能科学技术, 2015 (7): 1290-1297. DOI: 10.7538/yzk.2015.49.07.1290.
- [9] Lin H, Xie C, Zhang YJ, et al. Effect of different Geant4 physical models on simulation of radiotherapy proton beam[J]. At Energy Sci Technol, 2015 (7): 1290-1297. DOI: 10.7538/yzk.2015.49.07.1290.
- [10] 韩子杰, 鹿心鑫, 朱通华, 等. 241Am俘获反应中242Cmα粒子测量方法研究[J]. 核电子学与探测技术, 2014 (4): 448-450. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2014.04.007.
- [11] Han ZJ, Lu XX, Zhu TH, et al. Study of α Measurement of 242 Cm in 241 Am capture reactions[J]. Nucl Electron Detect Technol, 2014 (4): 448-450. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2014.04.007.
- [12] 王旭东, 程远, 孟惠民, 等. 氧化铈质子辐照效应的SRIM模拟研究[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2010, 33 (2): 151-154. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3644.2010.02.009.
- [13] Wang XD, Cheng Y, Meng HM, et al. A simulation study of the proton radiation effects in ZnO by SRIM[J]. J Wuhan Univ Sci Technol Nat Sci Ed, 2010, 33 (2): 151-154. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3644.2010.02.009.
- [14] 朱岳, 赵广义, 汪宏年. 质子对碲铈镉辐照损伤的SRIM模拟[J]. 吉林大学学报(理学版), 2018, 56 (4): 973-978. DOI: 10.13413/j.cnki.jdxblxb.2018.04.34.
- [15] Zhu Y, Zhao GY, Wang HN. SRIM simulation of radiation damage by proton in zinc telluride cadmium[J]. J Jilin Univ Sci Ed, 2018, 56 (4): 973-978. DOI: 10.13413/j.cnki.jdxblxb.2018.04.34.
- [16] 金潇, 严源, 韩春彩. 高能质子治疗系统辐射环境影响评价关键问题探讨[J]. 中国辐射卫生, 2020, 29 (1): 65-68. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2020.01.015.
- [17] Jin X, Yan Y, Han CC. Discussion on some key issues in radiation environmental impact assessment of high energy proton therapy system[J]. Chin J Radiol Heal, 2020, 29 (1): 65-68. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2020.01.015.

收稿日期: 2020-08-23