

质子束治疗中非均匀组织的等效水厚度修正研究

谢朝¹⁾ 邹炼¹⁾ 侯氢^{2)†} 郑霞³⁾

1) (四川省医学科学院, 四川省人民医院, 医学物理联合实验室, 肿瘤科放疗中心, 成都 610072)

2) (四川大学原子核科学技术研究所, 辐射物理及技术教育部重点实验室, 成都 610064)

3) (四川省医学科学院, 四川省人民医院急诊科, 成都 610072)

(2012年10月19日收到; 2012年11月12日收到修改稿)

非均匀组织等效水厚度修正是研究质子放射治疗的重要组成部分, 利用蒙特卡罗 Fluka2011.2 程序模拟了不同能量 (50—250 MeV) 的质子束入射到不同介质中的输运过程, 总结出了在不同介质中质子束初始能量与质子束 Bragg 峰深度关系, 并拟合出质子束在介质中的等效水厚度修正公式. 结果表明, 对不同能量的质子束入射到非均匀组织中, 通过拟合公式计算出 Bragg 峰深度值与 Fluka 模拟的质子束 Bragg 峰的位置相差在 1 mm 之内. 如果建立起介质和水的 Bragg 峰比与电子密度比关系的数据库, 该公式有可能用于临床上的质子放射治疗的剂量计算中.

关键词: 蒙特卡罗, 质子治疗, 等效水厚度, Bragg 峰

PACS: 87.55.kd, 87.10.Rt

DOI: 10.7498/aps.62.068701

1 引言

肿瘤放射治疗是肿瘤治疗的主要手段之一. 早在 1946 年, 美国哈佛大学的 Wilson 博士^[1] 提出高能质子进行放射治疗肿瘤的思想, 他详细地描述了人体内质子的深度剂量分布图. 1954 年, Tobias 等^[2] 在美国加利福尼亚大学伯克利国家实验室进行了世界上第一例晚期乳腺癌的质子束治疗. 高能质子束照射到水或介质中, 其能量沉积具有很陡的横向半影并在射程末端存在一个尖锐的 Bragg 峰, 因此质子束用于放射治疗时可将高剂量精确地释放在靶体积中, 从而显著地减少对周围正常组织的辐射损伤, 质子束放射治疗中, 一方面非均匀介质对质子束的 Bragg 峰影响显著, 另一方面为了提高质子束在非均匀介质中剂量计算算法的精度和效率, 所以研究非均匀介质的等效水厚度修正很重要. 本文利用蒙特卡罗 Fluka2011.2 程序^[3-6] 模拟了不同能量 (50—250 MeV) 的质子束入射到不同介质中能量沉积^[7] 的特性, 讨论了入射质子能量, 介质材料和厚度等因素对质子束 Bragg 位置分布的影响.

2 计算方法及计算模型

采用蒙特卡罗 Fluka2011.2 程序, 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特性. 图 1 是模拟的几何示意图. 图中标号 1 是黑洞, 粒子进入黑洞即消失, 表示粒子运动停止; 标号 2 是真空, 标号 3 是质子束, 标号 4 是介质. 图中显示一束平行的质子束入射到介质中.

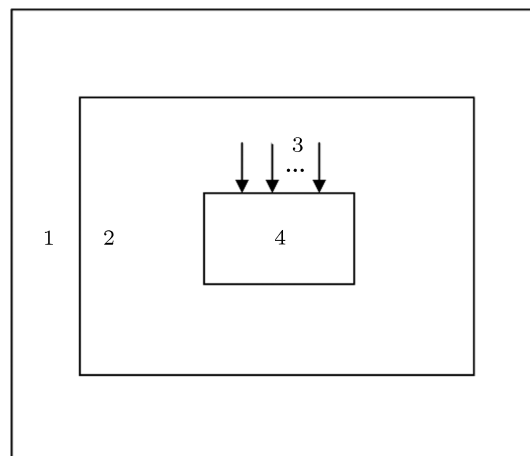


图 1 模拟的几何示意图

† 通讯作者. E-mail: qhou@scu.edu.cn

平行的质子束射野大小选择 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$, 垂直入射到介质表面, 介质的尺寸取 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times Z\text{ cm}$, Z 随质子初始能量的增加而增加, 保证 Bragg 峰落在介质内, 把介质分成 $0.1\text{ cm} \times 0.1\text{ cm} \times 0.1\text{ cm}$ 的单元格. 如果在介质中质子束产生的 Bragg 峰深度小于 10 cm 时, 把介质分成 $0.01\text{ cm} \times 0.01\text{ cm} \times 0.01\text{ cm}$ 的单元格. 质子的截止能量选择的是 100 keV , 计算分 5 次循环, 每次循环产生 1×10^5 个质子数, 跟踪记录每个质子在介质中的能量沉积分布. 对所有质子在介质中的产生的 Bragg 峰深度取平均得到不同能量下质子束 Bragg 峰深度, 保证统计误差小于 2%.

3 计算结果

3.1 非均匀介质中等效水修正公式

在临床质子治疗中, 入射质子的能量通常选择在 $50\text{--}250\text{ MeV}$ 范围内, 图 2 是模拟在这个能区内, 能量间隔 10 MeV 的质子束分别入射到水、肌肉、肺、脂肪和骨头中, 质子束 Bragg 峰位置随质子入射能量 E_0 的变化关系, 对同一介质, Bragg 峰位置 R 随入射能量 E_0 成指数关系, 拟合公式 $R = \alpha E_0^p$ [8], 表 1 所示. 根据此公式可以求出在 $50\text{--}250\text{ MeV}$ 之间任意质子能量在介质中产生的 Bragg 峰深度.

从表 1 中可以看出, 对不同介质的 p 值与对水中的 p 值相近, 大约为 1.76, 说明介质中的 Bragg 峰位置 $R_{\text{介质}}$ 与水中的 Bragg 峰位置 $R_{\text{水}}$ 的比值成线性关系, 且与质子束入射能量 E_0 无关. 这里我们定义当质子束以相同初始能量分别入射到均匀介质和水中时, $R_{\text{水}}$ 就是厚度为 $R_{\text{介质}}$ 的等效水深度, 那么对于厚度为 b 的单一介质, 等效水厚度 (WET, water equivalent thickness) 修正公式定义为

$$\text{WET} = R_{\text{水}}/R_{\text{介质}} \times b. \quad (1)$$

对于非均匀介质, 如图 3, 下边是水, $R_{\text{水}}$ 是质子能量为 E_0 时水中的 Bragg 峰深度, 上边是非均匀介质, d_1, d_2, \dots, d_n 分别是密度为 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ 的介质厚度, R_1, R_2, \dots, R_n 分别为质子能量为 E_0 时入射到密度分别为 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ 的介质中的 Bragg 峰深度, 对于非均匀介质, 等效水厚度修正公式为

$$\text{WED} = R_{\text{水}}/R_1 \times d_1 + R_{\text{水}}/R_2 \times d_2 + \dots$$

$$+ R_{\text{水}}/R_n \times d_n. \quad (2)$$

假设当能量 E_0 的质子束入射到非均匀介质中时, 质子束的 Bragg 峰落在密度 ρ_n 介质中, 那么在非均匀介质中的 Bragg 峰深度 d_x 由 (2) 式推导得出:

$$d_x = R_n + (1 - R_n/R_1) \times d_1 + (1 - R_n/R_2) \times d_2 + \dots + (1 - R_n/R_{n-1}) \times d_{n-1}. \quad (3)$$

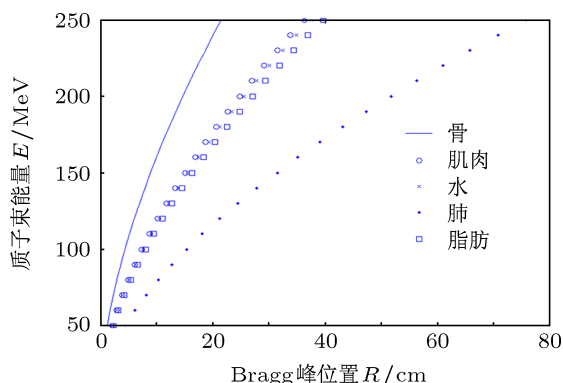


图 2 用 Fluka 程序模拟得到的质子初始能量与 Bragg 峰位置关系图

表 1 Fluka 程序下拟合的公式参数

介质	p	α	$R_{\text{介质}}/R_{\text{水}}$
水	1.7595	0.0022893	1.0
骨	1.7604	0.0013113	0.575336
肌肉	1.7594	0.0022197	0.96948
肺	1.7614	0.0045888	2.023296
脂肪	1.7627	0.0023818	1.057043

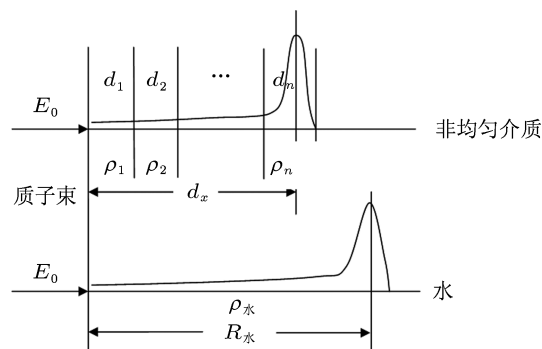


图 3 质子束入射到非均匀介质和水的示意图

3.2 水中介质位置对质子束 Bragg 峰位置的影响

水中介质位置与质子束的 Bragg 峰位置的关系, 入射质子束能量为 200 MeV, 垂直于入射束方向, 分别将介质放置在水中的前面、中间和后面时, 放置介质的位置小于质子束 Bragg 峰的深度, 取介质分别为骨、肌肉、脂肪、肺时, 介质的厚度都为 2 cm, 质子束 Bragg 峰位置的变化如表 2. 对相同介质, 分别将介质放置在水中的前面、中间和后面时, 质子束 Bragg 峰深度是相等的, 也就是说, 对相同入射能量, 质子束 Bragg 峰的深度与介质在水中的位置无关.

表 2 200 MeV 的质子束入射到不同介质位于水中前面、中间、后面的 Bragg 峰位置

介质种类	前面 R/cm	中间 R/cm	后面 R/cm
骨	24.1	24.1	24.1
肌肉	25.5	25.5	25.5
脂肪	25.7	25.7	25.7
肺	26.6	26.6	26.6

3.3 介质厚度对 Bragg 峰位置的影响

介质厚度与 Bragg 峰位置的关系, 入射质子能量为 150 MeV, 介质取肺, 并垂直于入射束方向放置在水前面. 放置介质的位置小于质子束 Bragg 峰的深度, 分别模拟介质厚度取 1.3, 2.7, 6.2, 13.2 和 18.9 cm 时, 质子束 Bragg 峰位置的变化如表 3. 表中第二列数据是质子入射到水中 Bragg 峰深度, 第三列数据是由 (3) 式计算得到的非均匀介质中的 Bragg 峰深度, 第四列是相同条件下 Fluka 程序模拟得到非均匀介质中 Bragg 峰深度, 第五列数据是模拟值与计算值之差的绝对值 ΔR , 从表中可以看出 ΔR 小于 1 mm.

表 3 150 MeV 的质子束入射到不同厚度的肺和水组成的非均匀介质的 Bragg 峰分析

加入水中的肺厚度/cm	$R_{水}/cm$	D/cm	$R_{非均匀介质}/cm$	$\Delta R/cm$
1.3	15.6	16.257	16.2	0.057
2.7	15.6	16.966	16.9	0.066
6.2	15.6	18.736	18.7	0.036
13.2	15.6	22.276	22.2	0.076
18.9	15.6	25.159	25.1	0.059
25.6	15.6	28.547	28.5	0.047

3.4 介质材料对 Bragg 峰位置的影响

入射质子能量为 200 MeV, 介质垂直于入射束方向放置在水前面, 放置介质的位置小于质子束 Bragg 峰的深度, 介质材料分别取骨、肌肉、脂肪、肺时, 质子束 Bragg 峰位置的变化如表 4. 表中第二列数据是质子入射水中的质子束 Bragg 峰深度, 第三列数据是由 (3) 式计算得到的非均匀介质的 Bragg 峰深度, 第四列是相同条件下 Fluka 程序模拟得到的非均匀介质中 Bragg 峰深度, 第五列数据是模拟值与计算值之差的绝对值 ΔR , 从表中可以看出 ΔR 小于 1 mm.

表 4 200 MeV 的质子束入射到 5 cm 厚度的不同介质和水组成的非均匀介质中 Bragg 峰分析

加入水中介质种类	$R_{水}/cm$	D/cm	$R_{非均匀介质}/cm$	$\Delta R/cm$
骨	25.6	21.909	21.9	0.009
肌肉	25.6	25.443	25.5	0.057
脂肪	25.6	25.87	25.9	0.03
肺	25.6	28.129	28.1	0.029

3.5 非均匀介质对 Bragg 峰位置的影响

入射质子能量为 200 MeV, 非均匀介质垂直于入射束方向放置在水前面, 放置非均匀介质的位置小于质子束 Bragg 峰的深度. 分别取五种不同组成非均匀介质, 第一种非均匀介质组成是 1 cm 的骨、1 cm 的肌肉、1 cm 的脂肪和 1 cm 的肺; 第二种非均匀介质组成是 3.7 cm 的骨、2.4 cm 的肌肉、2.1 cm 的脂肪和 5.5 cm 的肺; 第三种非均匀介质组成是 4.2 cm 的骨、2.3 cm 的肌肉、3.6 cm 的脂肪和 7.2 cm 的肺; 第四种非均匀介质组成是 5.1 cm 的骨、4.8 cm 的肌肉、5.7 cm 的脂肪和 3.4 cm 的肺; 第五种非均匀介质组成是 2.2 cm 的骨、6.1 cm 的肌肉、2.8 cm 的脂肪和 6.9 cm 的肺. 质子束 Bragg 峰位置的变化, 如表 5. 第二列数据是 200 MeV 质子束入射到水中的 Bragg 峰深度, 第三列数据是由 (3) 式计算得到非均匀介质中 Bragg 峰深度, 第四列是相同条件下 Fluka 程序模拟得到非均匀介质中 Bragg 峰深度, 第五列数据是模拟值与计算值之差的绝对值 ΔR , 从表中可以看出 ΔR 小于 1 mm.

表 5 200 MeV 的质子束入射到不同非均匀介质与水组成的非均匀介质的 Bragg 峰分析

加入水中非均匀介质	$R_{\text{水}}/\text{cm}$	D/cm	$R_{\text{非均匀介质}}/\text{cm}$	$\Delta R/\text{cm}$
第一种	25.6	25.39	25.4	0.01
第二种	25.6	25.689	25.7	0.011
第三种	25.6	26.264	26.3	0.036
第四种	25.6	23.713	23.7	0.013
第五种	25.6	27.426	27.4	0.026

4 讨论

在质子放射治疗中, 人体的解剖结构信息是由 CT 图像获得, 这些信息不能提供组织的化学成分, 也不能区分图像是什么介质, 因此无法给出 $R_{\text{介质}}/R_{\text{水}}$ 值, 但是 CT 图像提供了电子密度 ρ . 假定事先把人体中的所有器官 $R_{\text{介质}}/R_{\text{水}}$ 值与电子数密度比 ($\rho_{\text{水}}/\rho_{\text{介质}}$) 的关系都得到, 建立数据库, 那么就可以先由 CT 图像获得电子密度比, 再通过查数据库获得 $R_{\text{介质}}/R_{\text{水}}$, 再根据 CT 图像获得射束方

向上不同介质的厚度, 这样就能通过等效水修正公式, 计算出质子束在非均匀介质中 Bragg 峰的位置, 将等效水修正公式应用到质子束放射治疗的剂量计算中.

5 结论

质子放射治疗中, 非均匀组织对 Bragg 峰的位置影响显著, 本文总结的等效水修正公式应用到不同能量的质子束入射到水中加入非均匀介质时, 当 $R_{\text{介质}}/R_{\text{水}}$ 值存在时, 在非均匀介质中, (3) 式计算出的 Bragg 峰位置与 Fluka 模拟的 Bragg 峰位置误差都在 1 mm 之内, 这个误差在临床上放射治疗是允许的. 如果在临床上建立 $R_{\text{介质}}/R_{\text{水}}$ 与电子数密度比 ($\rho_{\text{水}}/\rho_{\text{介质}}$) 的数据库, 跟据相同能量质子束在水中的 Bragg 峰位置可以反出质子束在非均匀介质中的 Bragg 峰位置, 那么等效水厚度修正方法就可以应用到非均匀组织的剂量计算中, 并可能在质子束放射治疗中得到实际应用.

- [1] Wilson B R 1946 *Radiology* **47** 487
- [2] Tobias C A, Aanger H O, Lawrence J H 1952 *Am. J. Roentgenol.* **67** 1
- [3] Alfredo F, Paola R S, Alberto F, Johannes R 2011 *Fluka: a multi-particle transport code.* (Italian National Institute for Nuclear Physics (INFN) and European Organization for Nuclear Research (CERN))
- [4] I Ferrari R A, Mairani A, Paganetti H, Parodi K, Sala P 2011 *Phys. Med. Biol.* **56** 4001
- [5] Ju Z P, Cao W F, Liu X W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 174 (in Chinese) [鞠志萍, 曹午飞, 刘小伟 2009 物理学报 **58** 174]
- [6] Ju Z P, Cao W F, Liu X W 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 199 (in Chinese) [鞠志萍, 曹午飞, 刘小伟 2010 物理学报 **59** 199]
- [7] Wang Y G, Luo Z M 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1639 (in Chinese) [王营冠, 罗正明 2000 物理学报 **49** 1639]
- [8] Bortfeld T 1997 *Med. Phys.* **24** 2024

Study of inhomogeneous tissue equivalent water thickness correction method in proton therapy

Xie Zhao¹⁾ Zou Lian¹⁾ Hou Qing^{2)†} Zheng Xia³⁾

1) (*Sichuan Academy of Medical Sciences and Sichuan Provincial People's Hospital, Joint Laboratory for Medical Physics, Radiation Oncology Center, Chengdu 610072, China*)

2) (*Key Laboratory for Radiation Physics and Technology of Ministry of Education, Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China*)

3) (*Sichuan Academy of Medical Sciences and Sichuan Provincial People's Hospital, Emergency Department, Chengdu 610072, China*)

(Received 19 October 2012; revised manuscript received 12 November 2012)

Abstract

The inhomogeneous tissue equivalent water thickness correction method is an important part of research in proton radiotherapy. In this paper, we simulate the transport processes of a high-energy proton beam being injected into the water and other materials using Monte-Carlo multi-particle transport code Fluka, and according to the energy deposition distribution we obtain the depth of the Bragg peak when the protons are injected into different materials. Then we fit an analytic formula ($R = \alpha E_0^p$) to the relationship between initial proton energy and the depth of the proton Bragg peak in different materials. It is found that for the different energies of proton beam being injected into non-uniform organization, the difference between the Bragg peak depth from fitting and the depth of the proton beam Bragg peaks from Fluka program is less than 1 mm. If we can establish a database about the relationship of Bragg peak ratio between medium and water, with electron density, then the equivalent water thickness correction method will be able to applied to the dose calculation of for homogeneous medium in proton therapy.

Keywords: Monte-Carlo, proton therapy, equivalent water thickness, Bragg peak

PACS: 87.55.kd, 87.10.Rt

DOI: 10.7498/aps.62.068701

† Corresponding author. E-mail: qhou@scu.edu.cn