

不同人体组织中 ^{192}Ir 、 ^{125}I 粒子源的剂量分布研究

汤晓斌¹, 陈飞达¹, 谢芹^{1,2}, 刘云鹏¹, 耿长冉¹, 陈达¹ (1.南京航空航天大学核科学与工程系, 江苏南京 210016; 2.兰州大学核科学与技术学院, 甘肃兰州 730000)

摘要: 目的: 计算分析近距离放疗中不同粒子源、不同插植部位的剂量分布。方法: 利用蒙特卡罗粒子运输工具包 Geant4, 计算近距离放疗中 ^{192}Ir 、 ^{125}I 两种粒子源在不同介质中剂量分布的差异, 并根据美国医学物理学会 43 号工作组报告推荐的近距离放疗剂量计算公式(AAPM TG-43)对其重要参数进行修正。结果: 计算得到 ^{192}Ir 源、 ^{125}I 源在三种不同组织等效材料中的径向剂量函数、各向异性函数。结论: (1) 径向剂量函数决定于介质对光子的线能量衰减系数。衰减系数越大, 径向剂量函数下降越快, 反之越平缓; ^{125}I 粒子源的径向剂量函数随距源距离增大而衰减的趋势远大于 ^{192}Ir 粒子源。(2) 随着距源距离增大, 骨、水等效组织中各向异性函数曲线趋于平坦, 肺等效组织则没有变化。

关键词: 近距离放疗; 蒙特卡罗方法; Geant4; 径向剂量函数; 各向异性函数

DOI 编码: doi:10.3969/j.issn.1005-202X.2011.06.004

中图分类号: R144

文献标识码: A

文章编号: 1005-202X(2011)06-2971-05

Study of the Dose Distribution of ^{192}Ir 、 ^{125}I Seed in Different Tissue in Brachytherapy

TANG Xiao-bin¹, CHEN Fei-da¹, XIE Qin^{1,2}, LIU Yun-peng¹, GENG Chang-ran¹, CHEN Da¹

(1.Nuclear Science and Engineering Department, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China; 2.Nuclear Science and Technology Division, Lanzhou University, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: Objective: The dose distribution is one of the most essential questions in brachytherapy. The dose varies largely between different seed and different phantom materials so accurate simulation is needed. **Methods:** In this paper, a Monte Carlo simulation program toolkits—Geant4 has been used to calculate the dose distribution in different phantom materials around two kinds of brachytherapy source: ^{192}Ir and ^{125}I , respectively. **Results:** The radial dose function and anisotropy function has been calculated and analyzed detailedly based on the formula recommended by the American Association of Physics in Medicine Report of the Working Group 43(AAPM TG-43). **Conclusions:** (1) The radial dose function depends on μ_{en} of photon in materials and the radial dose function of ^{125}I fall down much more sharply than ^{192}Ir . (2) The curves of the anisotropy function in water and bone phantom materials become more plain than in lung phantom while the radial distance increases. This phenomenon reflects a law that more attenuation and scatter in materials, the curve of anisotropy function is more plain.

Key words: brachytherapy; Monte Carlo Method; Geant4; radial dose function; anisotropy function.

前言

近距离放疗是一种新的放疗技术。相对于外照射,它具有总剂量低、局部治疗剂量高、易于防护的优

点,因此近年来在鼻咽癌、前列腺癌等的治疗得到越来越广泛的应用^[1]。临床治疗中,近距离粒子源在肿瘤组织及其周围正常组织中的剂量分布是决定疗效的关键因素,然而不同粒子源在不同植入组织中的剂量分布显著不同,因此研究不同放射性粒子源在多种介质体模中的剂量分布非常必要。

目前对近距离放疗剂量分布的计算都基于 1994 年美国医学物理学会 43 号工作组报告(AAPM TG-43)推荐的近距离放疗在均质组织中的剂量计算公式^[2],公式中的径向剂量函数和各向异性函数需根据使用的放射性粒子源及植体实测或计算得到。随着

收稿日期:2011-10-09

基金项目:江苏省博士后科学基金资助项目(No.1002012C),南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目(No.Y1065-063)

作者简介:汤晓斌(1978-),男(汉族),江苏常州人,南京航空航天大学讲师,硕士生导师,从事医学物理研究,E-mail: ac2nt@nuaa.edu.cn。

数得到应用,使计算精确度显著提高。王建华、邱小平等人在 2007 年利用蒙特卡罗程序 MCNP、EGS 模拟得到了 ¹³¹Cs、¹²⁵I、¹⁰³Pd 粒子源的径向剂量函数^[3,4],2011 年梅雪松、张慧等人也报道了利用 MCNP 模拟 ¹²⁵I 粒子源在水球中的径向剂量函数的工作^[5]。然而,目前计算工作大多针对水体模,而对其他介质体模中径向剂量函数、各向异性函数的研究较少。

本文利用蒙特卡罗粒子输运工具包 Geant4 计算近距离放疗中 ¹⁹²Ir、¹²⁵I 两种粒子源在水、肺、骨三种等效介质中剂量分布的差异,并根据现有近距离放疗剂量计算公式(AAPM TG-43)对其径向剂量函数、各向异性函数进行修正。

1 材料与方法

1.1 粒子源的选择

最早用于近距离放疗的粒子源是 ²²⁶Ra, 其他还有 ¹⁹³Ir、⁶⁰Co、¹³⁷Cs、¹⁹⁵Ir、¹⁰³Pd 等。按照粒子源植入时间长短划分,可以将其分为用于短期放疗的 ²²⁶Ra、¹⁹²Ir、⁶⁰Co 和用于永久植入的 ¹⁹⁸Au、¹²⁵I、¹⁰³Pd^[6]。

本文分别选择了用于短期放疗的 ¹⁹²Ir 源和永久植入放疗的 ¹²⁵I 源进行模拟计算,比较其在介质中剂量分布的特性。粒子源的几何结构及尺寸是参照荷兰 Mallinckrodt Medical B.V 公司生产的近距离照射用粒子源设计的。

1.2 Geant4 建模

Geant4 是欧洲核子研究中心(CERN)组织开发的一款用于粒子输运模拟的软件工具包,目前在医学物理、核物理实验模拟、加速器物理和空间物理中都有广泛应用^[7]。本研究使用的是 Geant4.9.2.p01 版,安装环境为 Ubuntu 9.04 系统 alternate 版。

利用 Geant4 对近距离放疗建模,主要工作包括几何模型建立、放射源模拟和物理过程设定三项。建立的几何模型如图 1 所示,大致可分为 world、体模、近距离照射粒子三部分,其中 world 部分是边长为 30 cm 的立方体,任何粒子的输运都只能在 world 立方体内,超过 world 后系统将自动截断;体模部分是高 24 cm,直径 25 cm 的圆柱体,放置在 world 中心,用以模拟人体组织;近距离照射粒子部分由一个圆柱体和一个半球体组成,圆柱体高为 5 mm,直径 1.1 mm,放置在体模中央,与体模圆柱体同轴;半球体直径 1.1

mm,紧贴圆柱体前端无空隙放置。各部分使用材料如表 1 所示。

Geant4 中粒子源模拟不仅需要定义空间尺寸,还要定义发射抽样。源粒子发射抽样包括能量抽样、发射位置抽样和发射方向抽样三部分。¹⁹²Ir 粒子源光子能谱为 290 keV (14.3%)、308 keV (14.7%)、317keV (41.0%)、468 keV(23.4%)、608 keV(6.6%);¹²⁵I 源光子能谱为 27.4 keV(78.3913%)、31.4 keV(17.0416%)和 35.5 keV(4.5671%)。两种粒子源都是各项同性源,光子发射方向在 4π 空间均匀分布。光子从高 3.5 mm,直径 0.6 mm 的圆柱体中均匀抽样。

1.3 剂量分布的记录

由 1.2 节建立的几何模型可知,粒子源在体模中央,因此剂量分布具有空间对称性,即在体模同一 Z 值,同一半径的任意点,剂量应当一致。本组模拟将体模沿其 Z 轴自-12.0 cm 处到 12.0 cm 处每 1 mm 分成一小格,共 240 格;再沿其半径自 0.0 cm 处到 12.5 cm 处每 1 mm 分成一小格,共 125 格。同时创建一个二维数组 Energy[240][125],用于存放沉积到每个小格中的能量,换算成剂量,并计算径向剂量函数。

各向异性函数的记录略有不同。在体模圆柱体内,记录粒子传输每一步的位置(x,y,z)及能量沉积,同时创建数组 F[181],用以记录 0~180°各个角度上的剂量。令 $r=(x^2+y^2+z^2)^{1/2}$,当 r 等于指定半径时,计算该能量沉积点位置相对于粒子源中心与粒子源轴线的夹角,然后将此点的能量沉积记录到相应数组元素中,计算各向异性函数。

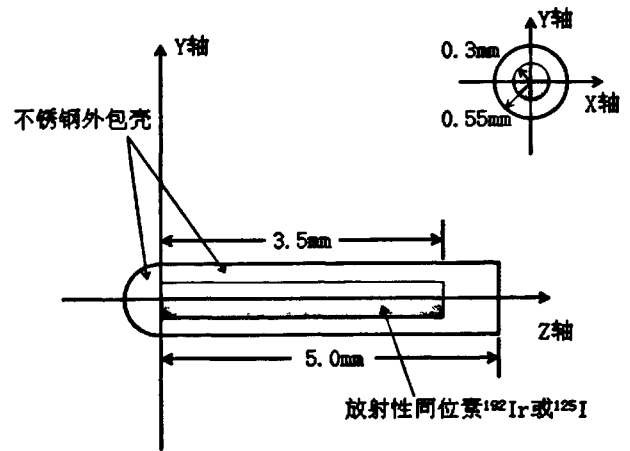


图 1 近距离粒子源切面结构

Fig.1 Sections of the brachytherapy source

表 1 几何模型各部分所用材料

Tab.1 Materials used in the Geant4 geometrical model

几何部分	材料名称	组成元素	密度
World 部分	空气	N(70%)、O(30%)	1.29 mg/cm ³
体模部分	水	H ₂ O 分子	1 g/cm ³
	肺	H(10.3%)、C(10.5%)、N(3.1%)、O(74.9%)、Na(0.2%)、P(0.2%)、S(0.3%)、Cl(0.3%)、K(0.2%)	0.26 g/cm ³
	骨	H(3.4%)、C(15.5%)、N(4.2%)、O(43.5%)、Na(0.1%)、Mg(0.2%)、P(10.3%)、S(0.3%)、Ca(22.5%)	1.92 g/cm ³
粒子源外壳部分	不锈钢	Mn(2%)、Si(1%)、Cr(19%)、Ni(10%)、Fe(68%)	8.02 g/cm ³
粒子源部分	铱(碘)	Ir(1)(100%)	22.4 g/cm ³

2 结果与分析

目前对近距离放疗剂量分布的计算都基于 1994 年美国医学物理学学会(AAPM)提出的剂量计算公式:

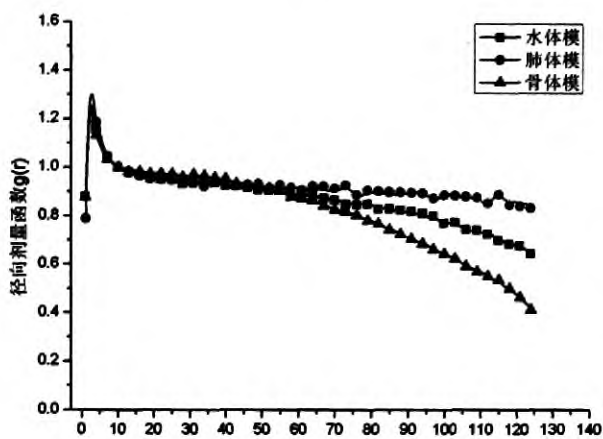
$$D(r, \theta) = S_k \Lambda [G(r, \theta) / G(r_0, \theta_0)] g(r) F(r, \theta)$$

式中 S_k 为空气比释动能强度; Λ 是剂量率常数; $G(r, \theta)$ 为几何因子; $g(r)$ 是径向剂量函数; $F(r, \theta)$ 是各向异性函数。

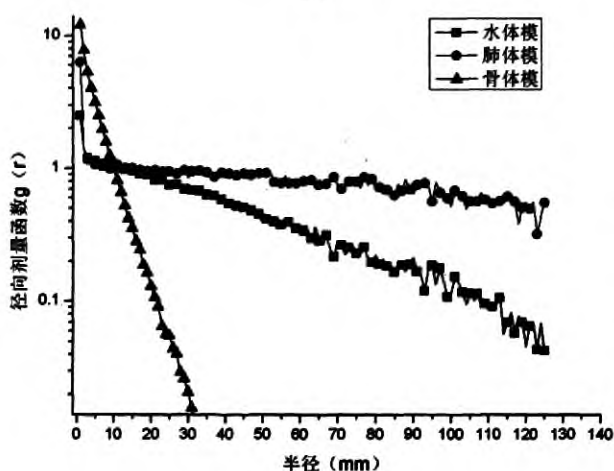
其中, 径向剂量分布函数用于描述由于吸收和散射所引起的剂量的下降, 各向异性函数用于描述粒子源周围剂量在不同方向随角度变化的分布特点。计算公式分别为:

径向剂量函数:

$$g(r) = \frac{\dot{D}(r, \theta_0) G(r_0, \theta_0)}{\dot{D}(r_0, \theta_0) G(r, \theta_0)}$$



(a)



(b)

图 2 (a) ^{192}Ir 源在三种介质中的径向剂量函数曲线比较 (b) ^{125}I 源在三种介质中的径向剂量函数曲线比较

Fig.2 (a) The radial dose function curve of ^{192}Ir in three different phantom materials (b) The radial dose function curve of ^{125}I in three different phantom materials

各向异性函数:

$$F(r, \theta) = \frac{\dot{D}(r, \theta) G(r, \theta_0)}{\dot{D}(r, \theta_0) G(r, \theta)}$$

图 2(a)、(b) 分别是 Geant4 计算得到的 ^{192}Ir 粒子源和 ^{125}I 粒子源的径向剂量分布函数。图 3 各图分别是 ^{192}Ir 源、 ^{125}I 源在三种不同介质中的各项异性函数。

3 结论与讨论

图 2(a) 中, 在距源 1 cm 到 12.5 cm 范围内, ^{192}Ir 粒子源在肺、水、骨三种等效组织中径向剂量函数从 1.0 分别下降至 0.8、0.6、0.4。在肺组织等效体模中, 径向剂量函数随距离的变化幅度最小, 曲线基本平坦; 而在骨组织等效体模中, 径向剂量函数随距离的增大下降明显; 在水组织等效体模中, 径向剂量函数随距离的变化幅度介于骨、肺组织等效体模两者之间。

径向剂量函数描述在介质中由于吸收和散射所引起的剂量的下降。对比图 2(a) 中三种不同组织中的径向剂量函数曲线发现, 径向剂量函数决定于介质对光子的线能量衰减系数。系数越大, 径向剂量函数下降越快, 反之则越平缓。肺、水、骨三种介质对光子的线能量衰减系数依次递增, 因此三种介质中径向剂量函数下降愈发迅速。

^{125}I 粒子源的情况与 ^{192}Ir 粒子源类似, 图 2 (b) 中肺、水、骨三种等效组织中径向剂量的下降速度依次递增。对比两种粒子源在各均质体模中的径向剂量函数, ^{125}I 粒子源的径向剂量函数下降明显大于 ^{192}Ir 粒子源。这是因为 ^{125}I 源发射光子的能量为几十 keV, 这个能量段上的光子与物质作用主要是光电效应, 光子能量在很小一段距离上就大量衰减。 ^{125}I 粒子源在各组织中的径向剂量函数同样符合径向剂量函数决定于介质对光子的线能量衰减系数的推断。

图 3(a)、(b)、(c) 显示的是 ^{192}Ir 粒子源在水、肺、骨组织中的各向异性函数。骨体模中的各向异性函数曲线最为平坦, 在半径为 3 cm 处函数值在 0.7~1.0 之间, 随着半径的增大, 曲线愈发平坦, 函数值在 0.8~1.0 之间; 水体模中各向异性函数曲线平坦度次之, 半径为 3 cm 处函数值在 0.65~1.0 之间, 随着半径增大, 函数值在 0.75~1.0 之间; 而肺体模中各向异性函数曲线变化最大, 函数值在 0.6~1.0 之间, 并且曲线并不随半径的变化而改变。

在距粒子源 1 cm 处, 粒子源的形状及内部结构相对于计算点与源距离而言尚不能忽略。粒子源本身并不对称, 各处不锈钢外包壳厚度也不尽相同, 因此造成距源 1 cm 处各向异性函数与其他半径处的差别。同理, 不锈钢外包壳对光子的吸收还造成了各半径处靠近粒子源两端方向上各向异性函数值的下降。随着离源距离的逐渐增大, 粒子源的形状与内部结构相对于计算点与源距离而言逐渐可以忽略。同时, 初级光

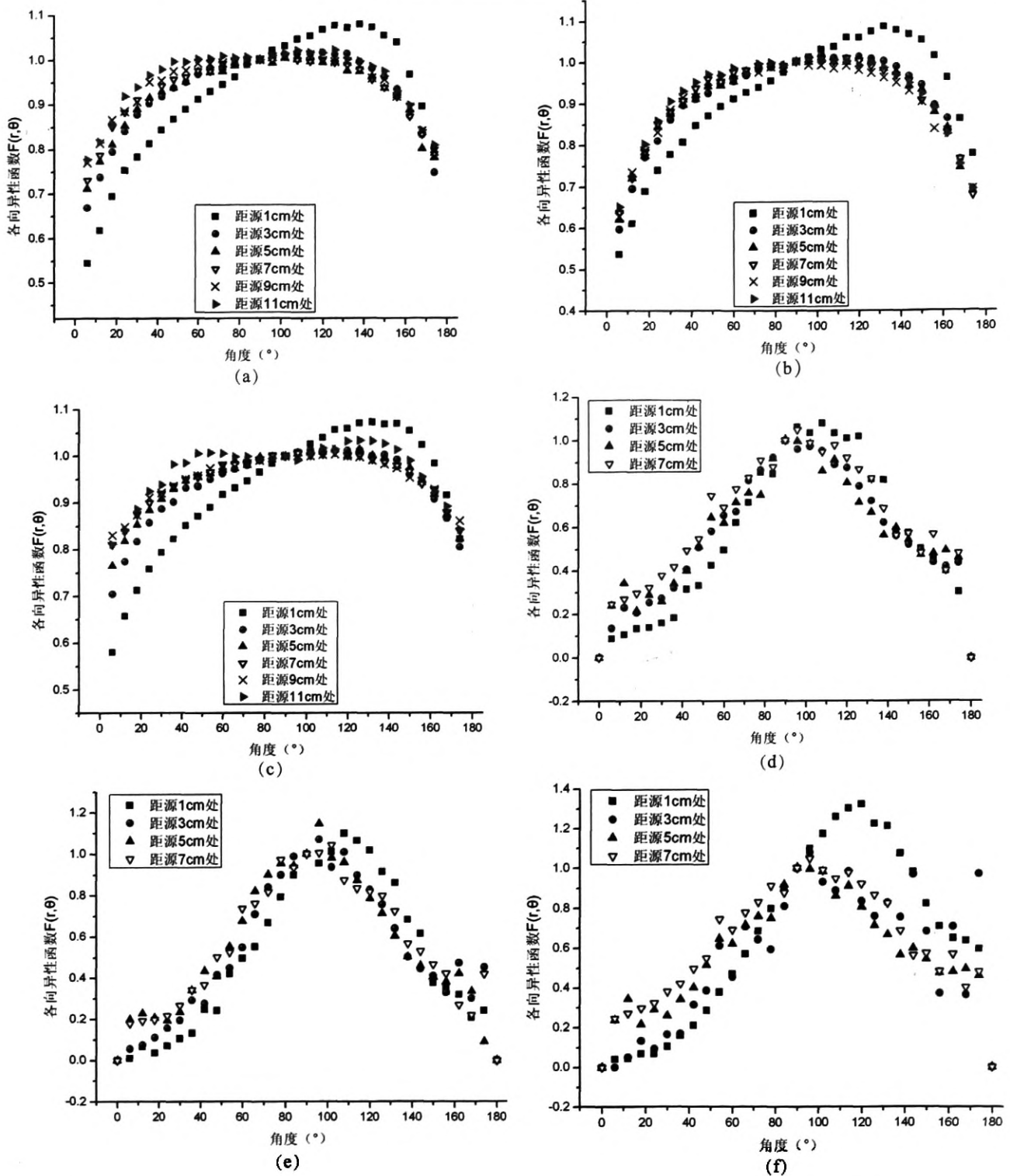


图 3 各体模中距粒子源各半径处各向异性函数曲线对比。(a) ^{192}Ir 在水体模中;(b) ^{192}Ir 在肺体模中;(c) ^{192}Ir 在骨体模中;(d) ^{125}I 在水体模中;(e) ^{125}I 在肺体模中;(f) ^{125}I 在骨体模中

Fig.3 The anisotropy function curve in three different phantom materials (a) ^{192}Ir in Water;(b) ^{192}Ir in Lung;(c) ^{192}Ir in Bone;(d) ^{125}I in Water;(e) ^{125}I in Lung;(f) ^{125}I in Bone

子与体模介质发生康普顿弹性散射,形成多级散射光子,这些越来越多的散射线弥补了粒子包壳对初级光子的衰减作用,因此随着距源半径的增大,各向异性函数逐渐趋于平坦,粒子源的剂量分布表现得愈发与

点源相似。

散射线对初级光子衰减的弥补作用取决于体模对光子散射本领的大小。肺、水、骨等效组织对光子的散射作用截面依次递增,因此骨体模中各向异性函数

曲线最为平坦。相反,在对光子散射作用最小的肺体模中,随着离源距离的不断增大,几乎观察不到各向异性函数随之改变。这个现象很好地证实了光子散射在初级光子衰减中的重要作用。

相比于 ¹⁹²Ir 粒子源,图 3(d)、(e)、(f)所示的 ¹²⁵I 粒子源各向异性函数曲线更加陡峭。这种各向异性是可以预见的。当光子与物质发生散射的截面越大时,散射线对初级光子的衰减作用的弥补就越强,粒子源的剂量分布就越趋向于点源。而 ¹²⁵I 粒子源由于发射光子能量较低,主要与物质发生光电效应,因此各向异性比 ¹⁹²Ir 粒子源更大。

4 总结

综上所述,应用 Geant4 蒙特卡罗程序包建立了两种近距离放疗粒子源在三种体模中的剂量计算模型,得到了不同源在不同体模中的径向剂量函数和各向异性函数。对比发现,在不同体模中,径向剂量函数决定于体模介质对光子的线能量衰减系数。系数越大,径向剂量函数下降越快,反之则越平缓。¹²⁵I 粒子源的径向剂量函数随距源距离增大而衰减的趋势远大于 ¹⁹²Ir 粒子源,各向异性也比 ¹⁹²Ir 粒子源更大,因此更适于

局部放疗。本研究还还为临床治疗中剂量控制的可靠性和准确性提供依据。

参考文献:

- [1] 曲昂, 王俊杰. 前列腺癌近距离治疗进展 [J]. 癌症进展, 2010(4): 361-365.
- [2] AAPM Report 43, Dosimetry of interstitial brachytherapy sources: Recommendations of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No.43 [S]. New York: American Association of Physicists in Medicine. Published by the American Institute of Physics, Inc., 1987
- [3] 王建华, 邱小平, 刘卫, 等. ¹³¹I Cs, ¹²⁵I 和 ¹⁰³Pd 近距离治疗源的径向剂量函数研究[J]. 核电子学与探测技术, 2007, 27(6): 1223-1226
- [4] 王建华, 邱小平, 许得江. 放射性粒子源近距离治疗的 Monte Carlo 模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007(S1): 924-927
- [5] 梅雪松, 张慧, 马玉刚, 等. 用 Monte Carlo 模拟法和理论计算法研究 ¹²⁵I 粒子源的剂量分布[J]. 中国辐射卫生, 2011, 20(2): 151-153
- [6] Geant4 Collaboration, Agostinelli, et al. Geant4—a simulation toolkit [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2007, 506(3): 250-303
- [7] Nath R, Meigooni AS, Meli JA. Dosimetry on transverse axes of ¹²⁵I and ¹⁹²Ir interstitial brachytherapy sources [J]. Med Phys, 1990, Nov; 17(6): 1032-1040
- [8] Nath R, Meigooni AS, Muench P, et al. Anisotropy functions for ¹⁰³Pd, ¹²⁵I, and ¹⁹²Ir interstitial brachytherapy sources [J]. Med Phys, 1993, Sep; 20(5): 1465-1473

(上接第 2966 页)


节,对于切实保证患者接受剂量的准确性是一个重要的方面。但是由于本身调强计划设计,验证及验证工具的复杂性,对于物理师提出了更高的要求。对于各个放射治疗中心要做好调强验证工作应该仔细研究其验证工具的性能,及其采用的方法。与同行相比较时应该注意所采用的阈值。对这些方面进行深入研究,才能最终真正做到计划模拟和机器治疗的所见即所得。

参考文献:

- [1] 戴建荣, 胡逸民, 张红志, 等. 针对患者调强放射治疗计划的剂量学验证[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2004, 13(3): 89-93.
- [2] 柏明刚, 张秀春, 潘建基, 等. 静态调强适形放射治疗设计及 30 例剂量验证分析[J]. 福建医科大学学报, 2006, 40(3): 248-251.
- [3] 冯国生, 梁远, 吴丹玲, 等. 调强放射治疗两种剂量验证方法的比较[J]. 广西医科大学学报, 2009, 26(3): 390-392.
- [4] Létourneau D, Gulam M, Yan D, et al. Evaluation of a 2D diode array for IMRT quality assurance[J]. Radiother Oncol, 2004, 70(2): 199-206.
- [5] 张书旭, 周凌宏, 陈光杰, 等. 二维空气电离室矩阵 MatriXX 系统的应用研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2009, 29(1): 93-96.
- [6] 阎超, 王中和, 胡海生, 等. 鼻咽癌调强放射治疗计划的多序列平面剂量仪(Mapcheck)验证[J]. 肿瘤, 2009, 29(5): 486-498.
- [7] 刘丹, 迟子峰, 张伟, 等. 食管癌调强放疗计划剂量学验证研究[J]. 中

- 华放射肿瘤学杂志, 2011, 20: 64-68.
- [8] Kwang-ho C, Sei-kwon K, Meyeon L, et al. Evaluation of delivered monitor unit accuracy of gated step-and-shoot [J]. Med Phys, 2010, 37: 1146-1151.
- [9] Dobler B, Streck N, Klein E, et al. Hybrid plan verification for intensity-modulated radiation therapy (IMRT) using the 2D ionization chamber array IMRT matrix—a feasibility study [J]. Phys Med Biol, 2010, 55(2): N39-55.
- [10] Buonamici FB, Compagnucci A, Marrazzo L, et al. An intercomparison between film dosimetry and diode matrix for IMRT quality assurance [J]. Med Phys, 2007, 34(4): 1372-1379.
- [11] Poppe B, Blechschmidt A, Djouguela A, et al. Two-dimensional ionization chamber arrays for IMRT plan verification [J]. Med Phys, 2006, 33(4): 1005-15.
- [12] Woo M, Nico A. Using a matrix detector for rotational delivery QA [J]. Med Phys, 2007: 2502.
- [13] Koch N, Ashenafi M, Li J, et al. Evaluation of a 2D ion chamber array for quality assurance of intensity modulated arc therapy [J]. Med Phys, 2008: 2945.
- [14] Li JG, Yan G, Liu C. Comparison of two commercial detector arrays for IMRT quality assurance [J]. J Appl Clin Med Phys, 2009, 10(2): 2942.
- [15] Low DA, Harms WB, Mutic S, et al. A technique for the quantitative evaluation of dose distributions [J]. Med Phys, 1998, 25(5): 656-61.
- [16] 张建英. 插值对二维电离室矩阵调强验证 Gamma 通过率的影响 [J]. 中国医学物理学杂志, 2010, 27(6): 2224-2226.

不同人体组织中¹⁹²Ir、¹²⁵I粒子源的剂量分布研究

作者: 汤晓斌, 陈飞达, 谢芹, 刘云鹏, 耿长冉, 陈达, TANG Xiao-bin, CHEN Fei-da, XIE Qin, LIU Yun-peng, GENG Chang-ran, CHEN Da
作者单位: 汤晓斌, 陈飞达, 刘云鹏, 耿长冉, 陈达, TANG Xiao-bin, CHEN Fei-da, LIU Yun-peng, GENG Chang-ran, CHEN Da(南京航空航天大学核科学与工程系, 江苏南京, 210016), 谢芹, XIE Qin(南京航空航天大学核科学与工程系, 江苏南京210016; 兰州大学核科学与技术学院, 甘肃兰州730000)
刊名: 中国医学物理学杂志 
英文刊名: Chinese Journal of Medical Physics
年, 卷(期): 2011, 28(6)

参考文献(8条)

1. Nath R;Meigooni AS;Muench P Anisotropy functions for ¹⁰³Pd, ¹²⁵I, and ¹⁹²Ir interstitial brachy-therapy sources 1993(05)
2. Nath R;Meigooni AS;Meli JA Dosimetry on transverse axes of ¹²⁵I and ¹⁹²Ir interstitial brachytherapy sources[外文期刊] 1990(06)
3. Geant4 Collaboration;Agostinelli Geant4-a simulation toolkit 2007(03)
4. 梅雪松;张慧;马玉刚 用Monte Carlo模拟法和理论计算法研究¹²⁵I粒子源的剂量分布[期刊论文]-中国辐射卫生 2011(02)
5. 王建华;邱小平;许润江 放射性粒子源近距离治疗的Monte Carlo模拟[期刊论文]-清华大学学报(自然科学版) 2007(S 1)
6. 王建华;邱小平;刘卫 ¹³¹Cs, ¹²⁵I和¹⁰³Pd近距离治疗源的径向剂量函数研究[期刊论文]-核电子学与探测技术 2007(06)
7. AAPM Report 43, Dosimetry of inter-stitial brachytherapy sources:Recommendations of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 43 1987
8. 曲昂;王俊杰 前列腺癌近距离治疗进展[期刊论文]-癌症进展 2010(04)

本文读者也读过(7条)

1. 张涛. 刘义保. 杨波. 吴和喜. 顾金虎 平行gama射线束深穿透的蒙特卡罗模拟[会议论文]-2009
2. 徐俊奎 医用重离子束输运过程的Geant4模拟[学位论文]2009
3. 梅雪松. 张慧. 马玉刚. 赵广义. 周巍. 庞杨. 关世荣. 王雪航. MEI Xue-song. ZHANG Hui. MA Yu-gang. ZHAO Guang-yi. ZHOU Wei. PANG Yang. GUAN Shi-rong. WANG Xue-hang ¹²⁵I粒子源在水中剂量分布的Monte Carlo模拟[期刊论文]-吉林大学学报(理学版) 2011, 49(5)
4. 明智. Ming Zhi 有机玻璃体架对于放射治疗剂量的影响[期刊论文]-中国医学物理学杂志2011, 28(6)
5. 刘喃喃. 刘书焕. 万俊生 ⁹⁰Sr-⁹⁰Y衰变辐射电子在空气介质中能量沉积与空气电离密度分布Monte-Carlo模拟[会议论文]-2008
6. 赵瑞. 陆军. 李莎. 朱向辉. 岳养军. 魏世华. 王恒. ZHAO Rui. LU Jun. LI Sha. ZHU Xiang-hui. YUE Yang-jun. WEI Shi-hua. WANG Heng 深层肿瘤重离子分野治疗技术及相关问题的探讨[期刊论文]-中国医学物理学杂志2012, 29(2)
7. 凌龙 基于CT数据的GEANT4蒙特卡罗剂量模拟[学位论文]2007

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_zgyxw1xz201106004.aspx