

## •非血管介入 Non-vascular intervention•

 $^{125}\text{I}$  植入治疗源的剂量学参数的 Monte Carlo 模拟

花正东, 王德忠, 刘 怡, 赵 征, 陈 晨

**【摘要】**  $\gamma$  放射性粒子源  $^{125}\text{I}$  已被广泛用于前列腺和眼睛的植入治疗中。本文采用 EGS5 蒙特卡罗代码计算了美国医用物理学协会(AAPM)TG-43U1 报告中推荐的型号为 6711  $^{125}\text{I}$  近距离治疗源(活性区长取 0.28 cm)的剂量学参数,如剂量率常数、径向剂量函数和各向异性函数。剂量率常数为 0.959 cGy/h/U,与 TG-43U1 推荐值和 Dolan 等已发表的值相差在 2.0%以内;径向剂量函数数值与二者均符合较好;随着角度和距离的增加,各向异性函数数值与二者的复合程度趋佳。并给出了实用性较强的径向剂量函数的拟合公式。

**【关键词】** 近距离治疗; I-125; 剂量学参数; 蒙特卡罗方法

中图分类号:R45 文献标志码:A 文章编号:1008-794X(2010)-01-0038-04

Monte Carlo simulation of dosimetric parameters for the Model 6711  $^{125}\text{I}$  brachytherapy source HUA

Zheng-dong, WANG De-zhong, LIU Yi, ZHAO Zheng, CHEN Chen. Environmental Monitoring Station of Fengxian District, Shanghai 201400, China

Corresponding author: HUA Zheng-dong

**【Abstract】** The  $\gamma$ -radioactive seed brachytherapy source has been widely employed in the implantation therapy for the prostatic carcinoma and the ophthalmic lesions. In this study the dosimetric parameters for characterization of a low-energy interstitial brachytherapy source  $^{125}\text{I}$  were calculated according to dose calculation formalism recommended by AAPM TG-43U1. For data processing, a 0.28 cm active length was used for the geometry function. The dosimetry parameter air-Kerma strength, dose rate constant, radial dose function and anisotropy function were estimated by means of the EGS5 Monte Carlo code. The results obtained from this study are in good agreement with the corresponding values recommended by TG-43U1 and with the data reported by Dolan, et al. (J Intervent Radiol, 2010, 19: 038-041)

**【Key words】** brachytherapy, iodine-125, dosimetric parameter, Monte Carlo method

发射低能  $\gamma$  光子的放射性粒子源  $^{125}\text{I}$  已被广泛用于永久性植入的前列腺癌和暂时性植入的脑部、眼睛等器官恶性肿瘤的治疗<sup>[1-3]</sup>。由于  $\gamma$   $^{125}\text{I}$  放射性核素发出的  $\gamma$  光子具有较低的能量,因此  $\gamma$  光子在组织中具有较短的射程,即  $\gamma$  光子在组织中所产生的剂量随距离的增加迅速衰减。从而使得其既能有效地杀死肿瘤细胞,又能降低对周围正常组织的损伤。但是在肿瘤的治疗过程中,必须确切的了解植入放射性粒子源的剂量学特征。我们选择 6711 型  $^{125}\text{I}$  放射性粒子源,依据美国医学物理学协会(AAPM)TG-43U1 报告中的要求<sup>[3]</sup>,使用 EGS5 蒙特卡罗模拟计算代码确定其剂量学参数<sup>[4]</sup>。

## 1 剂量学参数

AAPM 在 2004 年修订了用于指导植入治疗源的剂量学参数计算的 TG-43U1 报告<sup>[3]</sup>。该报告中推荐的用于二维剂量率分布的坐标系见图 1, 公式如下:

$$\dot{D}(r, \theta) = S_k \cdot \Lambda \cdot \frac{GL(r, \theta)}{GL(r_0, \theta_0)} \cdot g_L(r) \cdot F(r, \theta) \quad (1)$$

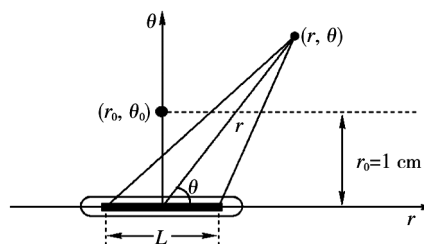


图 1 剂量分布计算的坐标系

作者单位:201400 上海市奉贤区环境监测站(花正东、赵 征、陈 晨);上海交通大学机械与动力工程学院(王德忠);上海市辐射环境监督站(刘 怡)

通信作者:花正东

式(1)中  $S_k$  为空气比释动能强度,单位符号为  $U(1U = cGy \cdot h^{-1} \cdot cm^2)$ ;  $\Lambda$  为剂量率常数( $cGy \cdot h^{-1} \cdot U^{-1}$ );  $r$  为感兴趣点到纯银圆柱棒中心的距离(cm);  $r_0$  为距离纯银圆柱棒中心的 1 cm 的感兴趣点;  $\theta$  为以纯银圆柱棒中心为极点,纯银圆柱棒长为轴的感兴趣点在该极坐标系中的角度;  $\theta_0$  为  $\theta = \pi/2$ ;  $G(r, \theta)$  为几何因子,用于描述放射性在空间中的分布;  $g_L(r)$  为径向函数,用于描述极角  $\theta = \pi/2$  时,半径  $r$  对剂量分布的影响;  $F(r, \theta)$  是各项异性函数,用于描述角度  $\theta$  和半径  $r$  对剂量分布的影响。对于公式(1)可分成如下五部分,即 TG-43U1 推荐的剂量学参数如下:

$$S_K = \dot{K}_s(d) \cdot d^2. \quad (2)$$

$$\Lambda = \dot{D}(r_0, \theta_0) / S_K. \quad (3)$$

$$G_L(r, \theta) = \begin{cases} \beta / (L \cdot r \cdot \sin \theta) & \text{if } \theta \neq 0^\circ \\ (r^2 - L^2/4)^{-1} & \text{if } \theta = 0^\circ \end{cases}. \quad (4)$$

$$g_L(r) = \dot{D}(r, \theta_0) \cdot G_L(r_0, \theta_0) / (\dot{D}(r_0, \theta_0) \cdot G_L(r, \theta_0)) \quad (5)$$

$$F(r, \theta) = \dot{D}(r, \theta) \cdot G_L(r, \theta_0) / (\dot{D}(r, \theta_0) \cdot G_L(r, \theta)) \quad (6)$$

## 2 蒙特卡罗模拟计算

### 2.1 源的几何描述及材料

图 2 是三维坐标轴系中 6711 型  $^{125}I$  粒子源的 Y-Z 平面图。粒子源由一个环状圆柱体,位于环状圆柱体两端的半球,及含  $^{125}I$  化合物镀层的纯银圆柱棒组成,整个粒子源长为 4.55 mm,其中环状圆柱体部分长 3.75 mm、内直径为 0.66 mm、外直径为 0.8 mm;半球的直径为 0.75 mm;纯银的圆柱状棒,其长度为 2.8 mm、直径为 0.5 mm。在圆柱状纯银棒上镀上厚度为 2.0  $\mu m$  含  $^{125}I$  的 AgI 和 AgBr 混合物。环状圆柱体和位于环状圆柱体两端的半球的材料都是金属钛,圆柱状纯银棒和环状圆柱体之间的材料为真空。本计算中所需涉及的材料特性见表 1<sup>[3]</sup>, $^{125}I$  放射性发射  $\gamma$  射线及 X 射线的能量及分支比见表 2<sup>[5]</sup>。

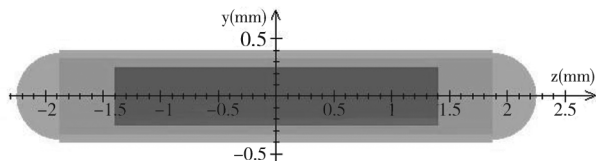


图 2 6711 型  $^{125}I$  粒子源的 Y-Z 平面图

### 2.2 剂量学参数的计算

由于能量低于 5 keV 光子、电子在人体组织中的射程非常短,因此,在模拟计算过程中,所有材料中的光子、电子的 CUT-OFF 能量设置为 5 keV,且

表 1 蒙特卡罗模拟计算中材料的特性

材料	密度( $g \cdot cm^{-3}$ )	元素组成	所占质量百分数
银	10.50	Ag	100
钛	4.54	Ti	100
空气	1.20E-3	C	0.012 4
		Ar	1.282 7
		O	23.178 1
		N	75.526 8
水	0.998	H	11.189 8
		O	88.810 2

表 2  $^{125}I$  放射性核素发射的光子能量及分支比

光子能量(keV)	分支比(%)
26.9	0.003 24
27.2	40.6
27.5	75.7
30.9	6.83
31.0	13.2
31.2	0.121
31.7	3.81
31.8	0.58
35.5	6.68

模拟计算过程中,考虑能量高于 5 keV 的 K、L 层荧光 X 射线对剂量分布的贡献<sup>[3]</sup>。无论粒子源是位于空气材料中,还是位于水球中,模拟计算的粒子数都为  $5E + 08$  个。

2.2.1 空气比释动能强度 TG-43U1 报告中建议:计算空气比释动能强度时,源与空气比释动能记录体之间应该设置为真空<sup>[3]</sup>。沿 X-Y 轴方向,设置一个内半径为 100 cm、厚度为 1.0 mm、高度为 1 cm 的指环状圆柱体。6711 型  $^{125}I$  粒子源位于图 2 原点。指环状圆柱体和粒子源之间的材料设置为真空,指环状圆柱体的材料为空气,见表 1。计算指环状圆柱体中的空气比释动能,把计算得到的空气比释动能与内半径的平方的乘积即是 6711 型  $^{125}I$  粒子源的空气比释动能强度。

2.2.2 剂量率常数 设置一个半径为 15 cm 的球,6711 型  $^{125}I$  粒子源位于球的中心。球中除了  $^{125}I$  粒子源外,其余部分的材料都设置为水,其成分及密度见表 1。沿 X-Y 轴(图 2)方向,设置一个内半径为 9.75 mm、厚度为 0.5 mm、高度为 1 mm 的指环状圆柱体,用于记录该位置上的剂量率  $D(r_0, \theta_0)$ 。依据公式(3), $D(r_0, \theta_0)$  与空气比释动能强度的比值即为剂量率常数。

2.2.3 径向函数 径向函数中涉及到的距粒子源中心不同距离上的剂量率是相对与粒子源位于直径为 30 cm 的球体中心而言的。沿 X-Y 轴(图 2)方向,当  $r \leq 5.0$  cm 时,设置一个内半径为  $(r - 0.5)$  mm、厚度为 1.0 mm、高度为 1.0 mm 的指环状圆柱体;当

$r \geq 6.0$  cm 时, 设置一个内半径为  $(r-1.5)$  mm、厚度为 3.0 mm、高度为 3.0 mm 的指环状圆柱体。距离  $r$  的设置值分别为: 0.5、1.0、1.5、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、7.0、8.0、9.0 和 10.0 cm。把各距离上计算得到的剂量率依据公式(5)即可求得径向函数值。

**2.2.4 各向异性函数** 各向异性函数中涉及的剂量率值是关于距离和极角的二维函数, 所以在直径为 30 cm 的水球中在分别沿 0 到 90 度, 步长为 10 度; 1 到 10 cm, 步长为 1 cm, 在 X-Y 轴(图 2)方向设置多个指环状圆柱体, 用于计算各距离、各角度上的剂量率值。然后再依据公式(6)即可求得各向异性函数值。

### 3 计算结果及相关比较

#### 3.1 剂量率常数

空气比释动能强度的计算结果为  $5.450\text{E}-18$  Gy Bq<sup>-1</sup>, 水球中  $D(r_0, \theta_0)$  为  $5.227\text{E}-14$  Gy Bq<sup>-1</sup>, 因此剂量率常数为 0.959 cGy/h/U。TG-43U1 推荐的蒙特卡罗方法得到的剂量率常数为 0.950 cGy/h/U, 而实验方法得到的剂量率常数为 0.980 cGy/h/U<sup>[3]</sup>; Dolan 等<sup>[5]</sup>通过蒙特卡罗方法得到的值为 0.942。本计算值与 TG-43U1 的推荐值和 Dolan 等得到的值之间的相对偏差都在 2.0% 以内。若考虑到所实用的蒙特卡罗代码的不同及所用的光子截面数据库的不同, 2.0% 的误差是完全可以接受的。

#### 3.2 径向函数

本计算得到的不同距离上的径向函数值列于表 3。本计算结果与 TG-43U1 的推荐值<sup>[3]</sup>、Dolan 等<sup>[5]</sup>的值均符合较好, 当距离  $r \leq 5.0$  cm 时, 相对偏差在 2.0% 以内。依据 TG-43U1 关于径向函数拟合公式, 对表 3 中本模拟计算得到的值进行拟合, 拟合公式及参数如下:

$$g_L(r) = a_0 + a_1 \cdot r + a_2 \cdot r^2 + a_3 \cdot r^3 + a_4 \cdot r^4 + a_5 \cdot r^5. \quad (7)$$

其中,  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  的值分别为 1.148,  $-1.089\text{E}-1$ ,  $-5.076\text{E}-2$ ,  $1.302\text{E}-2$ ,  $-1.166\text{E}-3$  和  $3.734\text{E}-5$ 。在 0.5 到 10 cm 范围内, 该拟合值相对于模拟计算值的偏差在 2% 以内。

#### 3.3 各向异性函数(图 3)

本计算得到的不同距离、极角上的各向异性函数值列于表 4。与 TG-43U1 中推荐的值<sup>[3]</sup>相比, 随极角的角度增加, 两者之间的相对偏差逐渐变小。角度在 30° ~ 90°、距离在 0.5 ~ 10 cm 之间时, 两者相对偏差在 4.0% 以内; 角度在 20° 时, 两者的相对偏差也都在 6.0% 以内; 角度在 0° ~ 10° 时, 随距离的

表 3 6711 型 <sup>125</sup>I 粒子源的径向函数值  $g_L$  ( $r$ )

距离(cm)	本工作		Dolan等(2006)	TG-43U1(2004)
	g <sub>L</sub> -MC	g <sub>L</sub> -MC/g <sub>L</sub> -Fit	g <sub>L</sub> -MC/g <sub>L</sub> -Dolan	g <sub>L</sub> -MC/g <sub>L</sub> -TG-43U1
0.5	1.088	1.006	1.012	1.016
1.0	1.000	1.000	1.000	1.000
1.5	0.902	0.992	0.997	0.993
2.0	0.801	0.984	0.995	0.984
3.0	0.620	0.983	0.990	0.981
4.0	0.464	0.981	0.977	0.935
5.0	0.349	0.997	0.983	0.959
6.0	0.259	1.000	0.985	0.959
7.0	0.192	1.000	0.990	0.965
8.0	0.141	0.993	0.986	0.953
9.0	0.103	1.000	0.972	0.945
10.0	0.076	0.987	0.987	0.950

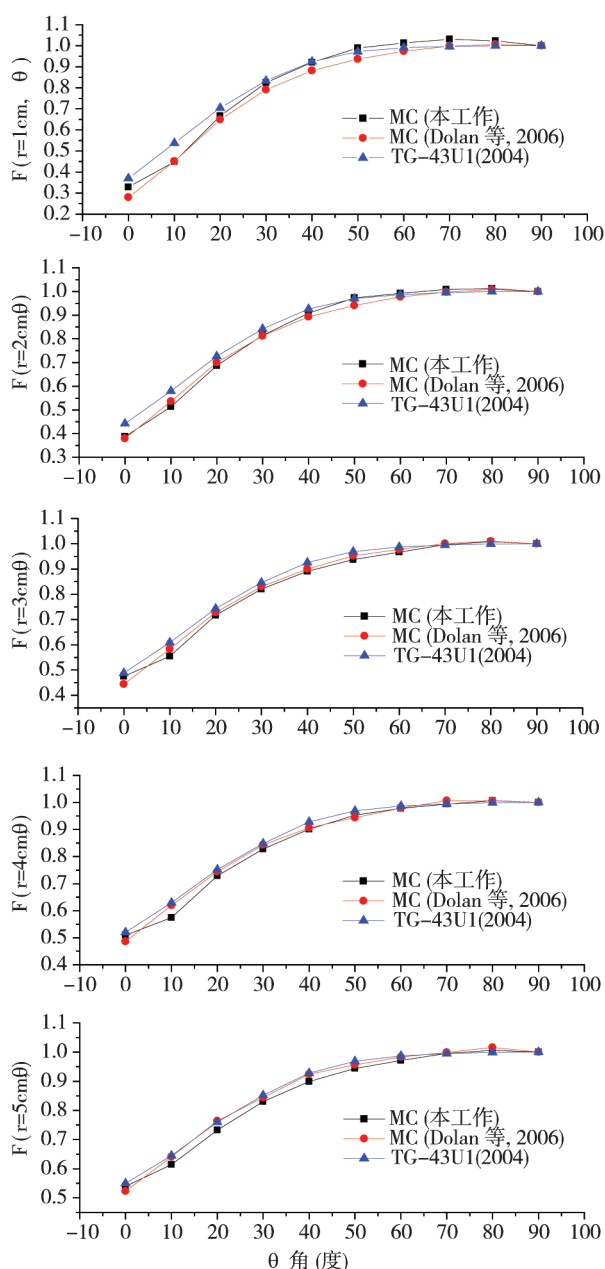


图 3 各向异性函数值比较图

表 4 6711 型  $^{125}\text{I}$  粒子源的各向异性函数值

Polar angle $\theta$ ( degrees )	$r$ ( cm )									
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
0	0.328	0.387	0.475	0.509	0.539	0.554	0.548	0.559	0.602	0.599
10	0.449	0.513	0.554	0.575	0.614	0.622	0.645	0.648	0.663	0.677
20	0.666	0.687	0.717	0.729	0.733	0.741	0.745	0.749	0.749	0.753
30	0.825	0.815	0.820	0.828	0.830	0.840	0.838	0.841	0.854	0.849
40	0.921	0.908	0.891	0.901	0.899	0.899	0.900	0.902	0.898	0.894
50	0.989	0.973	0.938	0.953	0.944	0.934	0.947	0.932	0.940	0.937
60	1.013	0.993	0.967	0.978	0.971	0.969	0.970	0.979	0.973	0.986
70	1.031	1.009	0.997	0.994	0.996	0.993	0.979	0.990	0.978	0.985
80	1.023	1.013	1.008	1.007	1.002	1.006	1.004	0.998	1.013	0.993
90	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

增加,两者的相对偏差反而变小,但也都在 17% 以内。在小角度、短距离的相对偏差大的原因主要与设置的记录体的大小有关,由于本计算中,采用的记录体比较小,且由于 6711 型  $^{125}\text{I}$  粒子源两端的焊接头相对于侧向的圆桶状的钛材料厚度要厚很多,因此导致了小角度、短距离上的各向异性函数计算值低于 TG-43U1 报告中推荐的值。本计算结果与 Dolan 等<sup>[6]</sup>的使用 PRTAN 代码模拟计算得到的值除在小角度、短距离上的值相对偏差在 20% 以内外,其他均符合得较好,在 6% 以内。图 3 给出了距离为 1、2、3、4 和 5 cm 时,  $0^\circ \sim 90^\circ$  位置上的各向异性函数曲线图。本计算结果与 TG-43U1 报告的推荐值以及 Dolan 等的计算值略有差别,其主要由采用的模拟计算代码、光子截面数据库、以及模型的建立细微差别引起。

#### 4 讨论

本文根据 AAPM TG-43U1 的关于植入治疗粒子源的剂量学参数的相关定义,以及在依据 Dolan 等采用的 6711 型  $^{125}\text{I}$  粒子源的尺寸的基础上建立适用于 EGS5 计算的计算模型,利用 EGS5 蒙特卡罗代码计算了 6711 型  $^{125}\text{I}$  粒子源的剂量学参数。本计算结果与 TG-43U1 的推荐值以及 Dolan 等模拟计算得到的值符合得比较好。结果之间的误差来源主要有采用的蒙特卡罗代码不同,采用的光子截面数据库不同,模拟计算过程中所设定的几何体的尺

寸不同,以及源的几何结构模型的建立上的略微差别。其中特别是对于极角小于  $30^\circ$  的各向异性函数值的计算,若粒子源两端模型的建立差别较大,则结果差别肯定大;若几何模型一致,而记录用的几何体设置的不同,对结果的影响也是非常大的。

#### [参考文献]

- [1] Rivard MJ, Coursey BM, DeWard LA, et al. Update of AAPM Task Group No.43 Report: A revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations,"[J]. Med Phys, 2004, 31: 633 - 674.
- [2] Wang JH, Liu W, Xu XJ, et al. Dosimetric parameters of palladium-103 brachytherapy source with Monte Carlo Simulation [J]. Chin Sci Bulletin, 2008, 53: 1304 - 1309.
- [3] Rivard MJ. Comprehensive Monte Carlo calculations of AAPM Task Group Report No. 43 dosimetry parameters for the Model 3500 I-Plant  $^{125}\text{I}$  brachytherapy source[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2002, 57: 381 - 389.
- [4] Hirayama H, Namito Y, Bielajew AF, et al. The EGS5 Code System[J]. SLAC-Report-730, 2005.
- [5] Katakura J, Oshima M, Kitao K, et al. <http://ie.lbl.gov/toi/nucleide.asp?iZA=530125>.
- [6] Dolan J, Li Z, Williamson JF, et al. Monte Carlo and experimental dosimetry of an  $^{125}\text{I}$  brachytherapy seed[J]. Med Phys, 2006, 33: 4675 - 4684.

(收稿日期:2009-06-24)



# $^{125}\text{I}$ 植入治疗源的剂量学参数的Monte Carlo模拟

作者: 花正东, 王德忠, 刘怡, 赵征, 陈晨  
作者单位: 花正东, 赵征, 陈晨(上海市奉贤区环境监测站, 201400), 王德忠(上海交通大学机械与动力工程学院), 刘怡(上海市辐射环境监督站)  
刊名: 介入放射学杂志 ISTIC PKU  
英文刊名: JOURNAL OF INTERVENTIONAL RADIOLOGY  
年, 卷(期): 2010, 19(1)  
被引用次数: 0次

## 参考文献(6条)

1. Rivard MJ, Coursey BM, DeWard LA, et al. Update of AAPM Task Group No. 43 Report: A revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations, "[J]. Med Phys, 2004, 31:633 -674.
2. Wang JH, Liu W, Xu XJ, et al. Dosimetric parameters of palladium-103 brachytherapy source with Monte Carlo Simulation[J]. Chin Sci Bulletin, 2008, 53:1304-1309.
3. Rivard MJ. Comprehensive Monte Carlo calculations of AAPM Task Group Report No. 43 dosimetry parameters for the Model 3500 I-Plant  $^{125}\text{I}$  brachytherapy source[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2002, 57:381 -389.
4. Hirayama H, Namito Y, Bielajew AF, et al. The EGS5 Cede System[J]. SLAC-Report-730, 2005.
5. Katakura J, Oshima M, Kitao K, et al. <http://ie.lbl.gov/toi/nuelide.asp?iZA=530125>.
6. Dolan J, Li Z, Williamson JF, et al. Monte Carlo and experimental dosimetry of an  $^{125}\text{I}$  brachytherapy seed[J]. Med Phys, 2006, 33:4675-4684.

## 相似文献(1条)

1. 期刊论文 刘韬. 林保和 Pd-103永久性种子植入在胰腺癌治疗中的应用 - 陕西肿瘤医学 2002, 10(2)  
Pd-103以其优越的物理特性而被认为是替代I-125进行肿瘤近距离治疗的理想核素. Pd-103永久性种子植入治疗已经成为胰腺癌综合治疗的一种方法. 本法对于不能手术的III期胰腺癌病人具有一定的应用价值.

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_jrfsxzz201001013.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_jrfsxzz201001013.aspx)  
授权使用: qknfy(qknfy), 授权号: 48a3ee6d-66e3-4ce9-b042-9de900c02dea

下载时间: 2010年9月6日