

宫颈癌 ^{252}Cf 近距离腔内放疗中对周围器官的 辐射影响评价

王鹏辉 孙普男

(黑龙江大学 物理科学与技术学院 哈尔滨 150080)

摘要 ^{252}Cf 近距离放射治疗主要用于宫颈癌的腔内放射治疗, 在放射治疗的同时势必对附近器官产生辐射危害, 因此评价宫颈癌患者在放疗过程中其他器官的辐射损伤是必要的。本文以某医院 ^{252}Cf 宫颈癌的放射治疗为参考, 通过 ^{252}Cf 在空气、水中剂量场分布理论计算和实际检测, 对比子宫、直肠、膀胱、卵巢等器官的耐受剂量限值, 给出了在宫颈癌治疗过程中, 除靶器官子宫会受大剂量照射出现损伤外, 直肠、膀胱、卵巢等器官也受较大辐射危害。为了减少宫颈癌患者的辐射损伤, 经计算给出了不同源活度情况下的最佳照射时间。

关键词 ^{252}Cf , 宫颈癌, 辐射剂量场, 器官辐射评价

中图分类号 O571.33

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.050301

Evaluation of radiation effects on peripheral organs of ^{252}Cf cervical carcinoma under close cavity radiotherapy

WANG Penghui SUN Punan

(College of Physical Science and Technology, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract [Background] The ^{252}Cf brachytherapy is mainly used for cervical cancer endovascular radiotherapy. [Purpose] Radiation therapy will inevitably cause radiation damage to nearby organs. Therefore, it is necessary to evaluate the radiation damage of cervical cancer patients during radiotherapy. [Methods] This article is based on the radiation therapy of ^{252}Cf cervical cancer in a hospital, and theoretical calculations and practical tests of dose field distribution in air and water by ^{252}Cf , and compared with the tolerance limits of uterus, rectum, bladder, ovary and other organs. [Results] By comparison, it is concluded that in the process of cervical cancer treatment, organs such as the rectum, bladder and ovary are also affected by large radiation in addition to damage caused by high doses of irradiation. [Conclusion] In order to reduce the radiation damage of cervical cancer patients, the optimal irradiation time under different source activity was calculated.

Key words ^{252}Cf , Cervical cancer, Radiation dose field, Organ radiation assessment

放射治疗是宫颈癌的治疗方法之一, 特别是以 ^{252}Cf 中子为代表的腔内近距离治疗是常用的放射疗法^[1-2]。自 1999 年以来, 中子治疗在我国已有近

20 年的发展历史, 人们对于它的治疗效果与辐射防护做过不少研究, 特别是利用发达的现代影像技术对于病灶的观察更加仔细, 利用蒙特卡罗等程序对

黑龙江省自然科学基金, 蒙特卡罗方法在肿瘤放射治疗 QA 与 QC 中应用(No.A200805)

第一作者: 王鹏辉, 男, 1992 年出生, 2016 年毕业于黑龙江大学, 现为硕士研究生, 核技术及应用专业

通信作者: 孙普男, E-mail: sunpunan@126.com

收稿日期: 2017-12-08, 修回日期: 2018-03-07

Supported by Heilongjiang Province Natural Science Foundation, Application of Monte Carlo Method in QA and QC of Tumor Radiotherapy (No.A200805)

First author: WANG Penghui, male, born in 1992, graduated from Heilongjiang University in 2016, master student, major in nuclear technology and applied

Corresponding author: SUN Punan, E-mail: sunpunan@126.com

Received date: 2017-12-08, revised date: 2018-03-07

不同屏蔽材料的模拟数据更加全面。然而,关于中子治疗在宫颈癌放疗过程中对患者其他器官的辐射剂量计算研究,中子在宫颈癌放疗过程中很可能会对人体其他器官产生辐射影响,特别是邻近器官,比如直肠、膀胱等都有潜在威胁^[3-4]。因此,计算中子在宫颈癌放疗中对其他器官的辐射剂量,对于患者的健康保护及中子的广泛应用具有重要的参考价值。我们所做的工作就是以某医院中子为参照,计算 ^{252}Cf 中子源的剂量场分布及中子在宫颈癌治疗过程中对其他器官的辐射剂量,对其他器官所受辐射影响作出评价并得出不同源活度情况下的最佳照射时间。

1 理论计算

1.1 空气中剂量场分布

^{252}Cf 在发出中子射线的同时,会产生大量 γ 射线,所以 ^{252}Cf 剂量场包括中子与 γ 射线两部分^[5-6]。由分出截面法计算 ^{252}Cf 空气中中子剂量场分布,利用式(1)计算:

$$\dot{H} = \frac{1.3 \times 10^{-7}}{4\pi R^2} \times S \times f \quad (1)$$

式中: $\dot{H}$ 为中子剂量当量率, $\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$; S 为 ^{252}Cf 的中子发射率, $\text{n} \cdot \text{s}^{-1}$; R 为离放射源距离, m ; f 为穿过材料的中子减弱因子,空气中 f 取 1。

带电离子平衡条件下,由比释动能与吸收剂量关系,可推得式(2):

$$\dot{D} = 3.6 \times 10^3 \varphi \left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right) E_{\gamma} \quad (2)$$

式中: $\dot{D}$ 为 γ 射线的吸收剂量率, $\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$; φ 为 γ 射线的注量率, $\text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; μ_{en}/ρ 为 γ 射线的质能吸收系数, $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$; E_{γ} 为 γ 射线的能量, J 。

某医院 2009 年 12 月 20 日 ^{252}Cf 校准源活度为 $2.04 \times 10^9 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$ 。已知 ^{252}Cf 半衰期为 2.659 a,放射出的中子平均能量为 2.35 MeV^[7-9]。由放射源活度指数衰减规律得 2017 年 12 月 20 日中子源活度为 $2.535 \times 10^8 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由文献[10]计算得 γ 射线平均能量为 0.767 MeV,与文献[11]数据一致。 γ 射线在空气中的质能吸收系数为 $2.895 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

由式(1)、(2),中子在空气中的剂量场分布如图 1 所示。

根据式(1)算得 $1 \text{ g } ^{252}\text{Cf}$ 在空气中 1 m 处中子剂量当量率为 $24.2 \text{ Sv} \cdot \text{h}^{-1}$,与文献[11]中一致;式(2)算得 γ 吸收剂量率为 $1.32 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$,与文献[11]一致。由图 1 可知, 0.05 m 之前剂量衰减较快, 0.10 m 之后趋于平稳,所以 ^{252}Cf 中子源工作时人员要尽量远

离放射源;空气中中子近距离辐射场 γ 射线的剂量贡献与中子的剂量贡献相差不大,因此在遇到类似卡源故障时,维修工作人员在防护中子的同时更要注意 γ 射线的防护。

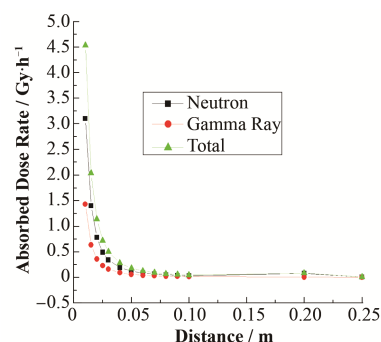


图 1 ^{252}Cf 在空气中的剂量场分布
Fig.1 Dose distribution of the ^{252}Cf in air

1.2 水中剂量场分布

研究人员通常用水模拟人体,医院工作人员在做质量控制时通常会用到水箱。可见,明确中子在水中的剂量场分布至关重要。采用分出截面法,利用式(3)进行计算:

$$\dot{D}(R) = \frac{S}{4\pi R^2} f_{\text{DH}}(R) e^{-\sum_{i=1}^{\infty} \frac{N_A}{M_{\text{Ai}}} \rho_i \sigma_{R_i} R} \quad (3)$$

式中: N_A 为阿伏伽德罗常数; $f_{\text{DH}}(R)$ 为快中子在等效体密度纯氢介质中的剂量减弱函数, $f_{\text{DH}}(R) = d_{\text{H}} \text{Be}^{-\Sigma_{\text{th}} R}$, d_{H} 为中子注量对剂量的转换因子, $\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^2$; B 为注量累积因子; $\Sigma_{\text{th}} = N_{\text{H}} \sigma_{\text{H}}$ 为中子对氢的宏观总截面, cm^{-1} 。

水对中子慢化作用明显,而次级 γ 射线在中子慢化过程中产生,因此水中 ^{252}Cf γ 射线剂量场包括初级与次级。 γ 射线剂量场计算采用式(4):

$$\dot{D} = 3.6 \times 10^3 \left(\frac{A}{4\pi R^2} \right) \text{Be}^{-\mu R_1} \left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right) E_{\gamma} \quad (4)$$

式中: A 为中子源 γ 射线活度, s^{-1} , 本文中中子源 γ 射线活度 $A = 1.404 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$; R_1 为水层厚度, cm ; B 为描述散射光子影响的累计因子; μ 为能量为 E_{γ} 的光子在密度为 ρ 的物质中的线衰减系数, cm^{-1} , 水中 $\mu = 0.0785 \text{ cm}^{-1}$; $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{H}_2\text{O}} = 3.219 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$; $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

由经验公式法计算累计因子 B , 用伯杰公式比用泰勒公式计算剂量结果更准确,经计算得伯杰公式: $B_{\text{Berger}} = 1 + 1.4385 \times 0.0785 R e^{0.1771 \times 0.0785 R}$ 。

查已知实验数据,利用 origin 软件拟合,得出水中中子源初级 γ 射线剂量与次级 γ 射线剂量关系为 $Y = 0.07736 + 0.01242R$, Y 为次级 γ 射线剂量率与初级 γ 射线剂量率之比; R 为水层厚度, cm 。

由式(3)、(4)及初级 γ 射线与次级 γ 射线关系得 ^{252}Cf 在水中的剂量场分布见图 2。

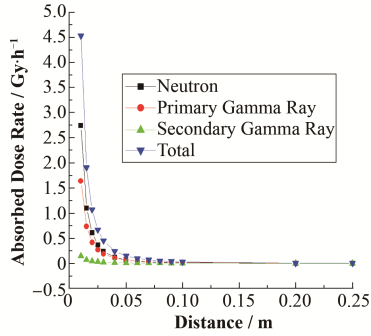


图 2 ^{252}Cf 在水中的剂量场分布
Fig.2 Dose distribution of the ^{252}Cf in water

由图 2 可知，距离在 0.10 m 前剂量减弱明显，说明水中剂量吸收较多，0.10 m 之后，剂量处于较低水平，因此 ^{252}Cf 中子多用于腔内近距离治疗。

表 1 空气和水中剂量当量率测量值
Table 1 Measurement of dose equivalent rate in air and water

空气 Air				水 Water			
探头与源的间距 Distance of detector and source / m	实验值 Experiment / mSv·h ⁻¹			探头与源的间距 Distance of detector and source / m	实验值 Experiment / mSv·h ⁻¹		
	中子 Neutron	γ	总数 Total		中子 Neutron	γ	总数 Total
0.20	67.31	4.05	71.36	0.10	81.14	23.42	104.56
0.25	42.96	2.31	45.27	0.20	5.946	6.19	12.14
0.50	9.864	0.74	10.60	0.25	2.164	3.60	5.76
0.75	4.513	0.32	4.83	0.50	0.037	0.34	0.38
1.00	2.436	0.18	2.62	0.75	0.001	0.03	0.03

由表 1 和理论计算值对比可知，理论计算值与实验值符合得较好。

3 人体不同器官的剂量

3.1 器官剂量计量

宫颈癌患者进行 ^{252}Cf 中子腔内治疗时，由于放射源在体内，在照射病灶的同时不可避免的会对邻近器官产生剂量影响。本文根据正常成年女性人体器官结构位置及规定参考人体^[12]确定各主要器官距子宫的距离，进行了中子治疗宫颈癌过程中人体器官剂量率的计算。得到患者不同器官剂量率分布见表 2。

由于各方面原因，该医院中子 ^{252}Cf 源目前正在超使用期限延长使用，源活度的降低带来的是治疗时间的延长。目前一般病人一次的治疗时间约为 3 h，一疗程有 4~5 次照射^[13]。由于中子在宫颈癌治

2 实验测量

2.1 实验方法

利用 BH3105 型中子剂量当量仪测量中子剂量当量率，利用 451P 型电离室巡测仪测 γ 射线剂量当量率，水箱设计为 150 cm×50 cm×50 cm 的开口水箱。根据两测量仪的量程，对空气中分别选取 0.2 m、0.25 m、0.5 m、0.75 m、1.0 m 处进行测量；对水中分别选取 0.1 m、0.2 m、0.25 m、0.5 m、0.75 m 处进行测量。

2.2 测量结果

实验所测结果如表 1 所示。

疗中，患者所受到的照射为非均匀照射，为了更准确的描述不同器官所受辐射影响，需要用式(5)、(6)作进一步计算^[14]。

$$H_T = D_T \cdot W_R \quad (5)$$

式中： H_T 为当量剂量，Sv，表征不同品质的射线对器官的影响； D_T 为器官的平均吸收剂量，Gy； W_R 为辐射权重因子，表征不同辐射的相对生物效应^[15]。器官对不同射线的敏感程度是不一样的，式(5)很好地表达了不同射线对器官的剂量影响。

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T \quad (6)$$

式中： E 为有效剂量，Sv，表征不同品质射线对不同器官的影响； W_T 是组织器官的组织权重因数，表征器官对射线的敏感程度^[16]。

由式(5)、(6)及各组织器官组织权重因子得各器官剂量如表 3 所示。

表 2 患者不同器官吸收剂量率分布
Table 2 The absorbed dose rate distribution of different organs in patients

器官 Organs	距离 Distance / cm	中子 Neutron / Gy·h ⁻¹	初级γ Primary gamma-ray / Gy·h ⁻¹	次级γ Secondary gamma-ray / Gy·h ⁻¹	总数 Total / Gy·h ⁻¹
子宫 Uterus	0.5	11.65	6.46	0.54	18.65
膀胱 Bladder	2.0	6.09×10 ⁻¹	4.18×10 ⁻¹	4.28×10 ⁻²	1.07
卵巢 Ovary	10.0	9.62×10 ⁻³	1.67×10 ⁻²	3.37×10 ⁻³	2.97×10 ⁻²
直肠 Rectum	2.0	6.09×10 ⁻¹	4.18×10 ⁻¹	4.28×10 ⁻²	1.07
大肠 Large intestine	10.0	9.62×10 ⁻³	1.67×10 ⁻²	3.37×10 ⁻³	2.97×10 ⁻²
小肠 Small intestine	7.5	2.28×10 ⁻²	3.04×10 ⁻²	5.18×10 ⁻³	5.84×10 ⁻²
肾脏 Kidney	22.5	4.48×10 ⁻⁴	2.40×10 ⁻³	8.56×10 ⁻⁴	3.70×10 ⁻³
胰腺 Pancreas	22.5	4.48×10 ⁻⁴	2.40×10 ⁻³	8.56×10 ⁻⁴	3.70×10 ⁻³
胃 Stomach	27.5	1.71×10 ⁻⁴	1.35×10 ⁻³	5.66×10 ⁻⁴	2.09×10 ⁻³
脾 Spleen	30.0	1.08×10 ⁻⁴	1.03×10 ⁻³	4.63×10 ⁻⁴	1.60×10 ⁻³
肝 Liver	27.5	1.71×10 ⁻⁴	1.35×10 ⁻³	5.66×10 ⁻⁴	2.09×10 ⁻³
肺 Lung	45.0	9.18×10 ⁻⁶	2.41×10 ⁻⁴	1.53×10 ⁻⁴	4.03×10 ⁻⁴
心脏 Heart	37.5	3.00×10 ⁻⁵	4.84×10 ⁻⁴	2.63×10 ⁻⁴	7.77×10 ⁻⁴
甲状腺 Thyroid	55.0	2.12×10 ⁻⁶	1.00×10 ⁻⁴	7.60×10 ⁻⁵	1.78×10 ⁻⁴
脑 Brain	75.0	1.49×10 ⁻⁷	1.96×10 ⁻⁵	1.98×10 ⁻⁵	3.95×10 ⁻⁵

表 3 患者各器官剂量分布
Table 3 Dose distribution of the patients' organs

器官 Organs	每次的当量剂量 Equivalent dose every time / Sv	每个疗程(4 次)的当量剂量 Equivalent dose every treatment (4 times) / Sv	每个疗程(4 次)的有效剂量 Effective dose every treatment (4 times) / Sv
子宫 Uterus	370.50	1 482	37.05
膀胱 Bladder	19.65	78.6	3.93
卵巢 Ovary	3.48×10 ⁻¹	1.39	0.28
直肠 Rectum	19.65	78.6	1.97
结肠 Coion	3.48×10 ⁻¹	1.39	8.34×10 ⁻²
小肠 Small intestine	7.92×10 ⁻¹	3.17	0.16
肾脏 Kidney	2.32×10 ⁻²	9.29×10 ⁻²	4.65×10 ⁻³
胰腺 Pancreas	2.32×10 ⁻²	9.29×10 ⁻²	4.65×10 ⁻³
胃 Stomach	1.09×10 ⁻²	4.36×10 ⁻²	5.23×10 ⁻³
脾 Spleen	7.71×10 ⁻³	3.08×10 ⁻²	1.54×10 ⁻³
肝 Liver	1.09×10 ⁻²	4.36×10 ⁻²	2.18×10 ⁻³
肺 Lung	1.46×10 ⁻³	5.83×10 ⁻³	7.00×10 ⁻⁴
心脏 Heart	3.15×10 ⁻³	1.26×10 ⁻³	6.30×10 ⁻⁵
甲状腺 Thyroid	5.91×10 ⁻⁴	2.36×10 ⁻³	1.18×10 ⁻⁴
脑 Brain	1.23×10 ⁻⁴	4.91×10 ⁻⁴	2.46×10 ⁻⁵

3.2 辐射评价

为了表示患者及公众受辐射的影响程度,需要借助于计量学对人群所受的辐射照射进行定量评价。国际辐射防护委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP)第 60 号出版物定义确定效应(组织反应):由于细胞被杀死而引起功能损失所造成的器官和组织的大剂量急性损伤,极端情况下可引起受照人员的死亡。常规放射治疗中正常组织的耐受量一般可参考表 4。表 4 中 TD_{5/5}

为最小耐受剂量,指在标准治疗条件下,治疗后 5 a 内小于或等于 5%的病例发生严重并发症的剂量。

TD_{50/5} 为最大耐受剂量,指在标准治疗条件下,治疗后 5 a,不超过 50%病例发生严重并发症的剂量。

通过计算人体器官每疗程剂量与表 4 中剂量比较可知,一个疗程内除了子宫超剂量外,其他器官都在剂量允许范围内,若疗程超过 5 次,则直肠、膀胱、卵巢会剂量超标,对身体健康产生一定的影响;小肠、肾脏相对比较安全;最安全的器官为脑、甲状腺、肺、胃、肝等器官。

表 4 放射耐受量
Table 4 Radiation tolerance (cGy)

器官 Organs	损伤 Damage	1%~5% (TD _{5/5})	25%~30% (TD _{50/5})
胃 Stomach	溃疡, 穿孔, 出血 Ulcers, perforation, bleeding	4 500	5 500
小肠 Small intestine	溃疡, 穿孔, 出血 Ulcers, perforation, bleeding	5 000	6 500
直肠 Rectum	溃疡, 狭窄 Ulcer, stenosis	6 000	8 000
肝 Liver	急性、慢性肝炎 Acute, chronic hepatitis	2 500	4 000
肾 Kidney	急、慢性肾炎 Urgent, chronic nephritis	2 000	2 500
膀胱 Bladder	挛缩 Contracture	6 000	8 000
卵巢 Ovary	永久不育 Permanent infertility	200~300	625~1 200
子宫 Uterus	坏死、穿孔 Necrosis, piercing	>10 000	>20 000
肺 Lung	急、慢性肺炎 Urgent, chronic pneumonia	1 500	2 500
心脏 Heart	心包炎、全心炎 Pericarditis, whole heart inflammation	4 500	5 500
脑 Brain	梗死、坏死 Infarct, necrosis	6 000	7 000
甲状腺 Thyroid	功能低下 Low function	4 500	15 000

3.3 最佳治疗时间

由于 ^{252}Cf 源活度是随时间衰减的, 因此对于相同照射剂量所需照射时间是不一样的。根据源活度指数衰减规律及剂量学相关知识, 参照相关标准得出该放射源不同日期每疗程的最佳照射时间, 如图 3 所示。

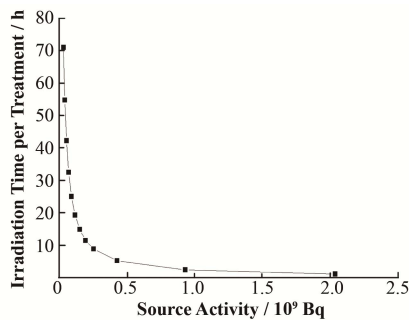


图 3 不同活度的 ^{252}Cf 每疗程的最佳照射时间
Fig.3 The best irradiation time of ^{252}Cf with different activity in each course of treatment

4 结语

1) 通过对空气中 ^{252}Cf 中子源剂量场的计算, 我们明确了防护中子的同时对 γ 射线进行屏蔽防护的重要性, 证明了中子采用三层屏蔽结构的正确合理性。

2) 通过对水中中子 ^{252}Cf 剂量场的计算, 我们知道了中子在水中剂量衰减很快, 从而有利于对病灶肿瘤进行辐射, 同时对邻近器官减少损害。证明了中子近距离治疗的科学性。

3) 通过对患者其它器官受照剂量的计算可知, 照射宫颈肿瘤时, 会对子宫造成很大伤害, 同时直肠、膀胱、卵巢等器官会受较大影响, 特别是当增加治疗疗程时, 这些器官会受很大威胁, 治疗时要采取措施进行保护; 对小肠、肾等器官来说, 相对

比较安全, 治疗时采取一般保护即可; 脑、甲状腺、肺、胃、肝等器官所受剂量远小于限制剂量, 治疗时只要稍加注意即可。

同时, 前期调查研究了 25 例 $\text{I}_b \sim \text{II}_b$ 期的宫颈癌, 放疗后骨髓抑制二例 (8.0%), 放射性直肠炎一例 (4.0%), 放射性膀胱炎两例 (4.0%), 无严重放射性损伤发生。

4) 对于不同时期的中子射线, 对应不同的活度给出了每疗程的最佳照射时间。

参考文献

- 林高娟. 宫颈癌的放射治疗进展[J]. 现代肿瘤医学, 2011, **19**(1): 183-184. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4992.2011.01.67.
LIN Gaojuan. Progress in radiotherapy of cervical cancer[J]. New Oncology, 2011, **19**(1): 183-184. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4992.2011.01.67.
- Morice P, Leary A, Creutzberg C, *et al.* Endometrial cancer[J]. Lancet, 2016, **387**(10023): 1094-1108. DOI: 10.1016/s0140-6736(15)00130-0.
- 杨越波, 叶青剑, 曾海涛, 等. ^{252}Cf 中子后装在宫颈癌术前辅助放疗中的作用[J]. 中山大学学报(医学科学版), 2011, **32**(5): 644-647. DOI: 10.13471/j.cnki.j.sun.yat-sen.univ(med.sci).2011.0122.
YANG Yuebo, YE Qingjian, ZENG Haitao, *et al.* Role of ^{252}Cf neutron after loading in preoperative radiotherapy for cervical cancer[J]. Journal of Sun Yat-sen University (Medical Sciences), 2011, **32**(5): 644-647. DOI: 10.13471/j.cnki.j.sun.yat-sen.univ(med.sci).2011.0122.
- 崔彦莉. 宫颈癌放疗所致急性放射性直肠炎影响因素[J]. 分子影像学杂志, 2017, **40**(1): 44-47. DOI: 10.3969/j.issn.1674-4500.2017.01.13.
CUI Yanli. Factors influencing acute radiation proctitis

- caused by radiotherapy of cervical cancer[J]. *Journal of Molecular Imaging*, 2017, **40**(1): 44–47. DOI: 10.3969/j.issn.1674-4500.2017.01.13.
- 5 邓君, 苏根平, 任福利, 等. ^{252}Cf 中子后装治疗室辐射防护的测量与分析[J]. *中国辐射卫生*, 2015, **24**(3): 240–242. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2015.03.020.
- DENG Jun, SU Genping, REN Fuli, *et al.* Measurement and analysis of radiation protection of ^{252}Cf neutron after loading treatment room[J]. *China Journal of Radiation Health*, 2015, **24**(3): 240–242. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2015.03.020.
- 6 马桥, 刘明哲, 刘德明, 等. MC 法优化设计 ^{252}Cf 中子源辐射屏蔽装置[J]. *核电子学与探测技术*, 2016, **36**(8): 791–794.
- MA Qiao, LIU Mingzhe, LIU Deming, *et al.* Modification of ^{252}Cf neutron source radiation shielding device based on MC method[J]. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 2016, **36**(8): 791–794.
- 7 温国义. 浅谈核电站用钷-252 中子源[J]. *科技与创新*, 2017, **16**(5): 5–6. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2017.16.00.
- WEN Guoyi. A discussion on ^{252}Cf neutron source for nuclear power station[J]. *Technology and Innovation*, 2017, **16**(5): 5–6. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2017.16.00.
- 8 贺丹, 宋英明, 邹树梁, 等. 基于 ^{252}Cf 源的反应堆结构屏蔽材料屏蔽性能测试装置设计[J]. *核技术*, 2015, **38**(9): 090604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.090604.
- HE Dan, SONG Yingming, ZOU Shuliang, *et al.* Design of shielding device for shielding structure of reactor based on ^{252}Cf source[J]. *Nuclear Techniques*, 2015, **38**(9): 090604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.090604.
- 9 邓景珊, 朱国胜, 周呈方, 等. ^{252}Cf 中子活化核燃料棒 ^{235}U 富集度均匀性检测装置[J]. *原子能科学技术*, 2003, **37**(6): 538–542.
- DENG Jingshan, ZHU Guosheng, ZHOU Chengfang, *et al.* Detection device of ^{235}U enrichment of ^{252}Cf neutron activated nuclear fuel rods[J]. *Anotechnology of Atomic Energy*, 2003, **37**(6): 538–542.
- 10 刘文杰. 萃取色层法分离钷-252 和钷-248 的研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2001.
- LIU Wenjie. Study on the extraction chromatography ^{252}Cf and ^{248}Cm [D]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2001.
- 11 李星洪. 辐射防护基础[M]. 北京: 原子能出版社, 1982: 176–183.
- LI Xinghong. Radiation protection foundation[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1982: 176–183.
- 12 ICRP 2002. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection reference values[R]. ICRP Publication 89, ICRP 32(3–4).
- 13 张殿波, 荣荣, 王旭东, 等. 宫颈癌中子刀 (^{252}Cf) 放射治疗前后 MRI 检查的临床价值[J]. *中国 CT 和 MRT 杂志*, 2009, **7**(5): 61–63.
- ZHANG Dianbo, RONG Yong, WANG Xudong, *et al.* Clinical value of MRI examination before and after radiotherapy for cervical neonate knife[J]. *China CT and MRT Magazine*, 2009, **7**(5): 61–63.
- 14 张丹枫, 赵兰才. 辐射防护技术与管理[M]. 南宁: 广西壮族出版社, 2003: 30–34.
- ZHANG Danfeng, ZHAO Lancai. Radiation protection technology and management[M]. Nanning: Guangxi Zhuang Publishing House, 2003: 30–34.
- 15 ICRP 1991. 1990 recommendations of the international commission on radiological protection[R]. ICRP Publication 60, ICRP 21(1–3).
- 16 ICRP 2007. The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection[R]. ICRP Publication 103, ICRP 37(2–4).