

两种放射源活度校准方法对比

杨凤¹, 刘明哲², 王先良¹, 祁国海¹, 康盛伟¹, 汤婷¹, 冯玺¹, 刘敏¹, 黎杰¹

1. 四川省肿瘤医院放疗科, 四川 成都 610041; 2. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059

【摘要】目的:研究两种放射源活度的校准方法的差异,讨论其在临床实践中的适用性。**方法:**通过两种不同的源校准方法测量4颗MicroSelectron Ir-192源。第一种方法用卫生行业标准(WS262-2017)提供的设置(300 V偏压),在井型电离室的最大灵敏位置测量电荷,用WS262-2017中提供的公式计算放射源活度。第二种方法用井型电离室厂家提供的设置(400 V偏压),在井型电离室的最大灵敏位置测量电荷,用厂家提供的公式计算放射源活度。对比两种方法的测量结果与理论计算值的偏差。**结果:**根据WS262-2017和厂家提供的方法测得放射源活度分别为 A_w 和 A_p , A_w 与 A_p 之间的最小偏差为0.64%,最大偏差为-3.03%;与理论计算值 A_T 相比, A_w 与 A_T 之间的最小偏差为-0.21%,最大偏差为2.60%; A_p 与 A_T 之间的最小偏差为-0.34%,最大偏差为4.13%。**结论:**根据WS262-2017和PTW方法测得的结果具有较好的一致性。

【关键词】后装近距离;井型电离室;放射源活度校准;铱;剂量计算

【中图分类号】R312;R144.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2020)10-1213-05

Comparison of two kinds of calibration methods for the activity of radioactive sources

YANG Feng¹, LIU Mingzhe², WANG Xianliang¹, QI Guohai¹, KANG Shengwei¹, TANG Ting¹, FENG Xi¹, LIU Min¹, LI Jie¹

1. Department of Radiation Oncology, Sichuan Cancer Hospital, Chengdu 610041, China; 2. College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: Objective To study the differences between two kinds of calibration methods for the activity of radioactive sources, and discuss their applicabilities in clinical practice. **Methods** Four MicroSelectron Ir-192 sources were measured using two different calibration methods. In the first method, the electric charge at the most sensitive position of the well-type ionization chamber was measured at the setting (300 V bias) provided by the industry standard of hygiene (WS262-2017), and the activity of radioactive sources was measured using the formula provided by WS262-2017. In the second method, the electric charge at the most sensitive position of the well-type ionization chamber was measured at 400 V bias which was the setting provided by the manufacturer of the well-type ionization chamber, and the activity of radioactive sources was measured using the formula provided by the manufacturer. The deviation between the measured results and the theoretically calculated values was compared. **Results** According to the methods separately provided by WS262-2017 and the manufacturer, the activity of radioactive sources was A_w and A_p , respectively. The minimum deviation between A_w and A_p was 0.64%, and the maximum deviation was -3.03%. The minimum and maximum deviations between A_w and the theoretically calculated result A_T was -0.21% and 2.60%, respectively; and the minimum and maximum deviations between A_p and A_T was -0.34% and 4.13%, respectively. **Conclusion** The results measured by the methods provided by WS262-2017 and the manufacturer are in good agreement.

Keywords: afterloading; well-type chamber; radioactive source activity calibration; Ir-192; dose calculation

前言

近距离放射治疗具有局部剂量高、周围剂量迅

速跌落的特点,可以在给予靶区高剂量的同时很好地保护周围正常组织^[1]。后装治疗机的出现很好地减少了医护人员职业照射剂量,使得近距离放射治疗得以广泛应用^[2-3]。在过去20年,高剂量率后装治疗已经是癌症治疗的重要手段,广泛应用于宫颈癌和其他癌症^[4-7]。

高剂量率后装治疗机通常配备Ir-192微型源,源的出厂活度一般约为10 Ci(参考空气比释动能率约为 $1.133\ 7\times 10^5\ \text{Gy}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)^[8]。为避免源的衰变导致治

【收稿日期】2020-03-11

【基金项目】成都市重点研发支撑计划(2019-YF09-00095-SN);国家重点研发计划(2017YFC0113100)

【作者简介】杨凤,实习研究员,研究方向:核信息获取、医学物理, E-mail: 366890836@qq.com

【通信作者】黎杰,研究员,研究方向:医学物理, E-mail: jie.li@yeah.net

疗时间延长,每年需更换3~4次Ir-192源。每次将新更换的Ir-192源用于临床之前,必须对源进行活度校准。放射源活度的校准是后装治疗质量保证的重要组成部分。本文分析井型电离室厂家提供的源活度校准方法(以下简称PTW方法)和卫生行业标准WS262-2017提供的源活度校准方法(以下简称WS262-2017方法)的差异,比较两种校准方法的准确度,以确定在临床实践中的适用性。

1 材料与方法

1.1 放射源参数

本文研究的放射源为核通公司的Ir-192源,放射源有效直径为0.065 cm,长度为0.36 cm,包壳壁厚0.012 5 cm^[9]。本文测量了4颗放射源,初始活度分别为10.87、10.81、11.18、10.74 Ci。

1.2 理论值计算

在近距离放射治疗中使用的放射源通常是密封源,由于源周围密封材料对源周围剂量的吸收与衰减,因此通常使用显活度来表征裸源的活度^[10]。根据Ir-192源厂家提供的初始活度与其半衰期计算源的当前活度:

$$A_T = A_0 e^{-\lambda(T_1 - T_0)} \quad (1)$$

其中, A_T 为放射源当前活度, A_0 为放射源初始活度, λ 为衰变常数, $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$, $T_{1/2}$ 为Ir-192源半衰期,73.83 d^[11]; T_0 为出厂时间, T_1 为当前时间。

1.3 确定最大灵敏位置

将井型电离室(PTW, TW33004)置于房间中央,距离墙面和地面1 m以上。将施源器置于井型电离室的腔室中,将井型电离室连接到静电计(PTW, UNIDOS)。测量前,井型电离室预热10 min,施加400 V偏压;源最小步长间隔为0.25 cm,源在每个点驻留时间均为10 s,通过在腔室的敏感区域中移动源来确定最大灵敏位置。

1.4 WS262-2017方法

施加300 V偏压,源驻留时间为60 s,在最大灵敏位置记录静电计读数。WS262-2017提供式(2)计算源活度:

$$A_w = \frac{(M/t) \times N_E \times N_{SK} \times A_{ion} \times C_{TP}}{F} \quad (2)$$

其中, M 是静电计读数,单位为nC, t 为源驻留时间,单位为s; N_E 是静电计刻度系数,本文所用静电计与井型电离室一起校准,因此静电计刻度系数为1; N_{SK} 是Ir-192空气比释动能刻度因子,刻度因子为 $9.29 \times 10^5 \text{ Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{A}^{-1}$ 。 C_{TP} 是环境中气温气压校正因子;参考

标准温度为22℃,标准大气压101.3 kPa。 F 为Ir-192源空气比释动能强度与源活度转换系数,WS262-2017提供的值为 $4.034 \times 10^3 \text{ Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{Ci}^{-1}$ 。

A_{ion} 是电离电荷复合率因子,计算公式由式(3)给出:

$$A_{ion} = \frac{4}{3} - \frac{Q}{3Q_{1/2}} \quad (3)$$

其中, Q 为在全压下静电计读数, $Q_{1/2}$ 为在半压下静电计读数。WS262-2017方法使用的 A_{ion} 因子记为 $A_{ion,W}$ 。考虑到正负电压可能对 Q 有一定的影响,本文还对+300、-300、+400、-400 V偏压的 A_{ion} 进行了测量。

1.5 PTW方法

施加400 V偏压,源驻留时间为10 s,在最大灵敏位置记录剂量计读数。PTW方法计算放射源活度公式由式(4)给出:

$$A_p = \frac{(M/t) \times N_{SK} \times P_{ion} \times C_{TP}}{F} \quad (4)$$

PTW方法中所使用 C_{TP} 因子、 N_{SK} 因子与WS262-2017方法中相同。PTW方法中提供的 F 值为 $4.07 \times 10^3 \text{ Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{Ci}^{-1}$ 。PTW方法电离电荷复合率因子分别记为 $A_{ion,P}$,离子收集效率记为 $P_{ion,P}$, $P_{ion,P}$ 是 $A_{ion,P}$ 的倒数。

1.6 偏差计算

1.6.1 电离电荷复合率因子与离子收集效率因子的偏差 本文中,WS262-2017方法中使用的电离电荷复合率校正因子记为 $A_{ion,W}$,PTW方法使用的电离电荷复合率校正因子记为 $A_{ion,P}$,离子收集效率记为 $P_{ion,P}$ 。 $A_{ion,W}$ 与 $P_{ion,P}$ 之间的偏差记为 $DEV_{A_{ion,W},P_{ion,P}}$,计算公式由式(5)给出:

$$DEV_{A_{ion,W},P_{ion,P}} = \frac{(A_{ion,W} - P_{ion,P})}{P_{ion,P}} \times 100\% \quad (5)$$

1.6.2 放射源活度的偏差 本文中,通过放射源厂家提供的初始活度 A_0 和半衰期计算的活度记为 A_T ,使用WS262-2017方法和PTW方法测量所得放射源活度,分别记为 A_W 、 A_P 。其中 A_W 、 A_P 与理论计算值 A_T 之间的偏差记为 $DEV_{X,Y}(X, Y \in (A_T, A_W, A_P))$,偏差计算公式由式(6)给出:

$$DEV_{X,Y} = \frac{(X - Y)}{Y} \times 100\% \quad (6)$$

2 结果

2.1 最大灵敏位置

本文一共测量了4颗源,随机选取其中3颗不同活度的放射源来寻找井型电离室的最大灵敏位置。井型电离室的最大灵敏位置约在腔室底部上方3.25 cm,具体测量结果见图1。

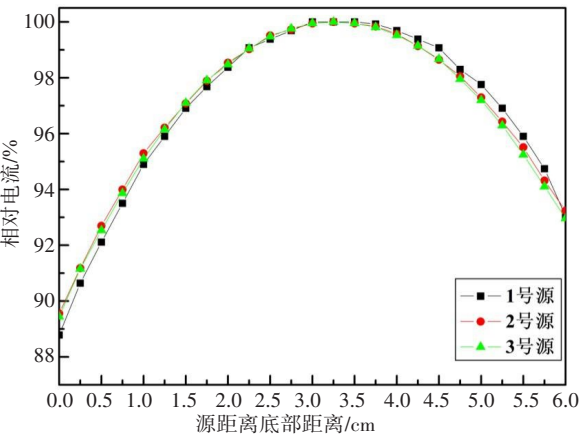


图1 相对电流随放射源距底部距离变化图

Fig.1 Relative currents changing with the distance of the radioactive source from the bottom

2.2 电离电荷复合率因子

根据PTW方法说明,在偏压>300 V, $A_{ion}>0.996$ 时, P_{ion} 取1。本文实验中在偏压>300 V时,计算所得的 $A_{ion,P}$ 因子的值均>0.996时,因此 $P_{ion,P}$ 均取1。 $A_{ion,W}$ 与 $P_{ion,P}$ 之间的偏差见图2,最大偏差为0.15%。不同偏压下, $A_{ion,W}$ 与 $A_{ion,P}$ 的值见图3,最大偏差为0.23%。

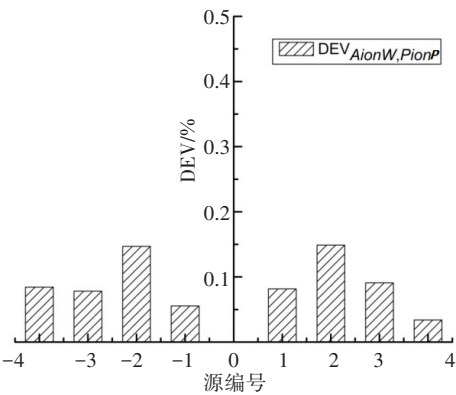


图2 $A_{ion,W}$ 与 $P_{ion,P}$ 的偏差

Fig.2 Deviations between $A_{ion,W}$ and $P_{ion,P}$

注:横坐标的+、-代表对井型电离室施加的偏压极性

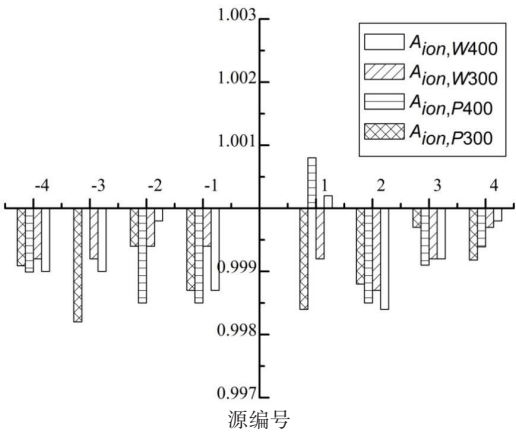


图3 $A_{ion,W}$ 与 $A_{ion,P}$ 的值

Fig.3 $A_{ion,W}$ values and $A_{ion,P}$ values

2.3 放射源活度

根据WS262-2017方法和PTW方法测量所得放射源活度分别记为 A_w 、 A_p ,理论计算值为 A_T ,本文测量了4颗不同活度的源,结果见表1。 A_w 与 A_p 之间最大偏差为-3.03%; A_w 与 A_T 之间最大偏差为2.6%; A_p 与 A_T 之间最大偏差为4.13%,为了更直观地看出放射源活度偏差,将偏差结果绘制为图4。

本文还计算了同种方法,在相同极性下,偏压引起放射源活度的偏差,结果见图5。WS262-2017方法中,偏压引起的最大偏差为0.18%;PTW方法中,偏压引起的最大偏差为1.05%,其余均<0.3%。

3 讨论

按照ESTRO和卫生行业标准要求,后装机更换放射源后应进行放射源活度校准。AAPM TG-56 (American Association of Physicists in Medicine Task Group)号报告提出,源活度校准偏差不应超过5%^[12]。目前,后装放射源校准的方式可大致分为:井型电离室、指形电离室和在模体中测量^[13-14]。在正确使用工具的前提下,不同源活度校准方法之间只有

表1 放射源活度及偏差

Tab.1 Activities of radioactive sources and deviations

编号	偏压极性	A_w /Ci	A_p /Ci	A_T /Ci	$DEV_{w,p}/\%$	$DEV_{w,T}/\%$	$DEV_{p,T}/\%$
1号源	+	3.391 7	3.354 9	3.321 1	1.096 1	2.124 6	1.017 4
	-	3.407 4	3.378 2	3.321 1	0.862 3	2.597 7	1.720 6
2号源	+	2.802 2	2.859 2	2.779 9	-1.995 0	0.800 6	2.852 6
	-	2.812 4	2.894 7	2.779 9	-2.842 7	1.169 0	4.129 1
3号源	+	5.298 5	5.448 2	5.343 1	-2.748 0	-0.834 7	1.967 3
	-	5.319 2	5.485 2	5.343 1	-3.026 0	-0.446 5	2.660 0
4号源	+	8.236 1	8.165 2	8.253 4	0.868 5	-0.208 6	-1.067 9
	-	8.278 0	8.225 0	8.253 4	0.644 5	0.298 7	-0.343 5

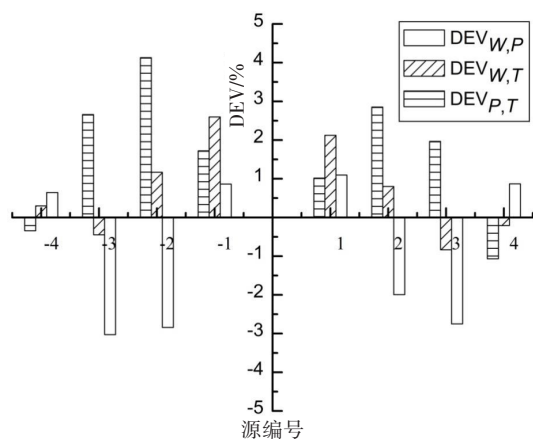


图4 放射源活度偏差

Fig.4 Deviations of the activity of radioactive sources

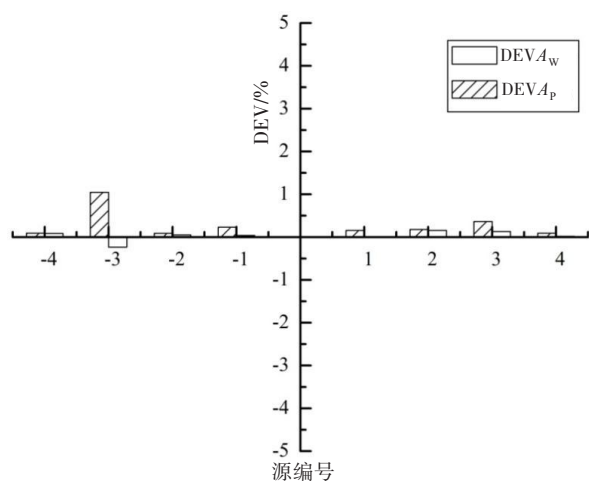


图5 偏压对放射源活度的影响

Fig.5 Effects of bias voltage on the activity of radioactive sources

轻微的差异, Tedgren 等^[15]研究了4种不同的源校准方法, 校准结果之间最大偏差为0.8%, Bondel 等^[13]研究了3种不同的源校准方法, 校准结果之间最大偏差为1%。在所有源活度校准方法中, 井型电离室具有灵敏体积大、长期稳定性好、操作简便等优点, 应用最为广泛。井型电离室厂家和 WS262-2017 提供的源活度校准方法稍有区别, 但本研究显示两种方法的结果具有较好的一致性。

本文根据 WS262-2017 和厂家的方法进行后装放射源活度的测定, 虽然是在相同的环境下, 使用同一井型电离室和静电计进行测量, 结果仍存在一定差异。分析产生偏差的原因有以下几个方面: (1) 不同的偏压影响离子收集效率; WS262-2017 方法中使用 A_{ion} 因子进行源活度的计算, PTW 方法中使用 $P_{\text{ion,P}}$, 测量参数不同, $A_{\text{ion,W}}$ 和 $P_{\text{ion,P}}$ 之间的偏差为0.13%。(2) WS262-2017 方法提供的 F 值 ($4.034 \times 10^3 \text{ Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{Ci}^{-1}$) 与 PTW 方法提供的 F 值 ($4.07 \times 10^3 \text{ Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{Ci}^{-1}$) 有差别, 其偏差为0.91%; 这可能是因为

两种方法推荐的值在计算时采用了不同的截止能量和不同的能量离散值^[16-18]。

本文根据两种方法测得的源活度与理论计算值存在一定偏差, 这可能是因为源活度校准过程中所使用的仪器本身存在一定的不确定度, 所测源的活度大小对计算过程中使用的因子也有一定影响。对于 PTW TW33004 型井型电离室而言, N_{SK} 因子与源活度有关, 源活度越低, N_{SK} 因子越低, 不确定为1.3% ($k=2$)^[19]。本文所测的4颗源的理论计算活度分别为3.321 1、2.779 9、5.343 1、8.253 4 Ci, 因此计算结果存在一定偏差。此外, 对 PTW TW33002 井型电离室的 N_{SK} 因子而言, 温度气压会直接影响空气密度, 在偏压为+300 V 时, C_{TP} 因子会对 N_{SK} 因子产生1.06%的偏差^[20], 本文使用的 PTW TW33004 井型电离室, PTW Freiburg 实验室在校准时已考虑 C_{TP} 因子, 并给出在+400 V 电压下 N_{SK} 因子的不确定度为 $\pm 3\%$ ($k=2$)。此外, 在使用 WS262-2017 方法时需要注意本文所用的 N_{SK} 因子是在 400 V 电压下校准所得。

综上所述, 本文采用两种方法测量了放射源的活度, 总体来说两种方法之间偏差较小, 具有较好的一致性。

【参考文献】

- [1] MATE T P, GOTTESMAN J E, HATTON J, et al. High dose-rate afterloading ¹⁹²Iridium prostate brachytherapy: feasibility report[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 1998, 41(3): 525-533.
- [2] ARONOWITZ J N. Afterloading: the technique that rescued brachytherapy[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2015, 92(3): 479-487.
- [3] QUINN M L, SCHOENFELD I, SERIG D. Remote afterloading brachytherapy: human factors in a partially automated treatment system[C]//IEEE Symposium on Computer-based Medical Systems. IEEE, 2002.
- [4] THANATIP T, KANISA R. Treatment outcomes of high-dose-rate intracavitary brachytherapy for cervical cancer: a comparison of Ir-192 versus Co-60 sources[J]. J Gynecol Oncol, 2018, 29(5): e86.
- [5] DIMOPOULOS J C, PÖTTER R, LANG S, et al. Dose-effect relationship for local control of cervical cancer by magnetic resonance image-guided brachytherapy[J]. Radiother Oncol, 2009, 93(2): 311-315.
- [6] PICKLES T, KEYES M, MORRIS W J, et al. Brachytherapy or conformal external radiotherapy for prostate cancer: a single-institution matched-pair analysis[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2010, 76(1): 43-49.
- [7] KOVÁCS G, MARTINEZ-MONGE R, BUDRUKAR A, et al. GEC-ESTRO ACROP recommendations for head & neck brachytherapy in squamous cell carcinomas: 1st update-Improvement by cross sectional imaging based treatment planning and stepping source technology[J]. Radiother Oncol, 2017, 122(2): 248-254.
- [8] CHANG L, HO S Y, LEE T F, et al. Ir-192 Calibration in air with farmer chamber for HDR brachytherapy[J]. J Med Biol Eng, 2016, 36(2): 145-152.
- [9] 王先良, 王培, 袁珂, 等. 施源器材料和厚度对近距离放射治疗剂量

- 的影响[J]. 肿瘤预防与治疗, 2015, 28(2): 67-70.
- WANG X L, WANG P, YUAN K, et al. The influence of the material and thickness of the applicator on the dose of brachytherapy [J]. Journal of Cancer Control and Treatment, 2015, 28(2): 67-70.
- [10] KHAN F M, GIBBONS J P. Khan's the physics of radiation therapy [M]. Lippincott Williams & Wilkins, 2014.
- [11] BIDMEAD A M, SANDER T, LOCKS S M, et al. The IPEM code of practice for determination of the reference air kerma rate for HDR ^{192}Ir brachytherapy sources based on the NPL air kerma standard[J]. Phys Med Biol, 2010, 55(11): 3145-3159.
- [12] NATH R, ANDERSON L L, MELI J A, et al. Code of practice for brachytherapy physics: report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 56[J]. Med Phys, 1997, 24(10): 1557-1598.
- [13] BONDEL S, RAVIKUMAR M, SUPE S S, et al. Calibration of ^{192}Ir high dose rate brachytherapy source using different calibration procedures[J]. Rep Pract Oncol Radiother, 2014, 19(3): 151-156.
- [14] AALBERS A H, BROUWER W F, MEERTENS H, et al. 5 NCS-report: recommendations for the measurement of the strength of iridium-192 high dose rate sources[J]. Radiother Oncol, 1994, 31 (Suppl 1): S23.
- [15] TEDGREN C, BJERKE H, GRINDBORG J E, et al. Comparison of high-dose-rate ^{192}Ir source strength measurements using equipment with traceability to different standards[J]. Brachytherapy, 2014, 13(4): 420-423.
- [16] BORG J, ROGERS D W. Monte Carlo calculations of photon spectra in air from ^{192}Ir sources [R]. Canada: National Research Council Report PIRS-629r, 1999: 11-12.
- [17] THOMASON C. Dosimetry of Iridium-192 and Cesium-137 seed sources[R]. Madison: Wisconsin University, 1989.
- [18] BÜERMANN L, KRAMER H M, SCHRADER H, et al. Activity determination of ^{192}Ir solid sources by ionization chamber measurements using calculated corrections for self-absorption[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res, 1994, 339(1-2): 369-376.
- [19] GUILHEM D, AIMÉ O, FRANK D. Some unexpected behaviours of PTW/Nucletron well-type ionization chambers[J]. Phys Med Biol, 2008, 53(14): 269-275.
- [20] DEMPSEY C. Lessons learned from a HDR brachytherapy well ionisation chamber calibration error[J]. Australas Phys Eng Sci Med, 2011, 34(4): 529-533.

(编辑:陈丽霞)