

利用井型电离室测量后装放射源 ^{192}Ir 活度的方法及放射源活度的验证

罗斌^{1,2}, 李贤富^{1,2}, 郭飞², 曹璐², 许鹏², 谢力², 阳华东²

1. 医学影像四川省重点实验室, 四川省肿瘤学重点学科, 四川南充 637000; 2. 川北医学院附属医院肿瘤科, 四川南充 637000

【摘要】目的:阐述井型电离室测量后装放射源活度的理论基础和具体测量方法, 对所使用的 ^{192}Ir 放射源活度进行验证。**方法:**首先通过井型电离室系统校准因子计算得出电离室电流与 ^{192}Ir 活度之间的换算系数, 然后制定计划寻找 ^{192}Ir 源测量活度的有效驻留点。再利用PTW Unidos E剂量计和PTW SOURCECHECK 4 π 井型电离室测量 ^{192}Ir 照射电离室后产生的电流并转换为放射源活度。连续测量7个月, 测量值与计划系统计算值两组数据进行配对样本 t 检验, 分析两组数据差异。**结果:**在总共14次的测量计算中, 川北医学院附属医院新购进 ^{192}Ir 源活度的测量值与计划系统计算值相对误差均在 $\pm 1\%$ 以内。其最大偏差为0.946%, 符合国标WS 262-2017后装 γ 源近距离治疗质量控制检测规范中源活度稳定性检测 $\pm 5\%$ 内的要求, 达到了AAPM临床应用 ^{192}Ir 源活度标定小于 $\pm 3\%$ 的标准。且两组数据配对样本 t 检验显示, 差异无统计学意义($P=0.665>0.05$)。**结论:**井型电离室能够准确测量 ^{192}Ir 源的活度, 本院所使用的放射源按照理想的半衰期衰变, 放射源杂质少、纯度高。

【关键词】井型电离室; 放射源 ^{192}Ir ; 活度; 验证

【中图分类号】R312; R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2021)04-0416-06

Method of measuring the activity of ^{192}Ir radioactive source for afterloading brachytherapy using well-type ionization chamber and quality assurance of the activity of radioactive source

LUO Bin^{1,2}, LI Xianfu^{1,2}, GUO Fei², CAO Lu², XU Peng², XIE Li², YANG Huadong²

1. Sichuan Key Laboratory of Medical Imaging, Key Disciplines of Oncology in Sichuan Province, Nanchong 637000, China; 2. Department of Oncology, Affiliated Hospital of North Sichuan Medical College, Nanchong 637000, China

Abstract: Objective To describe the theoretical basis and specific method of measuring the activity of radioactive source for afterloading brachytherapy using well-type ionization chamber, and to conduct a verification for the activity of ^{192}Ir radioactive source. **Methods** The conversion coefficient between ionization chamber current and ^{192}Ir source activity was firstly calculated by the calibration factor of well-type ionization chamber system, and then a plan was made to find the effective residence point for the measurement of ^{192}Ir source activity. The current generated by ^{192}Ir source on the effective residence point irradiated on the ionization chamber was measured by PTW Unidos E dosimeter and PTW SOURCECHECK 4 π well-type ionization chamber, and the obtained current was converted into source activity. After 7 months of continuous measurement, paired sample t -test was conducted on the measured data and the calculated data for analyzing the differences between two groups of data. **Results** The relative deviations between the measured data and the calculated data of newly-purchased ^{192}Ir source in Affiliated Hospital of North Sichuan Medical College were all within $\pm 1\%$ in 14 measurements, with a maximum deviation of 0.946%, which met the requirements of the source activity stability test (within $\pm 5\%$) of WS 262-2017 specification for testing of quality control in gamma-ray sources afterloading brachytherapy and reached the standard of ^{192}Ir source activity calibration (within $\pm 3\%$) of AAPM clinical application. Moreover, the results of paired sample t -test showed that there was no significant difference between the measured data and the calculated data ($P=0.665>0.05$). **Conclusion** Well-type ionization chamber can be used to accurately measure ^{192}Ir source activity. The radioactive source used in Affiliated Hospital of North Sichuan Medical College decays according to the ideal half-life, with less impurities and high purity.

Keywords: well-type ionization chamber; ^{192}Ir radioactive source; activity; verification

【收稿日期】2020-11-21

【基金项目】四川省教育厅自然科学重点项目(17ZA0173); 四川卫生计生委项目(19PJ037); 南充市市校合作科研专项(18SXHZ0398)

【作者简介】罗斌, 硕士研究生, 物理师, 主要从事放射物理研究, E-mail: 2283712905@qq.com

【通信作者】李贤富, 教授, 物理师, 加速器工程师, 研究方向: 放射肿瘤学、肿瘤放射治疗物理与肿瘤治疗工程技术学, E-mail: lixianfu13@163.com

前言

在各种妇科恶性肿瘤疾病中,宫颈癌的身影并不少见,以2015年国家癌症中心统计的妇科肿瘤发病构成来看,其占比为6.24%,排名第6^[1]。同时,宫颈癌的发病率也大于卵巢癌和子宫内膜癌,新发病例数已逐渐逼近14万/年的规模^[2-3]。随着越来越多的患者呈现出年轻化、转移化且易复发的特征,且发病比例呈逐年上升的趋势,这严重影响了广大患者的生命健康和生活质量。作为宫颈癌的重要治疗手段,外照射与后装腔内照射的有机结合仍然是大多数放疗中心的首要选择^[4-5]。在CT三维图像引导下的后装近距离治疗技术由于具有更准确的图像信息、更完善的靶区DVH评价机制,提高了疗效,有效降低了膀胱和直肠的副反应,得到了GEC-ESTRO等组织和机构的大力推荐^[6]。而作为后装治疗剂量准确传递的基础,¹⁹²Ir源的活度检测就显得尤为重要^[7]。

PTW Unidos E剂量计和PTW SOURCECHECK 4π井型电离室操作简便、可靠性高,不需额外添加诸如指形电离室、专用定位支架、有机玻璃水箱等装置。它减少了多余的测量环节,能够在各大医院的放疗中心更好地实施¹⁹²Ir源活度验收、标定及检测的操作。本文重点阐述了井型电离室测量¹⁹²Ir源活度的理论基础和实际应用。分析并讨论可能会涉及的误差,提出行之有效的改进方法,确保了后装放射源¹⁹²Ir活度检测的准确性。

1 材料与方法

1.1 理论基础

对于后装腔内照射治疗所使用的¹⁹²Ir源强度表示方法,总的来说有4种,即毫克镭当量 m_{eq} ^[8]、参考照射量率 R_x 、显活度 A_{app} 和空气比释动能强度 S_k 。在国内,大部分的临床科研单位还是习惯使用外观活度或显活度 A_{app} 来定义¹⁹²Ir源活度。 A_{app} 是指同种核素的裸源和密封源在相同位置处产生的照射率相同时,裸源的活度即为该密封源的活度。由电离室法可知^[9-10]:

$$A_{app} = \dot{X}_{d,N} \cdot d^2 \cdot \frac{1}{\Gamma_{\sigma,N}^*} = R_x \cdot \frac{1}{\Gamma_{\sigma,N}^*} \quad (1)$$

其中, $\dot{X}_{d,N}$ 表示核素 N 在距源 d (cm)处的照射量率,单位: $C \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$; $\Gamma_{\sigma,N}^*$ 表示核素 N 的照射量率常数,单位: $R \cdot cm^2 \cdot mCi^{-1} \cdot h^{-1}$ 。在国际制单位(SI)范畴中,AAPM(美国医学物理学家协会)等国际组织则建议使用空气比释动能强度 S_k 来表示近距离放射源的强度,可表述为^[11]:

$$S_k = \dot{K}_{(d)} \cdot d^2 \quad (2)$$

其中, $\dot{K}_{(d)}$ 表示在距离 d 处的空气中测量到的比释动能率经空气衰减和空气源壁散射校正后的自由空间中的比释动能率,单位: $\mu Gy \cdot h^{-1}$ 。 S_k 即为该源中垂线上 d 处的 $\dot{K}_{(d)}$ 与 d^2 的乘积,单位: $\mu Gy \cdot m^2 \cdot h^{-1}$ 。而在近距离使用时,比释动能 S_k 和吸收剂量 D 在数值上相差不到1%。照射量 X 与吸收剂量 D 在电子平衡时的关系可表述为 $D=X \cdot (W/e)$ 。由此可知:

$$S_k = R_x \cdot (W/e) \quad (3)$$

综合式(1)~式(3)可推出:

$$A_{app} = R_x \cdot \frac{1}{\Gamma_{\sigma,N}^*} = \frac{S_k}{(W/e)} \cdot \frac{1}{\Gamma_{\sigma,N}^*} \quad (4)$$

由式(4)可知, A_{app} 可通过 S_k 、空气比释动能率常数 $(W/e) \cdot \Gamma_{\sigma,N}^*$ 求得。而在井型电离室法中, S_k 又与剂量仪读数 M 、参考空气比释动能率校准因子 N_{sk} 及 $K_{T,P}$ 成正比关系^[12],即:

$$S_k = M \cdot K_{T,P} \cdot N_{sk} \cdot A_{ion} \quad (5)$$

$$A_{app} = \frac{M \cdot K_{T,P} \cdot N_{sk} \cdot A_{ion}}{\Gamma_{\sigma,N}^* \cdot (W/e)} \quad (6)$$

$$K_{T,P} = \frac{P_0}{P} \cdot \frac{(273.2 + T)}{(273.2 + T_0)} \quad (7)$$

其中, M 表示剂量仪读数,单位:nA; $K_{T,P}$ 表示温度气压校正系数; N_{sk} 表示参考空气比释动能率校准因子,其值等于参考空气比释动能率标准值与修正到参考环境条件的被校准仪器对源在有效校准点的读数比值。参考该井型电离室的校准证书,取值为 $9.009 \times 10^5 Gy \cdot m^2 \cdot h^{-1} \cdot A^{-1}$; A_{ion} 表示电离电荷复合率校正因子,其值约等于1; W/e 表示在空气中生成一个离子对所消耗的平均电离能,为33.97 J/C。由式(6)可知,参考空气比释动能率校准因子 N_{sk} 和空气比释动能率常数 $(W/e) \cdot \Gamma_{\sigma,N}^*$ 均可查表求得。厂家提供的空气比释动能率常数 $(W/e) \cdot \Gamma_{\sigma,N}^*$ 为 $110 \mu Gy \cdot h^{-1} \cdot GBq^{-1} \cdot m^2$ 。剂量仪默认值: $T_0=20 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $P_0=101.325 \text{ kPa}$ 。只要采集测量现场的温度 T 、气压 P 及剂量仪读数 M 就可算出所用后装放射源在该时刻的活度 A_{app} 。

1.2 实验设备及测量仪器

测量中所使用的后装治疗机为Nucletron核通公司生产的microSelectronV3型高剂量率治疗机,搭载的系统版本为4.3.0.410。其输出的治疗报告中也较为明确地列出了所用¹⁹²Ir源的两种主要的强度表示方法,即显活度 A_{app} (Ci)和空气比释动能强度 S_k ($\mu Gy \cdot m^2 \cdot h^{-1}$),详见图1。剂量计和井型电离室均为PYCHLAU博士有限公司生产的PTW系列产品,型号分别为PTW Unidos E和PTW SOURCECHECK 4π,二者可以做到很好的相互兼容。该井型电离室主要参数详见表1。

Source characteristics			
Source strength	mGy·m ² ·h ⁻¹	CI	Date
At calibration	47.080	11.534	14-11-2019 15:03:00
Current	32.402	7.938	24-12-2019 10:10:51
Delta		31.18 %	39d 19hr 7m 51s

Hospital name: chuan beiDate: 24-12-2019Time: 10:10:51Page 1 of 1

图 1 计划系统源活度计算值

Fig.1 Calculated source activity of planning system

表 1 井型电离室参数

Tab.1 Well-type ionization chamber parameters

型号	PTW SOURCECHECK 4π
主要参数	(1)照射量强度量程:1.7 MBq~8.5 TBq (2)灵敏度:120 pA/MBq(¹⁹² Ir) (3)测量体积:200 cc (4)校准条件:T=20 ℃、P=101.325 kPa



图 2 摆位及参数设置

Fig.2 Positioning and parameter setting

1.3 测量方法及参数设置

参照本文第 1.1 小节中理论基础所述,测量时首先将井型电离室置于后装机前方,距墙面大于 1.5 m、离水平地面 1.0 m 的专用木质支架上。采用标配的金属施源器 1 号管连接后装机 1 号输出通道和井型电离室测量插件对应的接口。在 PTW Unidos E 的参数调整界面上选择 Electronic 模式,量程改到最大的 high 档,提前预热 30 min 并归零校准。后装治疗机房中的 T 、 P 等基础数据均由 DYM3 型空盒气压表和 GJWS-B2 型温湿度表进行采集。具体的摆位操作和参数设置见图 2。

然后根据井型电离室中间预留孔径的长度确定其最大感应电流值 M 的有效测量点。在操作间先编一个测量长度为 15 cm、步进 5 mm、各点驻留时间 10 s 的测试计划 QA₁。出源后通过监控摄像头可记录剂量仪显示的最大电流值,其具体响应位置为距底端约 4.5 cm 处。再由该具体响应位置将测量长度的范围缩小,4.5 cm 处的驻留时间设为 120 s,并保存为测试计划 QA₂。上述两个计划的截图见图 3 和图 4。

Catheter	Dwell pos.	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Weight	diff W	Time [s]	Dwell weight
1	1	-19.9	100.0	-1.4	3.36	0.00	10.00	3.36
1	2	-19.7	95.0	-1.5	3.36	0.00	10.00	3.36
1	3	-19.5	90.0	-1.5	3.36	0.00	10.00	3.36
1	4	-19.3	85.0	-1.5	3.36	0.00	10.00	3.36
1	5	-19.0	80.0	-1.6	3.36	0.00	10.00	3.36
1	6	-18.8	75.0	-1.6	3.36	0.00	10.00	3.36
1	7	-18.6	70.0	-1.6	3.36	0.00	10.00	3.36

图 3 测试计划 QA₁

Fig.3 Test plan QA₁

Catheter	Dwell pos.	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Weight	diff W	Time [s]	Dwell weight
1	17	-18.2	60.0	-1.7	4.46	0.00	10.00	4.46
1	18	-18.1	57.5	-1.7	4.46	0.00	10.00	4.46
1	19	-18.0	55.0	-1.8	53.51	0.00	120.00	53.51
1	20	-17.9	52.5	-1.8	4.46	0.00	10.00	4.46
1	21	-17.8	50.0	-1.8	4.46	0.00	10.00	4.46
1	22	-17.7	47.5	-1.8	4.46	0.00	10.00	4.46
1	23	-17.6	45.0	-1.8	4.46	0.00	10.00	4.46

图 4 测试计划 QA₂

Fig.4 Test plan QA₂

调用测试计划 QA₂,有效点测量时间 120 s 不变,其余驻留点为 10 s。偏压设置为 400 V, M 取 3 次测量的平均值进行记录。将与测量所用井型电离室相对应的空气比释动能强度刻度因子 $N_{sk}=9.009\times$

$10^5\text{ Gy}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{A}^{-1}$ 、该 ¹⁹²Ir 源对应的空气比释动能率常数 $(W/e)\cdot\Gamma_{\sigma,N}^*=110\text{ }\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{GBq}^{-1}\cdot\text{m}^2$ 及现场 T 、 P 值一起代入式(6)中,即可测得 A_{app} 。测量值与计划系统计算值之间的相对误差为:(计算值-测量值)/测量值 $\times 100\%$ 。

1.4 统计学方法

通过 SPSS20.0 统计学软件进行数据分析, 数据进行 Shapiro-Wilk 检验, 符合正态分布的计量资料采用配对样本 *t* 检验; 不符合正态分布的计量资料采用配对样本秩和检验。 *P*<0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

在为期 7 个月的 QA 测量中, 所有步骤均按第 1.3 节中方法严格执行。 14 次的随机测量值与计划系统计算值的相对误差范围均在 ±1% 之内, 离散度为 -0.915%~+0.946%, 全部测量结果的平均偏差为 0.495%。 其结果及趋势图详见表 2 和图 5。 对表 2 中的计算值和测量值进行统计分析, 结果显示二者的差值服从正态分布, 两组数据比较差异没有统计学意义 (*t*=0.443, *P*=0.665)。

表 2 测量值与系统计算值相对误差
Tab.2 Relative error of measured value and calculated value

序号	日期	计算值/Ci	测量值/Ci	相对误差/%
1	05.19	5.650	5.634	0.283
2	05.26	5.290	5.255	0.662
3	06.02	4.953	4.998	-0.915
4	06.09	4.642	4.598	0.946
5	07.14	3.342	3.334	0.246
6	07.24	3.035	3.053	-0.595
7	08.06	2.686	2.707	-0.785
8	08.24	2.269	2.257	0.539
9	09.01	2.111	2.101	0.463
10	09.07	1.990	1.980	0.497
11	10.06	1.517	1.524	-0.452
12	10.27	1.246	1.251	-0.369
13	11.07	1.123	1.125	-0.162
14	11.17	1.022	1.022	0.018

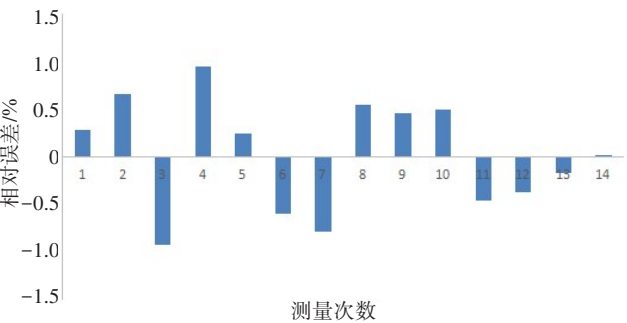


图 5 相对误差趋势图
Fig.5 Relative error trend chart

由表 2 中该 ¹⁹²Ir 源 *A_{app}* 的测量值随时间变化的趋势所制成的拟合曲线详见图 6。若测量时间和活度

值分别用 *x*、*y* 来表示, 则测量值随时间变化的拟合衰变公式为: $y=5.638\ 1e^{-0.009x}$ 。衰变常数 0.009 d⁻¹ 与理论值即 $\lambda=(\ln 2)/74.2\approx 0.009\ 34\ d^{-1}$ 相一致。同时, 按照测量条件的要求, 井型电离室不能直接置于水平地面。随机选取川北医学院附属医院新购进某 ¹⁹²Ir 源的一次质控为例, 系统显示其计算值为 3.842 Ci。在其他条件均相同时, 井型电离室置于木质支架与水平地面各测量 10 次并分别记为 *A_{app1}* 和 *A_{app2}*。两者的相对误差计算公式同表 2, 计算结果详见表 3, *A_{app2}* 与 *A_{app1}* 之间虽然相对误差较小但差异有统计学意义 (*Z*=-2.869, *P*=0.004)。

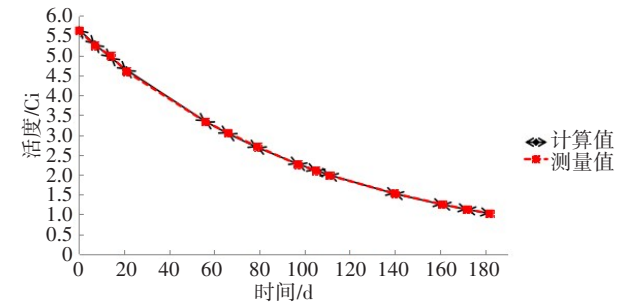


图 6 计算值与测量值衰变趋势对比图
Fig.6 Comparison of the decay trend of calculated values and measured values

表 3 *A_{app1}* 与 *A_{app2}* 相对误差
Tab.3 Relative deviation of *A_{app1}* and *A_{app2}*

序号	<i>A_{app1}</i> /Ci	<i>A_{app2}</i> /Ci	相对误差/%
1	3.813	3.823	0.262
2	3.811	3.823	0.315
3	3.811	3.823	0.315
4	3.811	3.823	0.315
5	3.811	3.823	0.315
6	3.811	3.823	0.315
7	3.816	3.820	0.105
8	3.811	3.823	0.315
9	3.809	3.825	0.420
10	3.809	3.820	0.289

3 讨论

由表 2 数据可知, 本文的测量结果与计划系统计算值之间误差较小, 符合国标 WS262-2017 中 ±5% 以及美国医学物理学会 AAPM-TG43 及 IAEA1274 号报告中临床应用 ±3% 的限值标准^[13-16]。将表 2 中测量值进行指数拟合, 所得指数衰变公式中的衰变常数 λ 为 0.009 d⁻¹。查表可知, ¹⁹²Ir 的 *T_{1/2}* 为 74.2 d, 由 $\lambda=\ln 2/T_{1/2}$ 可推出标准的 λ 为 0.009 d⁻¹。这表明测量值与 ¹⁹²Ir 源的放射物理特性也吻合, 说明其放射性核纯

度高,杂质较少^[17]。

再由表3可知, A_{app2} 与 A_{app1} 之间的相对误差均为正值, A_{app2} 较 A_{app1} 偏大,即井型电离室若直接置于水平地面,则会因为地面建筑材料散射影响使得测量值偏大。所以QA测量时不能贪图简便,需采用支架让电离室远离地面,减少散射影响,确保测量精度。

此外,在运用PTW设备验证¹⁹²Ir源活度的过程中,质控物理师要想达到较好的QA精度,除了要做好扎实的理论储备和工作铺垫,还要从以下的几点出发尽量减少误差的出现:(1)对于¹⁹²Ir源活度验证所涉及到的几种常见强度表示方法如 A_{app} (Ci)、 S_k ($\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$)等要加以联系和区分^[18]。后装源生产厂家不同,所采用的表示方法及单位也会有所变化,视具体情况可用式(5)、式(6)进行转换。确保在换源或治疗机大修之后的活度标定能够正常进行;(2)要仔细检查所用PTW设备的校准证书。若 T 、 P 等基础数据没有按照标准实验室条件($T_0=20\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $P_0=101.325\text{ kPa}$)校准,则需要按照式(8)计算温度气压校正系数^[19]:

$$K_{T,P} = \frac{P_1}{P} \cdot \frac{(273.2 + T)}{(273.2 + T_1)} \quad (8)$$

式中, P_1 表示电离室在国家实验室校准时的气压($\neq 101.325\text{ kPa}$); T_1 表示电离室在国家实验室校准时温度($\neq 20\text{ }^\circ\text{C}$); P 表示测量现场大气压; T 表示测量现场温度。即当 $T>T_1$ 时,测量现场空气密度值较低,需乘以 $(273.2+T)/(273.2+T_1)$;当 $P>P_1$ 时,测量现场空气密度值较高,需乘以 P_1/P ,反之亦然;(3)不同的井型电离室、放射源所对应的 N_{sk} 和 $(W/e)\cdot\Gamma_{\sigma,N}^*$ 不同。 N_{sk} 要根据每年度的校准证书来进行设置, $(W/e)\cdot\Gamma_{\sigma,N}^*$ 则需要参考后装源生产厂家所出具的检验报告,不能直接使用常见标准值113或111 $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{GBq}^{-1}\cdot\text{m}^2$ 来进行计算。

PTW Unidos E剂量计和PTW SOURCECHECK 4 π 井型电离室能够在大型医院放疗中心准确检测放射源活度,而且操作简便,不需要水箱等其他外围设备支持,较指形电离室法更为实用。这与近年来的研究结果较为相符^[20-23]。表2中每次的测量值按照源的衰变规律衰减,与计划系统计算值非常接近,说明测量准确;所有的测量值与计算值的衰变趋势趋于一致,说明本院所用放射源是按照标准衰变常数($\lambda=\ln 2/T_{1/2}$, $T_{1/2}=74.2\text{d}$)衰变,即该源含杂质少,纯度高,能满足精准治疗的要求。由表3数据可知,当井型电离室置于地面时,由于地面建筑材料散射导致测量值增加,所以本院使用高约1 m的木质支架平台。井型电离室置于平台,减少了地面散射对测量值的影响以精确测量放射源的活度。同时应注意电

离室四周都应远离杂物、墙壁等以减少散射,提高测量精度。表2和表3中数据所反映的衰变趋势和散射影响研究在刘宝喜实验结果中也有较为充分的体现^[24]。在“精准放疗”时代,准确检测、刻度¹⁹²Ir源的活度是精确设计治疗计划、精准治疗的前提。我们必须注意放射源活度测量的每一个环节、每一个参数。

综上所述,井型电离室能够准确地测量¹⁹²Ir源的活度,本院所使用的放射源按照理想的半衰期衰变,放射源杂质少、纯度高。

【参考文献】

- [1] 郑荣寿,孙可欣,张思维,等. 2015年中国恶性肿瘤流行情况分析[J]. 中华肿瘤杂志, 2019, 41(1): 19-28.
ZHENG R S, SUN K X, ZHANG S W, et al. Report of cancer epidemiology in China, 2015[J]. Chinese Journal of Oncology, 2019, 41(1): 19-28.
- [2] 陈慧,周思园,孙振球. 常见妇科三大恶性肿瘤的流行及疾病负担研究现状[J]. 中国现代医学杂志, 2015, 25(6): 108-112.
CHEN H, ZHOU S Y, SUN Z Q. Research status of the epidemiology and disease burden of three common gynecological malignant tumors [J]. China Journal of Modern Medicine, 2015, 25(6): 108-112.
- [3] 周晖,林仲秋. 子宫颈癌治疗进展和争议问题[J]. 实用肿瘤杂志, 2016, 31(6): 494-496.
ZHOU H, LIN Z Q. Cervical cancer treatment progress and controversial issues [J]. Journal of Practical Oncology, 2016, 31(6): 494-496.
- [4] 林承光,丁生苒,张德康,等. 肿瘤放射治疗技术操作规范[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2019: 192-193.
LIN C G, DING S G, ZHANG D K, et al. Tumor radiotherapy technical operation specification [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2019: 192-193.
- [5] 彭清河,彭应林,朱金汉,等. 图像配准方式对宫颈癌后装自适应放射治疗图像配准精度的影响[J]. 南方医科大学学报, 2018, 38(11): 1344-1348.
PENG Q H, PENG Y L, ZHU J H, et al. Accuracy of different image registration methods in image-guided adaptive brachytherapy for cervical cancer [J]. Journal of Southern Medical University, 2018, 38 (11): 1344-1348.
- [6] 杜霄勤,安菊生,吴令英,等. 宫颈癌近距离放射治疗新进展[J]. 癌症进展, 2015, 13(2): 152-158.
DU X M, AN J S, WU L Y, et al. Recent advances in brachytherapy for cervical cancer [J]. Oncology Progress, 2015, 13(2): 152-158.
- [7] 刘宝喜,全红,邱杰,等. 医用¹⁹²Ir放射源标称活度准确性的研究[J]. 中国医学装备, 2017, 14(12): 46-48.
LIU B X, QUAN H, QIU J, et al. The study of the accuracies about the noted activity values of the medical radioactive sources ¹⁹²Ir [J]. China Medical Equipment, 2017, 14(12): 46-48.
- [8] 谷铤之,殷蔚伯,刘泰福,等. 肿瘤放射治疗学[M]. 北京: 北京医科大学、中国协和医科大学联合出版社, 1993: 140-144.
GU X Z, YIN W B, LIU T F, et al. Radiation oncology [M]. Beijing: Joint Press of Beijing Medical University and Chinese Union Medical University, 1993: 140-144.
- [9] 胡逸民. 肿瘤放射物理学[M]. 北京: 原子能出版社, 1999: 43-45.
HU Y M. Radiation oncology physics [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1999: 43-45.
- [10] 冯宁远,谢虎臣,史荣,等. 实用放射治疗物理学[M]. 北京: 北京医科大学、中国协和医科大学联合出版社, 1998: 252-253.
FENG N Y, XIE H C, SHI R, et al. Practical radiotherapy physics [M]. Beijing: Joint Press of Beijing Medical University and Chinese Union Medical University, 1998: 252-253.
- [11] 托德·鲍里克基,丹尼尔·J. 斯塔克贝格,乔治·斯塔克斯查尔·亨迪放射治疗物理学[M]. 天津: 天津科技翻译出版有限公司, 2018: 207.
PAWLICKI T, SCANDERBEG D J, STARKSCHALL G. Hendee's

- radiation therapy physics[M]. Tianjin: Tianjin Science & Technology Translation & Publishing Company Limited, 2018: 207.
- [12] 中华人民共和国卫生行业标准. WS 262-2017 后装 γ 源近距离治疗质量控制检测规范[S]. 北京: 人民卫生出版社, 2017: 2-3.
Health Industry Standard of People's Republic of China. WS 262-2017 Specification for testing of quality control in γ -ray sources afterloading brachytherapy[S]. Beijing: People's Health Publishing House, 2017: 2-3.
- [13] 祁振宇, 邓小武, 黄劲敏, 等. 高剂量率后装近距离治疗 ^{192}Ir 铱放射源的校准[J]. 中国肿瘤, 2008, 17(8): 694-697.
QI Z Y, DENG X W, HUANG S M, et al. Calibration of the ^{192}Ir source for high dose rate brachytherapy[J]. China Cancer, 2008, 17(8): 694-697.
- [14] 陈济鸿. 近距离后装机 ^{192}Ir 源外观活度质量控制[J]. 医疗装备, 2019, 32(23): 19-20.
CHEN J H. Quality control of afterloading brachytherapy ^{192}Ir source appearance activity[J]. Medical Equipment, 2019, 32(23): 19-20.
- [15] 林珠, 陈秀如, 张武哲. ^{192}Ir 后装治疗机辐射防护及性能检测的评价[J]. 中国医学装备, 2015, 12(6): 31-33.
LIN Z, CHEN X R, ZHANG W Z. Evaluation on radiation protection and performance test for ^{192}Ir brachytherapy apparatus [J]. China Medical Equipment, 2015, 12(6): 31-33.
- [16] 冯仲苏, 徐晓, 刘芬. ^{192}Ir 高剂量率后装治疗剂量准确性的质量控制[J]. 国际放射医学核医学杂志, 2008, 32(6): 376-378.
FENG Z S, XU X, LIU F. Quality control of ^{192}Ir high dose rate afterloading brachytherapy dose veracity[J]. International Journal of Radiation Medicine and Nuclear Medicine, 2008, 32(6): 376-378.
- [17] 吴治华, 赵国庆, 陆福全, 等. 原子核物理实验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1997: 455.
WU Z H, ZHAO G Q, LU F Q, et al. Experimental methods of nuclear physics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1997: 455.
- [18] 张庆钊, 曹小龙, 陈梅芬, 等. γ 射线后装治疗辐射源的质量保证方法[J]. 中国医疗设备, 2012, 27(3): 33-35.
ZHANG Q Z, CAO X L, CHEN M F, et al. Methods on quality assurance of γ -ray source of afterloading[J]. China Medical Devices, 2012, 27(3): 33-35.
- [19] 罗斌, 李贤富, 曹璐, 等. 温度、气压与剂量仪设置值不一致时校准医用直线加速器方法[J]. 中国医疗设备, 2019, 34(1): 34-36.
LUO B, LI X F, CAO L, et al. Methods for calibrating medical linear accelerator when temperature and atmospheric pressure are inconsistent with setting values of dosimeter[J]. China Medical Devices, 2019, 34(1): 34-36.
- [20] TEDGREN A 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.
- [21] 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.
- [22] 于浪. 宫颈癌腔内近距离治疗质控体系的建立与研究[D]. 北京: 北京协和医学院, 2018: 45-46.
YU L. The research and implementation of cervical intracavitary brachytherapy quality assurance procedure[D]. Beijing: Peking Union Medical College, 2018: 45-46.
- [23] 杨凤. 后装放射治疗的质量控制与保证技术研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019: 34-35.
YANG F. Research on quality control and assurance technology of afterloading radiation therapy[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019: 34-35.
- [24] 刘宝喜. 高剂量率 ^{192}Ir 放射源标称活度准确性的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018: 12-14.
LIU B X. The study on the accuracy of nominal activity of ^{192}Ir HDR brachytherapy Radiation source[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018: 12-14.

(编辑: 陈丽霞)