

# 统计过程控制方法在后装<sup>192</sup>Ir放射源空气比释动能强度验证中的应用

罗斌<sup>1,2</sup>, 李贤富<sup>1,2</sup>, 曹璐<sup>2</sup>, 阳华东<sup>2</sup>, 许鹏<sup>2</sup>, 郭飞<sup>2</sup>, 谢力<sup>2</sup>

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:**运用统计过程控制(SPC)方法分析研究后装<sup>192</sup>Ir放射源空气比释动能强度( $S_k$ )验证的精准性及稳定性。**方法:**首先使用PTW SOURCECHECK 4 $\pi$ 井型电离室按照国标WS 262-2017的要求对<sup>192</sup>Ir放射源 $S_k$ 进行质控验证。再通过Minitab软件对测量值和计划系统计算值之间的偏差绘制均值-极差图,计算相应的上下控制线UCL、LCL及其过程能力指数 $C_p$ 、 $C_{pk}$ ,并判断该方法的精准稳定性。**结果:**25组偏差值的分布为-1.584%~0.915%,达到了WS 262-2017中小于 $\pm 5\%$ 、AAPM-TG43中小于 $\pm 3\%$ 的限值要求。各分组的均值都处于-1.518%~0.973%的上下控制线范围内, $C_p$ 、 $C_{pk}$ 取值分别为1.66、1.51,整个测量过程处于较稳定的控制水平内。**结论:**SPC方法能够对<sup>192</sup>Ir放射源 $S_k$ 的质控验证结果即偏差值进行较好的监测与评估,发现其中的异常点,确保了后装治疗中剂量传递的准确性。

**【关键词】**统计过程控制方法;后装;<sup>192</sup>Ir;空气比释动能强度;过程能力指数

**【中图分类号】**R811.1;TH71

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2023)01-0019-05

## Application of statistical process control method in verification of air-kerma strength of <sup>192</sup>Ir brachytherapy source

LUO Bin<sup>1,2</sup>, LI Xianfu<sup>1,2</sup>, CAO Lu<sup>2</sup>, YANG Huadong<sup>2</sup>, XU Peng<sup>2</sup>, GUO Fei<sup>2</sup>, XIE Li<sup>2</sup>

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 analyze the accuracy and stability of statistical process control (SPC) method in the verification of the air-kerma strength ( $S_k$ ) of <sup>192</sup>Ir brachytherapy source. **Methods** After completing the quality control verification of <sup>192</sup>Ir radioactive source  $S_k$  with PTW SOURCECHECK 4 $\pi$  well-type ionization chamber according to the requirements of national standard WS 262-2017, Minitab software was used to draw the mean value-range chart for the deviation between the measured value and the calculated value of the planning system. The corresponding upper and lower control lines and process capability indexes ( $C_p$ ,  $C_{pk}$ ) were calculated for evaluating and the accuracy and stability of SPC method. **Results** The distribution of the deviation values in the 25 groups ranged from -1.584% to 0.915%, reaching the limit requirements of less than  $\pm 5\%$  in WS 262-2017 and less than  $\pm 3\%$  in AAPM-TG43. The mean values of each group were within the range of upper and lower control lines (from -1.518% to 0.973%).  $C_p$  and  $C_{pk}$  were 1.66 and 1.51, respectively. The whole measurement process was at a relatively stable control level. **Conclusion** SPC method can better monitor and evaluate the quality control verification results (deviation values) of <sup>192</sup>Ir brachytherapy source  $S_k$ , and find out the abnormal points, thereby ensuring the accuracy of dose delivery in brachytherapy.

**Keywords:** statistical process control method; brachytherapy; <sup>192</sup>Ir; air-kerma strength; process capability index

**【收稿日期】**2022-06-26

**【基金项目】**四川卫生计生委项目(19PJ037);川北医学院附属医院科研项目(2022ZD004)

**【作者简介】**罗斌,硕士,物理师,主要从事放射物理工作, 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, E-mail: lixianfu13@163.com

## 前言

高剂量率后装治疗由于其独特的剂量学优势,能够在给予靶区高量的同时较好地保护临近的危及器官(Organ at Risk, OAR),降低毒副反应发生几率,提高病患生活质量。且伴随着影像处理技术等学科的迅猛发展,其应用范围也逐步从宫颈癌扩展到了前列腺癌、直肠癌及食管癌等其他病种<sup>[1-2]</sup>。

所以,为保证治疗过程中剂量传递的精准性,对常用的<sup>192</sup>Ir放射源空气比释动能强度( $S_k$ )执行严格的质量保证(QA)验证就显得十分重要<sup>[3-4]</sup>。但就近年来的研究趋势而言,大多数文献所报道的内容只局限于对测量值和计划系统计算值之间的偏差做简单比较<sup>[5-6]</sup>。本研究尝试从精准性和稳定性两方面着手,引入统计过程控制(SPC)方法和Minitab软件对偏差值进行处理。通过SPC理论来定义计算其所特有的控制界限(上控制线UCL、下控制线LCL),再从过程能力指数 $C_p$ 、 $C_{pk}$ 的角度出发对所得结果进行分析,严格把控验证过程中的质量控制水平并最终得出判定结果<sup>[7]</sup>。

# 1 材料与方法

## 1.1 理论基础

根据美国医学物理学会(AAPM)的建议,<sup>192</sup>Ir放射源强度现多采用空气比释动能强度 $S_k$ 来表示而非国内常用的显活度 $A_{app}$ <sup>[8]</sup>。而在后装 $\gamma$ 源近距离治疗质量控制检测规范(WS 262-2017)中, $S_k$ 的测量通常可以由下式来确定:

$$S_k = M \cdot K_{T,P} \cdot N_{sk} \cdot A_{ion} \tag{1}$$

$$K_{T,P} = \frac{P_0}{P} \cdot \frac{(273.2 + T)}{(273.2 + T_0)} \tag{2}$$

$$A_{ion} = \frac{4}{3} - \frac{1}{3} \cdot \frac{Q_1}{Q_2} \tag{3}$$

其中, $M$ 为剂量仪对<sup>192</sup>Ir放射源最大响应电流值的3次读数平均值,单位:nA; $K_{T,P}$ 代表测量环境温度、气压校正因子; $N_{sk}$ 代表空气比释动能强度刻度因子,由本年度检定证书可知为 $9.009 \times 10^5 \text{ Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{A}^{-1}$ ;  $A_{ion}$ 代表电离电荷复合率校正因子; $Q_1$ 代表全高压400 V时响应位置处剂量仪读数平均值,单位:nA; $Q_2$ 代表半高压200 V时响应位置处剂量仪读数平均值,单位:nA。由式(1)~式(3)可知,只要采集测量环境中的温度 $T$ 、气压 $P$ 及剂量仪读数均值 $M$ 、 $Q_1$ 、 $Q_2$ 就可算出该<sup>192</sup>Ir放射源当时的 $S_k$ 。

## 1.2 实验设备及测量条件

为保证测量结果的一致性和重复性,所用后装机均为Nucletron核通公司生产的microSelectronV3型高剂量率治疗机,系统版本号为4.3.0.410。其他辅助设备还有:PTW Unidos E剂量仪、PTW SOURCECHECK 4 $\pi$ 井型电离室、GJWS-B2型温湿度表和DYM3型空盒气压表。总共测量25天,每天连续测量2次,总测量次数为50次。

PTW SOURCECHECK 4 $\pi$ 井型电离室的最大电流值响应位置应由测试计划提前进行确定,不能直接套用WS 262-2017中的5.5 cm。本研究中所用测试计划及最大电流值位置百分响应示意图见图1、图2,其最大电流值响应位置为距底端4.5 cm处。



图1 <sup>192</sup>Ir源最大电流值响应位置测试计划

Figure 1 Test plan for determining the positions response to the <sup>192</sup>Ir source maximum current

PTW Unidos E剂量仪的参数设置为Electronic模式,量程High档,偏压400 V。测量时的摆位条件应严格按照WS 262-2017中所述执行,要保证井型电离室离墙至少1.5 m,离地1 m。这样才能减少周围杂物所带来的散射影响,得到精准的测量值,具体的布置见图3<sup>[9]</sup>。

## 1.3 SPC方法

SPC方法最早由美国贝尔实验室的休哈特博士

提出,它贯穿于产品的整个生产过程之中,以产品质量为观察对象来保证产品的可靠性<sup>[10]</sup>。经过多年的发展,SPC方法现已运用到各环节之中进行监测评估。它所采用的主要工具为控制图,该图通过详细记录整体过程中的质量性数据,并计算得到过程能力指数 $C_p$ 、 $C_{pk}$ 来衡量评价是否出现异常<sup>[11-12]</sup>。

均值-极差(X-R)图属于控制图中的计量控制图,X为分组内各测量点的平均值,R为分组内测量

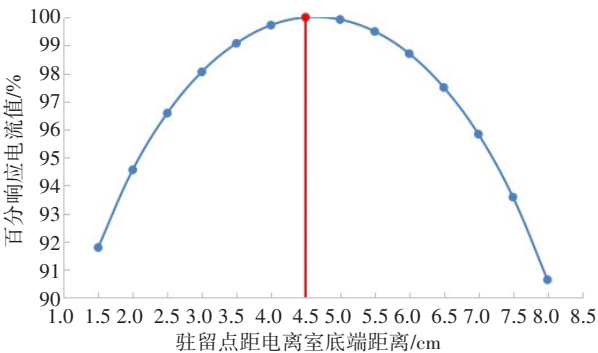


图2 剂量仪测试电流与<sup>192</sup>Ir源驻留位置关系曲线  
Figure 2 Relationship curve of dosimeter test current and <sup>192</sup>Ir source residence position



图3 摆位布置图  
Figure 3 Positioning arrangement

点最大值与最小值之差。它精度尚可,使用方便,多用来分析观测是否存在异常测量点。该图的样本分组大小 $n$ 为2~6,但要求所得数据必须符合正态分布。由于<sup>192</sup>Ir放射源的天然衰变特性,本文以每次的测量值和计划系统计算值的偏差为质量性数据进行统计。而控制图的绘制在早期基本依靠手动计算,现多采用Minitab 19.0软件进行处理。在X-R图中所涉及到的中心线CL、上控制线UCL和下控制线LCL的区别与联系详见下式(4)~(9):

$$CL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} \tag{4}$$

$$UCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + \frac{3}{d\sqrt{n}}\bar{R} \tag{5}$$

$$LCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - \frac{3}{d\sqrt{n}}\bar{R} \tag{6}$$

$$CL_{\bar{R}} = \bar{R} \tag{7}$$

$$UCL_{\bar{R}} = D_4\bar{R} \tag{8}$$

$$LCL_{\bar{R}} = D_3\bar{R} \tag{9}$$

其中,式(4)~(6)和(7)~(9)分别为均值图和极差图的相关计算公式,由下角标 $X$ 和 $R$ 进行区分。 $X$ 为各分组样本均值; $\bar{\bar{X}}$ 是均值图的中心线,表示过程的平均; $\bar{R}$ 是分组内样本的极差值; $\bar{R}$ 是极差图的中心线,代表了平均极差。计算控制限系数 $d$ 、 $D_3$ 、 $D_4$ 均与 $n$ 的

取值相关,具体的取值可参考GB/T 17989.2-2020<sup>[13]</sup>。当对称公差无偏移时,可控范围内运行满足要求的能力比亦称过程能力指数 $C_p$ 表达式如下所示<sup>[14]</sup>:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \tag{10}$$

当对称公差存在偏移时,过程能力指数由 $C_{pk}$ 来表示:

$$C_{pk} = \text{Min}\left(\frac{USL - \bar{X}}{3\sigma}, \frac{\bar{X} - LSL}{3\sigma}\right) \tag{11}$$

其中,过程固有波动 $\sigma$ 的取值为 $R/d$ ,USL、LSL的取值为偏差的上下限,按照AAPM的标准为 $\pm 3\%$ 。二者的评价标准详见表1<sup>[15-16]</sup>。

表1  $C_p$ 、 $C_{pk}$ 评价标准  
Table 1 Evaluation criterions of  $C_p$  and  $C_{pk}$

级别	取值范围	过程受控能力	备注
1	$C_p \leq 0.67, C_{pk} \leq 0.67$	极差	需紧急干预
2	$0.67 < C_p \leq 1, 0.67 < C_{pk} \leq 1$	较差	需整改调整
3	$1 < C_p \leq 1.33, 1 < C_{pk} \leq 1.33$	尚可	需进一步提高
4	$1.33 < C_p \leq 1.67, 1.33 < C_{pk} \leq 1.67$	适宜	只需维持现状
5	$C_p > 1.67, C_{pk} > 1.67$	极佳	无需调整

2 测量结果

对后装机房中某<sup>192</sup>Ir放射源按照上述标准摆位条件进行50次测量,所得 $S_k$ 的偏差值范围为-1.584%~0.915%。将数据全部录入Minitab 19.0软件中,分组大小 $n$ 取2,可得到25个子组。选取质量工具中的Capability Sixpack功能,所得均值图、极差图、能力直方图及正态概率图详见图4~图7。同时导出的过程能力指数 $C_p$ 、 $C_{pk}$ 分别为1.66、1.51。

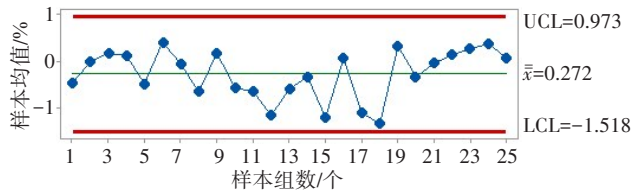


图4 Xbar控制图  
Figure 4 Xbar control chart

需要注意的是,测量时的摆位条件需严格遵守操作规范,保证井型电离室离墙至少1.5 m,离地1 m。在其余条件相同时,随机选取第6、24组将电离室置于水平地面进行测量并替换相关数据,所得混合测量结果均值图、正态概率图详见图8、图9。



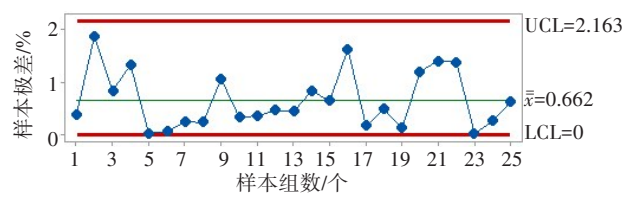


图5 R控制图  
Figure 5 R control chart

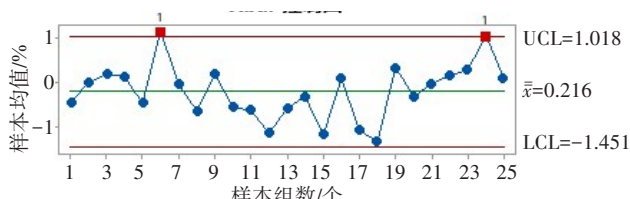


图8 混合测量Xbar控制图  
Figure 8 Xbar control chart of mixed measurement

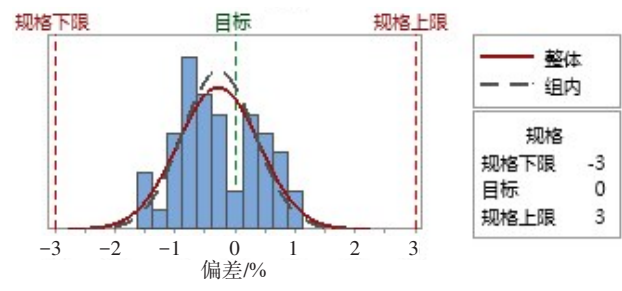


图6 能力直方图  
Figure 6 Capability histogram

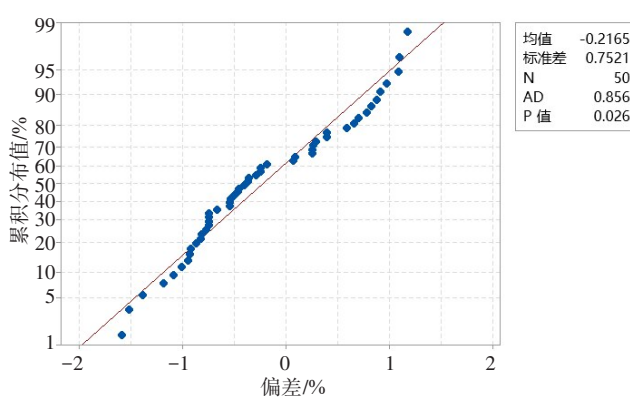


图9 混合测量正态概率图  
Figure 9 Normal probability plot of mixed measurement

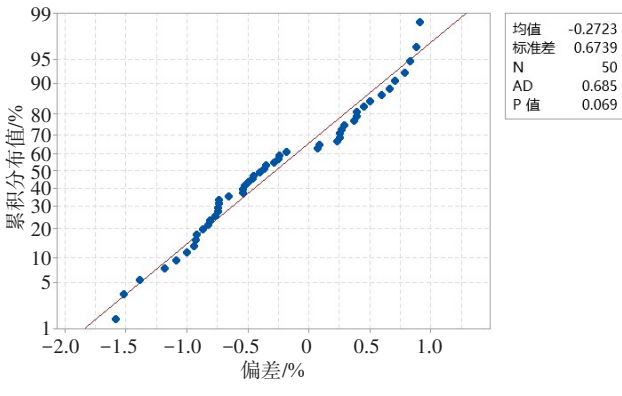


图7 正态概率图  
Figure 7 Normal probability plot

### 3 讨论

在国内大多数的放射治疗中心,后装放射治疗对于宫颈癌等病种而言不可或缺,结合3D打印技术的逐步应用,广大患者更是从中受益匪浅<sup>[17-18]</sup>。为了保证后装治疗的疗效,规范后装治疗,尤其是常用后装<sup>192</sup>Ir放射源的质量控制和质量保证,国家癌症中心暨国家肿瘤质控中心于2019年颁布了NCC/T-RT 002-2019号报告。该报告对检测的方法、内容和频次都做出了详细的说明与要求,与WS 262-2017中对<sup>192</sup>Ir放射源强度的验证方法基本相同<sup>[19]</sup>。

SPC方法以特征值为目标,运用数理统计对各环节进行监控,保证了质量的改进。其独有的旨在评价工序能力的过程能力指数 $C_p$ 、 $C_{pk}$ ,也逐步从工厂扩展到了医院、学校、实验室等其他地方应用。它的运用能够使异常波动通过控制图的方式清晰明了地展现在质控人员的面前,便于查找原因并及时修正<sup>[20]</sup>。

在本应用中,<sup>192</sup>Ir放射源 $S_k$ 的50例偏差值分布在-1.584%~0.915%之间,符合国标中小于 $\pm 5\%$ 的要求,小于AAPM-TG43中 $\pm 3\%$ 的应用限值,体现了该方法较好的精准性。图4表明25组测量值的均值分布为-1.337%~0.411%,中心线为-0.272%,处于LCL至UCL即-1.518%~0.973%的红色警戒线范围内。同时,图5中各分组的极差值也分布在对应的LCL至UCL之间。能力直方图(图6)所给出的 $C_p=1.66$ 、 $C_{pk}=1.51$ 的结论与表1中的第4级相符合,即该验证过程受控能力适宜,只需维持现状。而图7正态概率图则提示整体的序列符合正态分布( $P>0.05$ )。结合图4~图7之间的数据信息,再次表明了该<sup>192</sup>Ir源的 $S_k$ 满足精准治疗的前提要求,拥有较好的稳定性,可以实施治疗。与之形成鲜明对比的是在井型电离室置于地面后增加了一定的散射影响<sup>[21]</sup>,图8的混合测量X图提示第6、24组测量点出现了超过中心线3个标准差,但仍然小于规格界限的情况。同时,图9的混合测量正态概率图也提示了序列中有奇异点的出现( $P<0.05$ )。这都说明了SPC方法可以对后装<sup>192</sup>Ir源 $S_k$ 的验证进行统计监督,其中的异常波动即系统误差能够被甄选展示出来。

综上所述,SPC方法在国外经历了多年的发展之后,不光在常见的机械加工、产品管理领域有着突出的贡献,pascu等<sup>[22]</sup>、keller等<sup>[24]</sup>采用该方法在医药相关行业特别是放射治疗领域也取得了一定的成绩。就国内而言,SPC方法虽然起步较晚,但这并不影响它在放疗行业的实施和开展:李定宇等<sup>[25]</sup>就SPC结合Visual Basic

在加速器质量保证中的输出剂量验证做出了早期的探索,发现了规格界限没有辨识出的系统误差;李光俊等<sup>[26]</sup>进一步扩大了应用的范围,除了剂量外还对机架角、钨门、MLC到位精度做出了分析,指出机架角为误差状态最高的参数;刘礼东等<sup>[27]</sup>则在前人的基础上引入了Minitab对加速器输出剂量进行自动分析并绘制了X-R图,大大提高了质控分析的效率,明确了异常点的具体位置,有利于更好地保障高精度的质控水平。

总之,SPC方法在后装<sup>192</sup>Ir源 $S_k$ 验证中的成功运用充分展示了它的全面性,能够识别出规格界限漏掉的系统误差。不论是医用加速器外照射还是后装治疗内照射的质量保证,该方法都可以对某些超过控制界限但仍然小于规格界限的异常数据点进行预警提示,为精准放疗的准确实施提供了更好的保障。

## 【参考文献】

- [1] 霍晓庆,王颖拓,刘波,等.基于OCTAVIUS 1500电离室矩阵的近距离放疗相对剂量分布验证[J].肿瘤基础与临床,2021,34(4): 327-329.  
Huo XQ, Wang YT, Liu B, et al. Verification of relative dose distribution in brachytherapy based on OCTAVIUS1500 ionization chamber matrix [J]. Journal of Basic and Clinical Oncology, 2021, 34 (4): 327-329.
- [2] 崔洪起,高岩.医用<sup>192</sup>Ir后装源的研制[J].同位素,2020,33(3): 163-166.  
Cui HQ, Gao Y. Research and preparation of medical Ir-192 afterloading source[J]. Journal of Isotopes, 2020, 33(3): 163-166.
- [3] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.后装 $\gamma$ 源近距离治疗质量控制检测规范: WS 262-2017[S].北京:人民卫生出版社,2017: 2-3.  
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Specification for testing of quality control in  $\gamma$ -ray sources afterloading brachytherapy: WS 262-2017 [S]. Beijing: People's Health Publishing House, 2017: 2-3.
- [4] 刘子成,费振乐,刘苓苓,等.基于国产后装治疗机及其后装放疗计划系统的质控方法研究[J].中国医疗设备,2022,37(4): 10-13.  
Liu ZC, Fei ZL, Liu LL, et al. Research on quality control methods based on domestic remote-afterloading brachytherapy machine and the radiotherapy planning system[J]. China Medical Devices, 2022, 37(4): 10-13.
- [5] 刘宝喜,全红,邱杰,等.医用<sup>192</sup>Ir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 BX, Quan H, Qiu J, et al. The study of the accuracies about the noted activity values of the medical radioactive sources <sup>192</sup>Ir[J]. China Medical Equipment, 2017, 14(12): 46-48.
- [6] 刘子成.宫颈癌内外放射治疗剂量精准评估[D].合肥:安徽医科大学,2022.  
Liu ZC. Study on accurate evaluation of internal and external radiation therapy dose for cervical cancer[D]. Hefei: Anhui Medical University, 2022.
- [7] 王连生.新编统计技术教程[M].北京:中国计量出版社,2008: 107-113.  
Wang LS. New statistical technology tutorial [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2008: 107-113.
- [8] 托德·鲍里斯基,丹尼尔·J.斯坎德贝格,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 DJ, Starkschall G. Hendee's radiation therapy physics [M]. Tianjin: Tianjin Science & Technology Translation & Publishing Co., Ltd, 2018: 207.
- [9] 罗斌,李贤富,郭飞,等.利用井型电离室测量后装放射源<sup>192</sup>Ir活度的方法及放射源活度的验证[J].中国医学物理学杂志,2021,38(4): 416-421.  
Luo B, Li XF, Guo F, et al. Method of measuring the activity of <sup>192</sup>Ir radioactive source for afterloading brachytherapy using well-type ionization chamber and quality assurance of the activity of radioactive source[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2021, 38(4): 416-421.
- [10] 杨露.基于SPC的模具零件检验过程质量控制研究[D].广州:广东工业大学,2016: 2.  
Yang L. SPC-based quality control for mold part inspection process [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016: 2.
- [11] Sanghangthum T, Suriyapee S, Srisatit S, et al. Statistical process control analysis for patient-specific IMRT and VMAT QA[J]. J Radiat Res, 2013, 54(3): 546-552.
- [12] Binny D, Aland T, Archibald-Heeren BR. A multi-institutional evaluation of machine performance check system on treatmentbeam output and symmetry using statistical process control[J]. J Appl Clin Med Phys, 2019, 20(3): 71-80.
- [13] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.控制图 第2部分:常规控制图:GB/T 17989.2-2020[S].北京:中国标准出版社,2020: 7.  
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Control charts-Part 2: Shewhart control charts: GB/T 17989.2-2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020: 7.
- [14] 宋祥彦.统计质量评价理论基础:过程能力指数理论与应用[M].武汉:湖北科学技术出版社,2013: 23.  
Song XY. Theoretical basis of statistical quality evaluation: process capability index theory and application [M]. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 2013: 23.
- [15] Pascu CI, Didu A, Gheorghe S. Study about the application of statistical process control for process quality improvement in automotive industry[J]. Appl Mech Mater, 2020, 896(57): 169-174.
- [16] Keller DS, De Paula TR, Yu GY, et al. Statistical process control (SPC) to drive improvement in length of stay after colorectal surgery[J]. Am J Surg, 2020, 219(6): 1006-1011.
- [17] Pawlicki T, Whitaker M, Boyer AL. Statistical process control for radiotherapy quality assurance[J]. Med Phys, 2005, 32(9): 2777-2786.
- [18] 曹璐,李贤富,周业琴,等.宫颈癌VMAT外照射联合三维腔内后装治疗的近期疗效和不良反应分析[J].中国医疗设备,2018,33(12): 97-99.  
Cao L, Li XF, Zhou YQ, et al. Short-term clinical effect and side effects of cervical cancer patients treated by VMAT combined with three dimensional intracavitary brachytherapy [J]. China Medical Devices, 2018, 33(12): 97-99.
- [19] 国家癌症中心/国家肿瘤质控中心.后装治疗机的质量控制和质量保证: NCC/T-RT 002-2019[S].2019: 13-14.  
National Cancer Center/National Cancer Quality Control Center. Quality control and quality assurance of afterloading equipment: NCC/T-RT 002-2019[S]. 2019: 13-14.
- [20] 岳芳名,李婷婷,孙开峰,等.统计过程控制在医疗器械电子束辐照灭菌质量控制中的应用[J].辐射研究与辐射工艺学报,2020,38(1): 61-66.  
Yue FM, Li TT, Sun KF, et al. Application of statistical process control in medical devices quality control of electron beam irradiation sterilization [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2020, 38(1): 61-66.
- [21] 刘宝喜.高剂量率<sup>192</sup>Ir放射源标称活度准确性的研究[D].武汉:武汉大学,2018.  
Liu BX. The study on the accuracy of nominal activity of <sup>192</sup>Ir HDR brachytherapy Radiation source[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.
- [22] Pascu CI, Didu A, Gheorghe S. Study about the application of statistical process control for process quality improvement in automotive industry[J]. Applied Mechanics and Materials, 2020, 5957(1792): 169-174.
- [23] Pawlicki T, Whitaker M, Boyer AL. Statistical process control for radiotherapy quality assurance[J]. Med Phys, 2005, 32(9): 2777-2786.
- [24] Keller DS, De Paula TR, Yu GY, et al. Statistical Process Control (SPC) to drive improvement in length of stay after colorectal surgery[J]. Am J Surg, 2020, 219(6): 1006-1011.
- [25] 李定宇,戴建荣.统计过程控制方法在加速器质量保证中的应用[J].国际放射医学核医学杂志,2009,33(1): 54-58.  
Li DY, Dai JR. The application of statistical process control in linac quality assurance [J]. International Journal of Radiation Medicine and Nuclear Medicine, 2009, 33(1): 54-58.
- [26] 李光俊,李衍龙,肖江洪,等.VMAT加速器日常运行分析及过程质量控制[J].中华放射肿瘤学杂志,2015,24(2): 200-204.  
Li GJ, Li YL, Xiao JH, et al. Quality control of linac in daily volumetric-modulated arc therapy [J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2015, 24(2): 200-204.
- [27] 刘礼东,李军峰,李书舟,等.统计过程控制方法在加速器日常输出剂量稳定性中的研究[J].中国医学物理学杂志,2021,38(2): 138-142.  
Liu LD, Li JF, Li SZ, et al. Statistical process control method in evaluating the stability of daily output dose of linear accelerator [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2021, 38(2): 138-142.

(编辑:薛泽玲)