

主动式个人剂量计(APD)在脉冲辐射场中的性能与应用

崔力萌¹, 冯泽臣¹, 靳国梁², 马永忠¹, 马小龙², 马晓海²

1. 北京市疾病预防控制中心, 北京 100013; 2. 首都医科大学附属北京安贞医院, 北京 100029

摘要: **目的** 比较不同主动式个人剂量计(APD)在介入放射学脉冲辐射场的响应能力, 寻找可用于介入放射学工作人员剂量优化监测的APD。 **方法** 选取7个型号APD和剂量监测系统, 依次在以下4类辐射场中测试: 连续辐射场(Cs-137), 单脉冲辐射场(80 kV, 10 mA, 10~1 000 ms), 多脉冲标准辐射场[70 kV, 20~500 mA, 1~20 ms/脉冲, 帧率(frames)1~20], 多脉冲散射场(血管造影机, 照射野: 15 cm × 15 cm, 22 cm × 22 cm, 27 cm × 27 cm, 造影: 65~74 kV, 6.2~8.2 mA; 摄影: 65 kV, 343~479 mA)。 **结果** 测试的APD在连续辐射场中均有较好的剂量响应, 放置模体与不放置得到的结果比值为1~1.1; 在单脉冲辐射场中, DMC3000、TruDose显示了较好的响应能力、线性和重复性; 在多脉冲辐射场的主射线下, DMC3000、TruDose随剂量率升高具有较好的剂量响应线性和重复性, 两者响应能力有5%~13%的差别; 在血管造影机散射场中, DMC3000、TruDose和RaySafei3与热释光剂量计结果的比值范围分别为1.08 ± 0.09、0.95 ± 0.11、1.13 ± 0.11。 **结论** DMC3000、TruDose和RaySafei3主动式剂量计均可进一步投入临床作为辅助剂量计使用, 优化职业病高风险人群的辐射剂量监测和辐射防护措施。介入工作人员可根据实时剂量信息, 实施降低累积剂量的行为, 减少放射工作人员剂量。

关键词: 主动式剂量计; 脉冲辐射场; 介入放射学; 职业照射

中图分类号:X591 文献标识码:A 文章编号:1004-714X(2024)04-0353-05

Performance and use of active personal dosimeters in pulsed radiation field

CUI Limeng¹, FENG Zechen¹, JIN Guoliang², MA Yongzhong¹, MA Xiaolong², MA Xiaohai²

1. Beijing Center for Disease Prevention and Control, Beijing 100013 China; 2. Beijing Anzhen Hospital Affiliated to Capital University of Medical Sciences, Beijing 100029 China

Abstract: **Objective** To compare the response capability of active personal dosimeters (APDs) in the pulse radiation field of interventional radiology, and to find APDs that can be used for dose optimization monitoring for interventional radiology staff. **Methods** Seven models of APDs and dose monitoring systems were tested in the following four types of radiation fields: continuous radiation field (Cs-137), single-pulse radiation field (80 kV, 10 mA, 10~1 000 ms), multi-pulse standard radiation field (70 kV, 20~500 mA, 1~20 ms/pulse, frames per second 1~20), and multi-pulse scattering field (angiography machine, irradiation field: 15 cm × 15 cm, 22 cm × 22 cm, 27 cm × 27 cm, angiography: 65~74 kV, 6.2~8.2 mA; photography: 65 kV, 343~479 mA). **Results** All APDs showed good dose responses in the continuous radiation field. The ratio of the results obtained with and without phantom was 1~1.1. In the single-pulse radiation field, DMC3000 and TruDose showed good dose response, linearity, and repeatability. Under the main ray of the multi-pulse radiation field, DMC3000 and TruDose showed good dose response, linearity, and repeatability as the dose rate increased, and there were 5%~13% differences in the response ability between the two models. In angiography machine scattering field, the ratios of the results obtained from DMC3000, TruDose, and RaySafei3 to those from thermoluminescence dosimeter were 1.08 ± 0.09, 0.95 ± 0.11, and 1.13 ± 0.11, respectively. **Conclusion** DMC3000, TruDose, and RaySafei3 can be used in clinics as auxiliary dosimeters to optimize radiation dose monitoring and radiation protection measures for people at high risk of occupational diseases. Interventional radiology workers can implement actions to reduce the cumulative dose based on real-time dose information, thereby reducing the radiation dose.

Keywords: Active personal dosimeter; Pulsed radiation field; Interventional radiology; Occupational radiation exposure

国际放射防护委员会(ICRP)建议将病人和职业照射剂量进行综合管理, 以便对介入手术进行优化^[1]。佩戴个人剂量计对放射工作人员进行剂量监测是主要的辐射防护和管理措施之一。个人剂量计可分为

基金项目:首都卫生发展科研专项(首发2022-2G-3019)

作者简介:崔力萌(1986—),女,山东人,副研究员。从事辐射防护工作。E-mail: cuilimeng1103@sina.com

被动式个人剂量计(PD)和主动式个人剂量计(APD),传统的被动式个人剂量计能监测某段时间内的累积剂量,但这些信息不足以实时确定在介入手术过程中是否缺乏职业辐射防护。APD 可以直接向佩戴者实时显示累积剂量和剂量率。因此,目前国际上建议使用 APD 辅助 PD 进行双剂量计个人剂量监测^[2]。大部分 APD 在连续辐射场中都有较好的线性响应,但是在脉冲辐射场中的响应表现各异^[3]。本研究目的在于了解 APD 在介入放射学脉冲辐射场的响应能力,寻找可用于介入放射学工作人员剂量优化监测的 APD。

1 材料与方法

选取 7 个型号 APD/实时监测系统:EPD TruDose (Thermo Fisher Scientific)、DMC2000、DMC3000

(MIRION TECHNOLOGIES)、PM1621(POLIMASTER)、AT3509(ATOMTEX)、DoseRAE Pro(gastech)、RaySafei3(Fluke Biomedical),参考 IEC TS 63 050:2019 标准^[4],在 4 类辐射场中测试并记录累积剂量(表 1): (1)连续辐射场:Cs-137(0.94155Ci, 2022 年 4 月,北京市疾病预防控制中心)。(2)单脉冲辐射场(80 kV, 10 mA, 10~1 000 ms, 0.2 mmCu 滤过,北京市疾病预防控制中心)。(3)多脉冲标准辐射场:70 kV, 20~500 mA, 1~20 ms/脉冲,帧率(fps)1~20(中国计量科学研究院)。(4)多脉冲散射场:血管造影机(飞利浦 Allura Xper FD20,照射野 FOV: 15 cm × 15 cm, 22 cm × 22 cm, 27 cm × 27 cm,造影: 65~74 kV, 6.2~8.2 mA;摄影: 65 kV, 343~479 mA)。在脉冲场测试中每种条件曝光 3 次,取平均值进行后续数据分析。

表 1 脉冲辐射场中测试条件

Table 1 Parameters used for the tests performed in pulsed radiation field

辐射场类型	曝光时间/ms	脉冲频率/s ⁻¹	管电压/kV	管电流/mA
单脉冲场	10~10000	单脉冲	80	10
多脉冲场	5, 10, 20	10, 20	70	10~500
多脉冲散射场	4.0~5		65~74	6.5~479

在血管造影机散射场使用热释光探测器 [GR-200A, LiF(Mg, Cu, P), 北京光润意通] 与 APD 进行对比实验。热释光圆片的规格为 $\phi 4.5\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$ 。热释光剂量计不受脉冲辐射场特性的影响,在本次试验中视作参考剂量计。实验中散射体选用标准水模体(尺寸: 30 cm × 30 cm × 20 cm)。将 1 个水模体放置于直射线下,另外 1 个放置于第一术者位。在第一术者位水模体前表面分别固定主动式剂量计和热释光剂量计(图 1)。热释光剂量计检测由北京市疾病预防控制中心进行。该实验室每年都参加中国疾病预防控制中心

制中心组织的个人剂量计比对,成绩均为合格或优秀。RaySafe X2 X 射线检测仪和热释光测定系统每年进行检定校准。测试结果使用平均值及标准差进行描述统计。APD 与热释光剂量计的累积剂量比值对比使用 ANOVA 检验,对剂量读数平均值进行配对 *t* 检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 连续辐射场测试结果 在 Cs-137 连续辐射场测试中,1 m 处空气比释动能率为 2.6 mGy/h, 首先将 APD 固定在标准水模体上进行正面照射和背面照射两种测试,再在无模体情况下进行正面照射和背面照射(表 2)。结果显示,正面与背面照射的累积剂量比值为 0.9~1.1。无模体情况下,除 DoseRAE Pro 的比值为 1.5,其余 APD 正面与背面照射的比值为 0.9~1.2。对于正面照射,放置模体与不放置得到的结果比值为 1~1.1;对于背面照射,除 DoseRAE Pro 的比值为 1.8,放置模体与不放置得到的结果比值为 1~1.4。

2.2 单脉冲辐射场测试结果 图 2 显示在单脉冲辐射场中 4 种 APD 与 RaySafe X2 X 射线检测仪测量

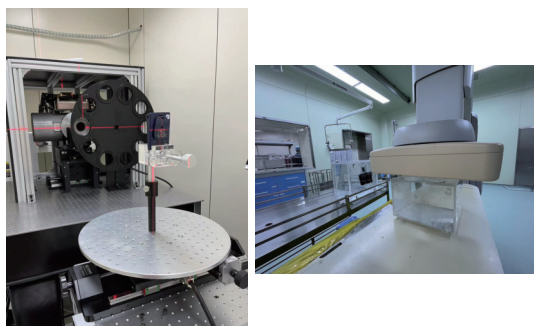


图 1 脉冲辐射场(左)及血管造影机散射场(右)实验
Figure 1 Experiments on pulsed radiation field (left) and angiography machine scattering field (right)

表 2 连续辐射场测试结果

Table 2 Test results in continuous radiation field

	正面/背面读数比值(放置水模体)	正面/背面读数比(无模体)	模体有/无读数比(正面)	模体有/无读数比(背面)
DMC2000	1.13	1.12	1.06	1.05
DMC3000	0.97	0.95	1.07	1.05
AT3509	0.95	0.90	1.12	1.06
Polimaster	0.94	1.20	1.09	1.38
DoseRAE	0.87	1.54	1.03	1.84
EPD TruDose	1.12	1.12	1.09	1.10

表 3 主动式剂量计在标准脉冲场/多脉冲散射场中的性能测试结果对比

Table 3 Comparison of performance of active personal dosimeters in standard pulse field and multi-pulse scattering field

设备型号	可测范围	APD/HP(10)比值(测试条件)	参考文献
DMC2000XB	1 μSv~10 Sv, 0.1 μSv/h~10 Sv/h	1(0.2 Sv/h, RQR8)	[5]
		0.94~1.061(N-80)	[6]
		0.98~0.99 (RQR-6)	[7]
		0.77 (实际佩戴)	[7]
DMC3000	1 μSv~10 Sv, 0.1 μSv/h~10 Sv/h	0.88 (实际佩戴)	[8]
		1(0.2 Sv/h, RQR8)	[5]
		1.08 ± 0.09	本研究
Raysafe i2	1 μSv~10 Sv, 40 μSv/h~300 mSv/h	0.87 (实际佩戴)	[8]
		0.7 (0.2 Sv/h, RQR8)	[5]
DoseAware	1 μSv~10 Sv, 10 μSv/h~50 mSv/h	0.61 (实际佩戴)	[7]
		1.03~1.1 (N-80)	[6]
		0.95~0.96 (RQR-6)	[6]
TruDose	1 μSv~10 Sv, 0.5 mSv/h~10 Sv/h	0.95 ± 0.11	本研究
RaySafe i3	1 μSv~10 Sv, 40 μSv/h~300 mSv/h	1.13 ± 0.11	本研究

结果的归一化结果。曝光条件设置为 80 kV, 10 mA, 0.2 mmCu 滤过, 分别在 10、20、50、100、320、500、800 ms、1、2、10 s 条件下曝光 3 次。结果显示, 相对于 10 s, TruDose 为 10 ms~2 s 的响应能力在 78%~97%; DMC3000 为 10 ms~2 s 的响应能力在 78%~102%, 具有较好的相对响应能力和重复性; DMC-2000 与 AT3509 响应较不稳定, 其余型号无法响应。

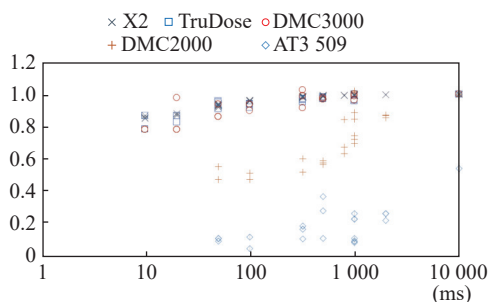


图 2 4 种 APD 与 RaySafe X2 X 射线质量评估系统在单脉冲场中脉宽响应归一

Figure 2 Normalized pulse width responses of four types of APDs with RaySafe X2 X-ray QA system in single pulse field

DMC3000、TruDose 与 RaySafe X2 读数的比值分别为 1.5 ± 0.08 和 1.4 ± 0.04 , 在不同曝光时长下, DMC-2000 与 AT3509 比值平均值分别为 1.1 ± 0.26 和 1.6 ± 1.43 。

2.3 多脉冲辐射场测试结果 选取单脉冲场中响应能力较好的 DMC3000 和 TruDose 两种型号在多脉冲辐射场的主射线下进行测试(图 3)。在 20、50、100、200、500 mA 条件下测试 5 ms/脉冲、10 ms/脉冲和 20 ms/脉冲时 APD 响应能力, 结果显示 DMC3000 和 TruDose 归一化响应值范围在 1.2 ± 0.07 , 1.1 ± 0.09 。DMC3000 和 TruDose 的响应能力随剂量率升高响应降低, 但具有较好的重复性, 两者响应能力有 5%~13% 的差别。

2.4 散射场测试数据 在血管造影机散射场中测试 DMC3000、TruDose 和 RaySafe i3 与热释光剂量计。不同照射野中测试显示, 将 3 种设备与热释光剂量计的累积剂量比值(缩写为 $R_{\text{DMC3000/TLD}}$ 、 $R_{\text{TruDose/TLD}}$ 、 $R_{\text{i3/TLD}}$)进行比较, 发现它们与自身相比未见明显统

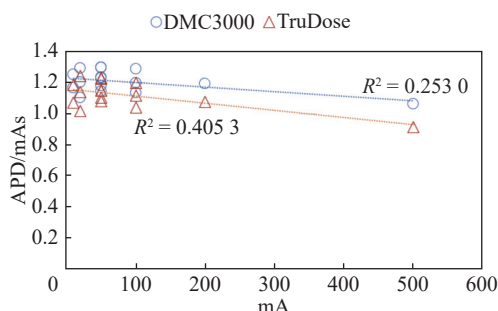


图3 DMC3000 和 TruDose 两种型号在多脉冲辐射场中结果归一图

Figure 3 Normalized responses of DMC3000 and TruDose in multi-pulse radiation field

计学差异($P > 0.05$)。但在 $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 照射野条件下, 3 种设备的剂量读数(缩写为 $D_{\text{DMC3000/TruDose/i3}}$)间有统计学差异, $D_{\text{i3}} > D_{\text{DMC3000}} > D_{\text{TruDose}}$ ($P < 0.05$); 在 $22\text{ cm} \times 22\text{ cm}$ 照射野条件下, D_{TruDose} 显著小于 D_{i3} 和 D_{DMC3000} ($P < 0.05$); 在 $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 照射野条件下, 计数无统计学差异($P > 0.05$)。 $R_{\text{DMC3000/TLD}}$ 、 $R_{\text{TruDose/TLD}}$ 、 $R_{\text{i3/TLD}}$ 范围分别为 1.08 ± 0.09 , 0.95 ± 0.11 , 1.13 ± 0.11 (图4)。

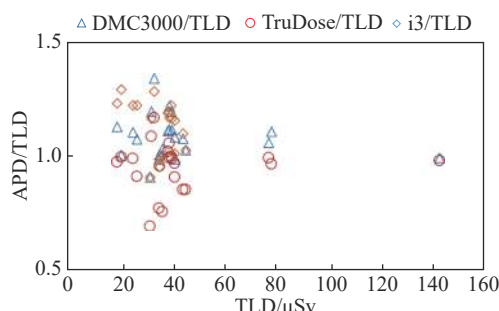


图4 不同剂量下 DMC3000、TruDose 和 RaySafe i3 与热释光剂量计累积剂量比值

Figure 4 Ratios of cumulative doses obtained from DMC3000, TruDose, and RaySafe i3 to those from thermoluminescence dosimeter at different radiation doses

3 讨论

3.1 主动式剂量计在脉冲场中的性能测试结果对比除 DoseRAE Pro 外, 其余测试主动式剂量计在连续辐射场响应能力稳定。本研究测试的 APD 在正面照射中, 是否放置背散射体模的影响约为 $3\% \sim 12\%$, 这个结果与此前的研究类似^[5]。单脉冲辐射场测试筛选出响应能力较好的 DMC3000 和 TruDose 两种型号设备。值得注意的是, RaySafe i3 在单脉冲场、多脉冲场中多次出现脉冲漏计, 但在散射场中响应良好, 我们认为此型号设备较难应用于介入放射学以外的其他医用脉冲辐射场。在多脉冲辐射场中的测试结果显示, DMC3000 和 TruDose 的响应能力随剂量率升高

响应降低。

在血管造影机散射场中, APD 与热释光剂量计的差异 $< 15\%$, 在可接受范围。在不同照射野进行测试时, APD 稳定性均较好。但在较小照射野中显示出响应差异, 这可能与不同型号 APD 的灵敏度、散射场均匀性等因素有关。RaySafe i3 不同探测器之间性能差异较大, 在非血管造影机脉冲场响应能力波动较大, 在血管造影机散射场中响应能力稳定。APD 在使用前应进行检定, 确保其在脉冲辐射场的响应能力, 在使用期间应定期进行检定、校准, 确保功能正常。本研究筛选出的 DMC3000、TruDose 和 RaySafe i3 均可进一步投入临床作为介入放射学辅助剂量计使用, 与此前作者在相关综述中报道的测试结果对比见表 3^[3]。

在实际使用中, 各个医院、不同医生在介入手术选择的曝光模式不同, 包括连续透视、脉冲透视、脉冲采集、心脏电生理检查模式、冠状动脉造影模式等, 这会造成不同医院之间的差异。有研究报道对于高于 2 Sv/h 的脉冲辐射和脉冲宽 10 ms 的脉冲辐射, 大部分 APD 在低剂量率下的响应能力下降, 这可能是由于死时间修正不足导致的^[5,9]。本研究选取的 APD 在连续辐射场中均有较好的剂量响应。与其他学者的研究结果相似, 本研究中 APD 对反散射不太敏感, 是否穿戴防护围裙上或放置模体结果将不会受到影响^[5,10]。

3.2 存在的问题 国际辐射防护委员会在 2018 年发布的《介入手术中的职业放射防护》报告书(No.139)中建议, 由于 APD 可以使放射工作人员根据实时剂量信息, 实施降低累积剂量的行为, 可用于介入职业人员剂量的优化监测^[2]。主动式剂量计在我国介入脉冲场的应用前景还是存在一些亟需解决的问题。首先, APD 在脉冲辐射场中响应能力不一, 我国应尽快颁布主动式剂量计在脉冲辐射场中的使用、检定、校准规程。应及时与国际共识与标准接轨, 建立 APD 检定校准指南, 包括对于标准辐射场的要求。

设备的高昂价格和检定校准成本同样也是 APD 应用比较少的原因之一。被动式剂量计的低成本已经让使用单位形成了固定的使用习惯, 而本文所述 APD 价格基本在千元以上。另外检定频率、APD 的用户友好性也是需要考虑的问题。目前国外已经在研发将 APD 与智能手机连接的应用软件, 便于工作人员日常查看自身剂量^[11]。随着介入放射学的迅猛发展, 工作人员数量迅速增长, 我国自主研发能够

响应脉冲辐射场的 APD 也是迫在眉睫的市场需求。

3.3 使用规范 APD 的使用可以使介入职业人员及时、真实的了解到自己每次手术所受到的剂量。IAEA 在 2023 年发布的《建设和提升介入放射学》报告书指出,在介入手术中使用 APD 可以帮助诊断参考水平(DRL)的使用和优化,并实现更深入、更有效的剂量分析,因为它们不仅可以收集剂量值,还可以收集所有可以解释剂量变化并确定可以改进的地方的设备和其他因素^[12]。APD 在脉冲场检定校准后可投入临床作为辅助剂量计使用,但工作人员在同室操作时应关闭报警功能,佩戴于手术衣内部,手术过程中不应读取实时剂量率;APD 应辅助 PD 共同使用;建议佩戴者在手术结束后记录累积剂量,并同时记录介入放射学设备显示的空气比释动能-面积乘积(kerma area product, KAP/DAP)、参考点空气比释动能(CAK)和透视时间,将个人剂量与诊断参考水平综合分析,定期回顾剂量水平,进行剂量解读和剂量管理。国际上相关研究显示,是否进行佩戴中的放射防护培训会后续的个人剂量水平是否能够降低^[13]。因此,同时进行放射防护知识培训和技术支持是很有必要的^[14]。

剂量计的可靠读数是正确估计职业暴露剂量的基石。在介入放射学中,使用主动式剂量计辅助被动式剂量计进行个人剂量监测是值得引入的方式,同时,蒙特卡罗模拟也可以联合使用,进行剂量估算和对比^[15]。我们认为,介入放射工作人员需要不断优化个人剂量测算方法。在双剂量计辅助监测投入使用之后,利益相关者,如辐射防护部门和政府,应考虑适当的管理、适当的培训和风险沟通方法,以确保正确使用个人剂量计。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展,排名无争议。文章不涉及任何利益冲突

作者贡献声明 崔力萌负责实验设计、数据分析、论文撰写、现场实验;冯泽臣负责实验设计、现场试验;靳国梁负责现场实验;马永忠负责审核论文;马小龙、马晓海负责论文修订

参考文献

- [1] Vano E, Fernandez-Soto JM, Ten JJ, et al. Occupational and patient doses for interventional radiology integrated into a dose management system[J]. *Br J Radiol*, 2023, 96(1143): 20220607. DOI: 10.1259/bjr.20220607.
- [2] López PO, Dauer LT, Loose R, et al. ICRP Publication 139: Occupational radiological protection in interventional procedures[J]. *Ann ICRP*, 2018, 47(2): 1-118. DOI: 10.1177/0146645317750356.
- [3] 崔力萌,靳国梁,马小龙,等.主动式个人剂量计在脉冲辐射场中的性能与应用研究进展[J]. *首都公共卫生*, 2023, 17(4): 252-255. DOI: 10.16760/j.cnki.sdggs.2023.04.010.
- [4] Cui LM, Jin GL, Ma XL, et al. A review of active personal dosimeter in the field of pulsed radiation[J]. *Capit J Public Health*, 2023, 17(4): 252-255. DOI: 10.16760/j.cnki.sdggs.2023.04.010. (in Chinese)
- [4] International Electrotechnical Commission. IEC TS 63050: 2019: IEC- International Electrotechnical Commission[S]. Geneva:IEC, 2019.
- [5] Hupe O, Friedrich S, Vanhavere F, et al. Determining the dose rate dependence of different active personal dosimeters in standardized pulsed and continuous radiation fields[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2019, 187(3): 345-352. DOI: 10.1093/rpd/ncz173.
- [6] Chirioti S, Ginjaume M, Vano E, et al. Performance of several active personal dosimeters in interventional radiology and cardiology[J]. *Radiat Meas*, 2011, 46(11): 1266-1270. DOI: 10.1016/j.radmeas.2011.05.073.
- [7] Struelens L, Carinou E, Clairand I, et al. Use of active personal dosimeters in interventional radiology and cardiology: tests in hospitals-ORAMED project[J]. *Radiat Meas*, 2011, 46(11): 1258-1261. DOI: 10.1016/j.radmeas.2011.08.002.
- [8] Vanhavere F, Carinou E, Clairand I, et al. The use of active personal dosimeters in interventional workplaces in hospitals: comparison between active and passive dosimeters worn simultaneously by medical staff[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2020, 188(1): 22-29. DOI: 10.1093/rpd/ncz253.
- [9] Bordy J, National CL, Becquerel H, et al. ORAMED : optimization of the use of active personal dosimeters in interventional radiology (Work Package 3) Deliverable 3.2 : practical guidelines proposed to[R]. 2009.
- [10] Ginjaume M, Carinou E, Brodecki M, et al. Effect of the radiation protective apron on the response of active and passive personal dosimeters used in interventional radiology and cardiology[J]. *J Radiol Prot*, 2019, 39(1): 97. DOI: 10.1088/1361-6498/aaf2c0.
- [11] Sánchez RM, Fernández D, Vañó E, et al. Managing occupational doses with smartphones in interventional radiology[J]. *Med Phys*, 2021, 48(10): 5830-5836. DOI: 10.1002/mp.15148.
- [12] International Atomic Energy Agency. Establishing and Improving Interventional Radiology[R]. Vienna:IAEA, 2023.
- [13] Gutierrez-Barrios A, Angulo-Pain E, Noval-Morillas I, et al. The radioprotective effect of the Cathpax® AIR cabin during interventional cardiology procedures[J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2021, 98(4): E523-E530. DOI: 10.1002/ccd.29773.
- [14] Lundvall LL, Sandborg M. Does radiological protection training or a real-time staff dosimeter display reduce staff doses during X-Ray-guided pulmonary bronchoscopy?[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2022, 198(5): 265-273. DOI: 10.1093/rpd/ncac028.
- [15] Abdelrahman M, Lombardo P, Vanhavere F, et al. First steps towards online personal dosimetry using computational methods in interventional radiology: operator's position tracking and simulation input generation[J]. *Radiat Phys Chem*, 2020, 171: 108702. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2020.108702.

(收稿日期:2024-01-11)