

· 临床研究 ·

门控心肌灌注显像医务人员外照射辐射剂量研究

吴琪燕 郑贤东 吴飞鹏 洪丽菊 杨蕊 陈丹丹 谢小东 任维嘉 周友俊

昆明医科大学附属延安医院核医学科, 昆明 650051

通信作者: 周友俊, Email: 13668770541@163.com

【摘要】 目的 评估门控心肌灌注显像(G-MPI)中, 医务人员在与患者保持不同距离下所受的外照射辐射水平, 为核医学科辐射安全管理提供科学依据。**方法** 前瞻性选取 2024 年 8 月至 10 月间于昆明医科大学附属延安医院进行 G-MPI 的 27 例患者[男 16 例、女 11 例, 年龄(58.4±11.2)岁]开展自身对照研究。患者均行“一日法”腺苷负荷/静息 G-MPI, 显像剂为^{99m}Tc-甲氧基异丁基异腈(MIBI)。在患者上机时(注射显像剂后 1.5 h)测量其周围辐射剂量率; 以患者左侧腋中线为辐射源中心(零点), 使用 X-γ 辐射仪沿水平方向每 10 cm 测量 1 个点(共 20 个点)的辐射剂量率, 并计算各距离点的辐射衰减率。通过配对 *t* 检验或 Wilcoxon 符号秩检验比较负荷与静息显像中各距离点的辐射剂量率的差异, 并与周围环境本底水平进行对比(Mann-Whitney *U* 检验)。**结果** 在负荷和静息 2 次显像中, 辐射剂量率均在距离患者 40 cm 处(中位值: 30.60 和 47.14 μSv/h)较零点(平均值: 63.42 和 101.11 μSv/h)减半, 在距离患者 120 cm 处降低 90% 左右。距离患者 70 cm 及以上, 其周围剂量辐射率均低于 25 μSv/h, 满足相关标准要求。负荷显像与静息显像中各距离点的辐射剂量率均高于周围环境本底水平(*Z* 值: 2.00~16.80, 均 *P*<0.001), 且静息显像较负荷显像辐射剂量率高(*Z*=4.54, *t* 值: 5.46~18.50, 均 *P*<0.001)。然而, 2 次显像中各距离点的辐射剂量率的衰减率差异无统计学意义(*Z* 值: 0.12~1.73, 均 *P*>0.05)。这表明, 尽管辐射剂量率在 2 次显像中存在差异, 但辐射衰减模式相似。**结论** 医务人员进行^{99m}Tc-MIBI G-MPI 过程中, 与患者保持 70 cm 及以下的操作距离, 可明显降低职业辐射。

【关键词】 辐射剂量; 心肌灌注显像; ^{99m}Tc-甲氧基异丁基异腈; 医务人员**基金项目:** 云南省科技厅科技计划(202401AY070001-191); 昆明市卫生科技人才培养项目暨技术中心建设项目[2020-SW(技)-24]; 昆明市卫生科技人才培养项目[2023-SW(后备)-20]

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20250623-00210

Study on peripheral radiation dose rate of patients with gated myocardial perfusion imaging and its influence on medical staff

Wu Qiyang, Zheng Xiandong, Wu Feipeng, Hong Liju, Yang Rui, Chen Dandan, Xie Xiaodong, Ren Weijia, Zhou Youjun

Department of Nuclear Medicine, Yan'an Hospital Affiliated to Kunming Medical University, Kunming 650051, China

Corresponding author: Zhou Youjun, Email: 13668770541@163.com

【Abstract】 Objective To evaluate the radiation exposure levels received by medical staff involved in gated myocardial perfusion imaging (G-MPI) at different distances from patients, providing a scientific basis for radiation safety management in the department of nuclear medicine. **Methods** A prospective self-controlled study was conducted on twenty-seven patients (16 males, 11 females, age (58.4±11.2) years) who underwent G-MPI at Yan'an Hospital Affiliated to Kunming Medical University from August to October 2024. For all patients, the one-day adenosine-stress/rest G-MPI was adopted, and the imaging agent was ^{99m}Tc-methoxyisobutylisonitrile (MIBI). Taking the midaxillary line on the left side of the patient as the center (zero point) of the radiation source, the radiation dose rate at one point every 10 cm in the horizontal direction (a total of 20 points) was measured by an X-γ dosimeter at 1.5 h after the injection of ^{99m}Tc-MIBI, and the radiation attenuation rate at each distance point was calculated. The differences in radiation dose rates at each distance point between the stress imaging and rest imaging were compared by paired *t* test or Wilcoxon signed-rank test, and values were also compared with the background level of the surrounding environment (Mann-Whitney *U* test). **Results** In both stress imaging and rest imaging, the radiation dose rate around the patients was halved at 40 cm (median values: 30.60 and 47.14 μSv/h) compared to that at the zero point (mean values: 63.42 and 101.11 μSv/h), and decreased by approximately 90% at 120 cm. At dis-

tances of 70 cm or greater, all radiation dose rates were below 25 $\mu\text{Sv/h}$, meeting relevant standard requirements. The radiation dose rates at each distance point in both stress imaging and rest imaging were higher than the background level of the surrounding environment (Z value: 2.00–16.80, all $P < 0.001$), and the radiation dose rates in rest imaging were higher than those in stress imaging ($Z = 4.54$, t values: 5.46–18.50, all $P < 0.001$). However, there was no significant difference in the radiation dose attenuation rate at each distance point between the stress imaging and rest imaging (Z values: 0.12–1.73, all $P > 0.05$), indicating that although there were differences in radiation dose rates in the two imaging, the radiation attenuation patterns were similar. **Conclusion** During the process of G-MPI for medical staff, maintaining an operating distance of more than 70 cm from patients can significantly reduce the risk of occupational radiation exposure.

【Key words】 Radiation dosage; Myocardial perfusion imaging; Technetium Tc 99m sestamibi; Medical staff

Fund program: Science and Technology Program of the Department of Science and Technology of Yunnan Province (202401AY070001-191); Kunming Health Science and Technology Talent Training and Technology Center Construction Project (2020-SW (Tech)-24); Kunming Health Science and Technology Talent Training Fund (2023-SW (Reserve)-20)

DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20250623-00210

因操作非密封性放射性核素的特性,核医学科医务人员的工作环境被定义为开放性辐射环境。门控心肌灌注显像(gated myocardial perfusion imaging, G-MPI)是冠状动脉粥样硬化性心脏病诊断、危险分层及预后评估的常用方法^[1-2],一般包括负荷和静息 2 次显像。在 G-MPI 检查流程中,医务人员需完成门控心电图导联安装、血压计佩戴与卸除、负荷试验实施及放射性药物注射等操作,均要求其已与注射放射性药物的患者进行密切且必要的近距离接触。因此,核医学科医务人员在行 G-MPI 过程中面临持续性低剂量辐射的职业暴露风险^[3-5]。然而,目前关于 G-MPI 检查中医务人员辐射暴露的相关研究较少。本研究拟采用临床可用设备测量不同距离下患者周围辐射剂量率及其衰减率,以探讨参与 G-MPI 的医务人员所受辐射暴露水平,为工作中的辐射安全管理提供参考。

资料与方法

1. 研究对象。本研究为前瞻性自身对照研究,经昆明医科大学附属延安医院医学伦理委员会审批(伦理审查批件号:2025-054-01)。采用简单随机抽样法选取 2024 年 8 月至 2024 年 10 月间于本院核医学科进行 G-MPI 的 27 例患者[男 16 例、女 11 例,年龄为(58.4 $\pm$ 11.2)岁]进行患者周围辐射剂量率测定。

2. 显像方法。患者均进行“一日法”腺苷负荷/静息 G-MPI,先行腺苷药物负荷显像,3~4 h 后行静息显像。显像剂^{99m}Tc^m-甲氧基异丁基胍(methoxy-isobutylisonitrile, MIBI)由昆明原子高科医药有限公司提供,负荷显像注射剂量为 555 MBq,静息显像注射剂量为 1 110 MBq。显像仪器为美国 GE Discovery NM/CT 670 Pro SPECT/CT 仪。负荷 G-MPI:予患者静脉持续性匀速(按体质量 140 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)

泵入腺苷注射液(杭州中美华东制药有限公司),输注 6 min,在输注 3 min 时静脉注射显像剂,全程监测患者血压、心率、心电图变化及可能出现的不良反应,注射显像剂后 0.5 h 嘱患者进餐脂餐,1.5 h 后采集图像。静息 G-MPI 除不注射腺苷外,其余步骤同负荷 G-MPI。

3. 患者周围辐射剂量率测定。辐射剂量率测定仪器为 JB400(A)型 X- γ 辐射仪(上海精博工贸有限公司),其能量范围为 20 keV ~ 7 MeV,测量范围为 10 nSv/h ~ 30 mSv/h。医务人员穿戴防护措施(铅衣、铅眼镜、铅围脖),在患者上机时刻(注射显像剂后 1.5 h)、患者平卧检查床时,以患者左侧腋中线为辐射源中心(零点),沿零点水平方向每 10 cm 测定 1 个点的辐射剂量率,共测定 20 个点。X- γ 辐射仪在每例患者每个距离点采集 10 s,采取直接读数法记录每个距离点的辐射剂量率,重复测量 3 次,取均值,保留 2 位小数。另外,在每例患者每次进入机房前,测定机房环境本底辐射水平:用 X- γ 辐射仪在垂直于地平面 1 m 处采集,采集方式及读数同上操作。

4. 医务人员受照剂量估算。根据所测剂量率数据,利用外照射人均有效剂量公式^[6],估算医务人员的受照剂量: $E = H_t \times t \times 10^{-6}$,其中 E 为人均年有效剂量(mSv), H_t 为辐射剂量率(nSv/h), t 为辐射照射时间(h)。

5. 统计学分析。使用 IBM SPSS Statistics 24.0 软件分析数据。符合正态分布的定量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,不符合正态分布的定量资料以 $M(Q_1, Q_3)$ 表示。采用配对 t 检验或 Wilcoxon 符号秩检验对 2 次显像各距离点的辐射剂量率进行比较,采用 Mann-Whitney U 检验对 2 次显像与周围环境本底水平进行比较,以双侧检验 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

1. 负荷显像患者周围辐射剂量率。腺苷负荷显像时,平均辐射剂量率在零点处为 63.42 $\mu\text{Sv/h}$,距离患者体表 10 cm 处为 54.59 $\mu\text{Sv/h}$ 。随着距离增加,辐射剂量率逐渐下降;距离体表 40 cm 处降至约一半,为 30.60 $\mu\text{Sv/h}$ (中位值),衰减率为 51.75%;70 cm 以外衰减幅度趋于平缓,160 cm 处降至 3.48 $\mu\text{Sv/h}$ (均值),衰减率为 94.51%;200 cm 处降至 2.02 $\mu\text{Sv/h}$ (中位值),衰减率为 96.82%(表 1,图 1)。

2. 静息显像患者周围辐射剂量率。静息显像时,平均辐射剂量率在零点处为 101.11 $\mu\text{Sv/h}$,距离体表 10 cm 处为 85.31 $\mu\text{Sv/h}$,距离体表 40 cm 处降至约一半,为 47.14 $\mu\text{Sv/h}$ (中位值),衰减率为 53.38%;80 cm 以外衰减幅度趋于平缓,160 cm 处降至 5.28 $\mu\text{Sv/h}$ (均值),衰减率为 94.78%;200 cm 处降至 3.43 $\mu\text{Sv/h}$ (中位值),衰减率为 96.61%(表 1,图 2)。

3. 组间比较结果。从数值看,静息显像时各距离点辐射剂量率均高于腺苷负荷显像(首次显像)。由于距离点较多,等距选择零点及 20、40、60、80、100、120、140、160、180、200 cm 共 11 个距离点辐射剂量率进行 2 次显像的组间比较,结果显示差异有统

表 1 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI 腺苷负荷/静息 G-MPI 各距离点患者周围辐射剂量率的组间比较

距离点	辐射剂量率 [$\mu\text{Sv/h}$; $\bar{x}\pm s$ 或 $M(Q_1, Q_3)$]		检验值	P 值
	负荷显像	静息显像		
零点	63.42 $\pm$ 10.19	101.11 $\pm$ 9.75	18.50 ^a	<0.001
20 cm	46.37 $\pm$ 8.33	70.27 $\pm$ 8.61	14.12 ^a	<0.001
40 cm	30.60(21.69, 31.38)	47.14(41.07, 54.19)	4.54 ^b	<0.001
60 cm	17.11 $\pm$ 4.59	27.55 $\pm$ 5.26	7.84 ^a	<0.001
80 cm	10.85 $\pm$ 3.01	15.34 $\pm$ 2.17	7.84 ^a	<0.001
100 cm	7.73 $\pm$ 1.86	11.22 $\pm$ 1.64	5.46 ^a	<0.001
120 cm	6.34 $\pm$ 1.34	8.55 $\pm$ 0.97	6.35 ^a	<0.001
140 cm	4.78 $\pm$ 0.84	6.54 $\pm$ 0.80	7.73 ^a	<0.001
160 cm	3.48 $\pm$ 0.54	5.28 $\pm$ 0.59	10.94 ^a	<0.001
180 cm	2.60 $\pm$ 0.40	4.22 $\pm$ 0.43	12.87 ^a	<0.001
200 cm	2.02(1.88, 2.16)	3.43(3.19, 3.55)	4.54 ^b	<0.001

注: MIBI 为甲氧基异丁基异腈, G-MPI 为门控心肌灌注显像; ^a 为 t 值, ^b 为 Z 值

计学意义($Z=4.54$, t 值: 5.46~18.50, 均 $P<0.001$); 2 次显像的辐射剂量率均明显高于环境本底水平[0.03(0.02, 0.03) $\mu\text{Sv/h}$; Z 值: 2.00~16.80, 均 $P<0.001$]; 2 次显像之间在各处辐射剂量衰减率差异均无统计学意义(Z 值: 0.12~1.73, 均 $P>0.05$)。具体数据见表 1、2。

4. 医务人员年均受照剂量估算。以本研究实测

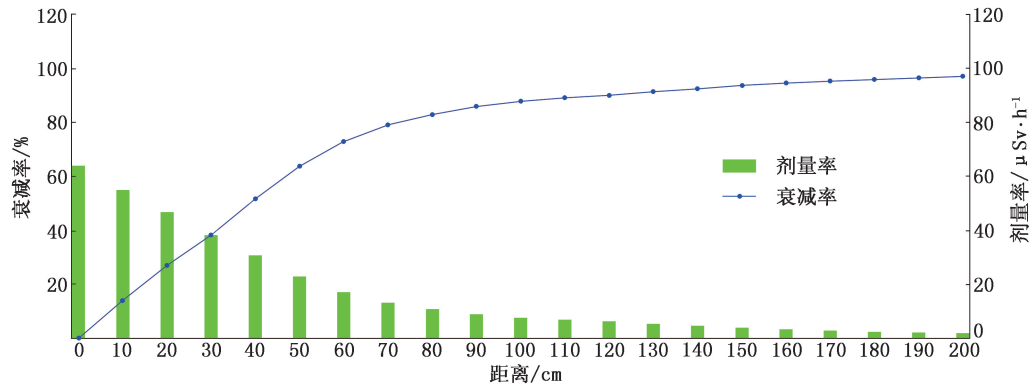


图 1 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -甲氧基异丁基异腈(MIBI)负荷显像不同距离下患者周围辐射剂量率及其衰减率

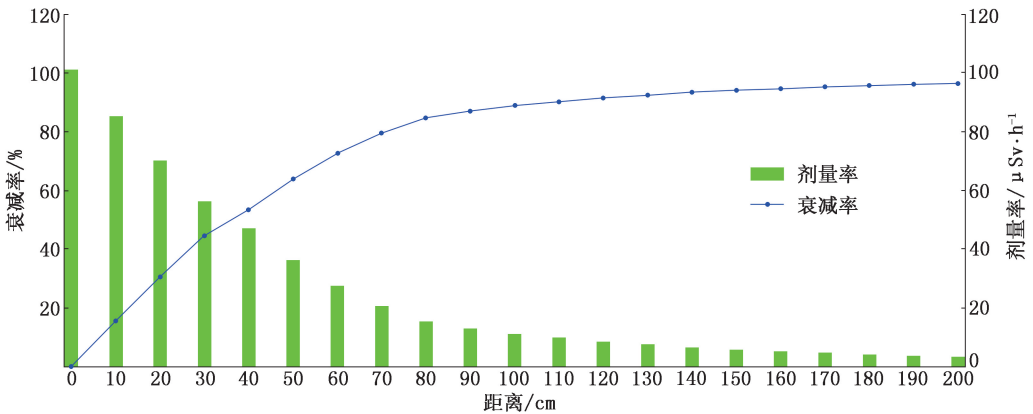


图 2 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI 静息显像不同距离下患者周围辐射剂量率及其衰减率

表 2 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI 腺苷负荷/静息 G-MPI 各距离点患者周围辐射剂量率的衰减率组间比较

距离点	衰减率[%; $M(Q_1, Q_3)$]		Z 值	P 值
	负荷显像	静息显像		
20 cm	26.88(23.95, 35.11)	30.50(22.80, 34.05)	0.70	0.486
40 cm	51.75(46.00, 60.28)	53.38(47.34, 56.88)	0.94	0.349
60 cm	73.02(67.02, 77.48)	72.75(67.29, 74.45)	0.12	0.904
80 cm	82.89(78.20, 86.12)	84.82(81.98, 85.70)	1.32	0.186
100 cm	87.81(85.26, 90.41)	88.90(88.17, 90.86)	0.43	0.665
120 cm	90.01(88.51, 92.54)	91.54(91.07, 92.63)	0.12	0.904
140 cm	92.46(91.61, 93.80)	93.53(92.40, 94.13)	1.73	0.084
160 cm	94.51(93.69, 94.80)	94.78(93.91, 95.10)	0.70	0.486
180 cm	95.90(95.20, 96.25)	95.83(95.49, 95.93)	0.43	0.665
200 cm	96.82(96.23, 97.01)	96.61(96.21, 96.68)	1.73	0.084

注:MIBI 为甲氧基异丁基异腈,G-MPI 为门控心肌灌注显像

零点处平均辐射剂量率 63.42 $\mu\text{Sv/h}$ (负荷显像)、101.11 $\mu\text{Sv/h}$ (静息显像) 计算,每次接触时间约 2 min,医务人员每次 G-MPI 辐射受照剂量为 2.11 μSv (负荷显像) 和 3.37 μSv (静息显像)。而实际操作距离至少 10 cm,以实测 10 cm 处平均辐射剂量率 54.59 $\mu\text{Sv/h}$ (负荷显像)、85.31 $\mu\text{Sv/h}$ (静息显像) 计算,医务人员每次 G-MPI 辐射受照剂量为 1.82 μSv (负荷显像) 和 2.84 μSv (静息显像)。假设每天行 4 人次 G-MPI,全年按 250 d 计,即该项目全年运行时间最长约 33.3 h,工作人员受照射的年有效剂量估算值约为 1.82 mSv (负荷显像) 和 2.84 mSv (静息显像),2 次显像估算年有效剂量总和为 4.66 mSv。

讨 论

G-MPI 所用放射性核素 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 在衰变中释放的 γ 射线能量适中 (140 keV)、半衰期短 (6.02 h)、不带电粒子辐射,所以受检者的累积辐射剂量较小。然而,核医学科医务人员在工作中不可避免地受患者外照射。确定最佳操作距离以明显降低辐射暴露风险,是辐射防护的关键。本研究通过对 G-MPI 显像不同距离下患者周围辐射剂量率的监测,针对上述问题进行了探讨。评估核医学科医务人员外照射所致慢性低剂量辐射损伤的敏感指标 (如外周血淋巴细胞微核率),需要专用设备^[7]。因此,本研究使用科室自用设备 X- γ 辐射仪进行辐射剂量率监测。

在本研究中,无论是首次 (腺苷负荷) 显像还是第 2 次 (静息) 显像,辐射剂量率均随距离增加而下降。在距离受检者 40 cm 处,辐射剂量率即可减半,而在 160 cm 处,辐射剂量率约衰减 94%。本研究还发现,辐射剂量率衰减随距离增加显著下降,但并非完全与距离平方成反比,在 70 cm (负荷显像) 或

80 cm (静息显像) 以外的距离,衰减幅度趋于平缓,原因在于 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 在患者体内分布不均匀,不能完全视为一个标准点源,且射线在体外与空气发生电离作用,理论计算值不能完全代替实测值。总之,在注射放射性药物的剂量和接触时间不变的情况下,医务人员的辐射暴露很大程度取决于医务人员和受检者之间的距离。依据放射防护标准^[8],周围剂量辐射率控制目标值应不大于 25 $\mu\text{Sv/h}$,本研究测定结果显示:首次显像距离患者 50 cm 及以上,第 2 次显像距离患者 70 cm 及以上,周围辐射剂量率均低于 25 $\mu\text{Sv/h}$ 。因此,2 次显像过程中,医务人员与患者保持 70 cm 及以下的操作距离,即可达到安全防护效果。

本研究估算医务人员受照剂量时,设定条件为医务人员与受检者接触距离 10 cm,平均每次接触时间约 2 min,每天进行 G-MPI 4 人次,全年计 250 d,得到工作人员受照射的年有效剂量估算值约为 1.82 mSv (负荷显像) 和 2.84 mSv (静息显像),满足 GB 18871—2002 中的剂量限值的要求^[9],同时也符合生态环境主管部门规定的年剂量管理约束值 (5 mSv) 的要求。另外,之前有文献报道医务人员在每次 G-MPI 中受到的辐射暴露量为 0.2~3 μSv ^[10],与本研究中 2 次显像的 1.82 和 2.84 μSv 类似。临床实践中,考虑到医务人员提高操作熟练度后可减少辐射暴露时间,使每次检查与 G-MPI 受检者接触的时间小于 2 min,以及工作需要轮岗、实际操作距离大于 10 cm 等因素,实际年有效剂量会低于估算值 4.66 mSv。

本研究中,第 2 次显像与首次显像在不同距离下辐射剂量率的衰减率无明显差异,但第 2 次显像在同距离下的辐射剂量率明显高于第 1 次显像。主要原因在于:第 2 次显像使用的药物剂量高于首次显像,且患者体内仍有放射性药物残留。该结果提示,在进行 G-MPI 特别是第 2 次显像时,医务人员在做好屏蔽防护的同时,应注意时间防护和距离防护,可减少辐射暴露。

新设备的投入使用也可减少辐射剂量。例如,碲锌镉 SPECT 与传统 SPECT 相比,G-MPI 检查减少了 35% 的患者剂量 (880.6 与 1 350.5 MBq)^[11],而患者的剂量与医务人员的辐射暴露剂量密切相关。另外,佩戴个人剂量计 (带即时剂量警报的电子剂量计) 可以准确记录辐射暴露剂量,还可提醒医务人员是否处于高剂量区域,从而采取纠正措施^[11]。总之,为了最小化 G-MPI 医务人员的外照射辐射暴露风险,医疗机构需要实施全面的辐射防护计划,包

括风险评估、暴露水平检测、暴露记录维护以及提供适当的培训和防护设备^[11]。

本研究的局限性:(1)为小样本、单中心研究,且只进行了辐射剂量率检测。后期可加入个人剂量监测仪对医务人员外照射的辐射剂量数据,进行更加深入的研究,并可对周围环境辐射剂量率与个人剂量之间的相关性进行分析,使得研究更具有说服力。另外,未来可使用辐射暴露的生物标志物来确定个体的实际生物学作用,有助于更准确、更全面的评估。(2)本研究中未区分医师、技师及护理人员等不同岗位的暴露差异,后期研究可加以细化,从而更合理地实施防护管理。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 吴琪燕:研究设计、论文撰写、数据整理及统计学分析;郑贤东、洪丽菊、杨蕊、陈丹丹、谢小东、任维嘉:论文审阅;吴飞鹏:论文审阅、经费支持;周友俊:研究指导、论文修改、经费支持

参 考 文 献

- [1] 中华医学会核医学分会《SPECT 心肌灌注显像技术与图像操作要点专家共识(2019 版)》编写委员会,中华医学核医学分会“基于中国正常人群的心肌灌注 SPECT 定量分析多中心研究”项目组. SPECT 心肌灌注显像技术与图像处理要点专家共识(2019 版)[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2020, 40(1): 32-36. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2020.01.007.
Writing Committee of Chinese Society of Nuclear Medicine for the 2019 Expert Consensus for Key Points of Technique and Image Process during SPECT Myocardial Perfusion Imaging, Chinese Society of Nuclear Medicine Expert Group of Multi-center Study on Quantitative Analysis of SPECT Myocardial Perfusion Imaging in Normal Chinese Population. 2019 Expert consensus for key points of technique and image process during SPECT myocardial perfusion imaging[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2020, 40(1): 32-36. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2020.01.007.
- [2] Gimelli A, Achenbach S, Buechel RR, et al. Strategies for radiation dose reduction in nuclear cardiology and cardiac computed tomography imaging: a report from the European Association of Cardiovascular Imaging (EACVI), the Cardiovascular Committee of European Association of Nuclear Medicine (EANM), and the European Society of Cardiovascular Radiology (ESCR)[J]. Eur Heart J, 2018, 39(4): 286-296. DOI:10.1093/eurheartj/ehx582.
- [3] Matusiak K, Wolna J, Jung A, et al. Impact of the frequency and type of procedures performed in nuclear medicine units on the expected radiological hazard[J]. Int J Environ Res Public Health, 2023, 20(6): 5206. DOI:10.3390/ijerph20065206.
- [4] Balasubramanian D, Agraharam G, Girigoswami A, et al. Multiple radiations and its effect on biological system—a review on *in vitro* and *in vivo* mechanisms[J]. Ann Med, 2025, 57(1): 2486595. DOI:10.1080/07853890.2025.2486595.
- [5] Andreadi A, Andreadi S, Cerilli M, et al. Occupational radiation exposure and thyroid nodules in healthcare workers: a review[J]. Int J Mol Sci, 2025, 26(13): 6522. DOI:10.3390/ijms26136522.
- [6] 何叶娜,江岳.移动式头颅 CT 应用场所辐射的环境监测与评价[J].皮革制作与环保科技, 2024, 5(15): 187-189,193. DOI:10.20025/j.cnki.CN10-1679.2024-15-65.
He YN, Jiang Y. Mobile head CT scanner application site radiation environment monitoring and evaluation [J]. Leather Manufacture and Environmental Protection Technology, 2024, 5(15): 187-189,193. DOI:10.20025/j.cnki.CN10-1679.2024-15-65.
- [7] Mbutu-Austin I, Modarai B, Ainsbury E, et al. Potential biomarkers of chronic low-dose radiation exposure for nuclear medicine technologists[J]. Int J Radiat Biol, 2025, 101(5): 453-466. DOI:10.1080/09553002.2025.2470225.
- [8] 中华人民共和国国家卫生健康委员会.核医学放射防护要求: GBZ 120—2020[S].北京:中国标准出版社, 2020: 7.
National Health Commission of the People's Republic of China. Requirements for radiological protection in nuclear medicine: GBZ 120—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020: 7.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.电离辐射防护与辐射源安全基本标准: GB 18871—2002[S].北京:中国标准出版社, 2002: 35.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Basic standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources: GB 18871—2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002: 35.
- [10] Fujii K, Mizuguchi Y, Oguri K, et al. Radiation exposure of medical staff conducting stress myocardial perfusion imaging[J]. Ann Nucl Cardiol, 2021, 7(1): 67-72. DOI:10.17996/anc.21-00134.
- [11] 潘青青,罗亚平,李方.降低核素心肌灌注显像辐射剂量的方法[J].中华核医学与分子影像杂志, 2017, 37(8): 514-521. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2017.08.018.
Pan QQ, Luo YP, Li F. Approaches to reducing radiation dose from radionuclide myocardial perfusion imaging[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2017, 37(8): 514-521. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2017.08.018.

(收稿日期:2025-06-23)