

利用CZT SPECT进行双核素双动态心脏显像定量分析的可行性研究

Feasibility study of quantitative analysis in dual-isotope and dual-dynamic cardiac imaging using CZT SPECT

Ren Junling, Zhang Zongyao, Wang Xiaodi, Wang Lei, Fang Wei

引用本文:

任俊灵, 张宗耀, 王小迪, 等. 利用CZT SPECT进行双核素双动态心脏显像定量分析的可行性研究[J]. 国际放射医学核医学杂志, 2024, 48(1): 30–37. DOI: 10.3760/cma.j.cn121381–202309002–00385

Ren Junling, Zhang Zongyao, Wang Xiaodi, et al. Feasibility study of quantitative analysis in dual-isotope and dual-dynamic cardiac imaging using CZT SPECT[J]. *International Journal of Radiation Medicine and Nuclear Medicine*, 2024, 48(1): 30–37. DOI: 10.3760/cma.j.cn121381–202309002–00385

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381–202309002–00385>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

PET心肌灌注显像及其定量分析的研究进展

The research progress of myocardial perfusion and its quantitative analysis with PET

国际放射医学核医学杂志. 2017, 41(6): 423–429 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673–4114.2017.06.008>

SPECT定量心肌血流及冠状动脉血流储备的研究进展

Research progress of quantifying myocardial flow and coronary flow reserve with SPECT

国际放射医学核医学杂志. 2019, 43(2): 160–165 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673–4114.2019.02.011>

双源CT双能量心肌血池成像的应用及研究进展

Application and research progress of dual-energy myocardial blood pool imaging by dual-source computed tomography

国际放射医学核医学杂志. 2018, 42(2): 173–176 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673–4114.2018.02.013>

心肌灌注显像联合冠状动脉钙化积分诊断冠心病的价值及最新进展

Clinical value and latest developments of coronary artery calcification scores and gated myocardial perfusion imaging in the diagnosis of coronary artery disease

国际放射医学核医学杂志. 2017, 41(2): 143–149 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673–4114.2017.02.012>

¹⁸F-FDG胸部符合线路SPECT/CT半定量分析与PET/CT的对比研究

Semi-quantitative ¹⁸F-FDG Co-SPECT/CT: A competitive study with ¹⁸F-FDG PET/CT of chest

国际放射医学核医学杂志. 2019, 43(3): 210–216 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673–4114.2019.03.003>

门控心肌灌注显像负荷总积分及相位分析对冠状动脉病变程度的评估价值

Assessment of the value of summed stress score and phase analysis of gated myocardial perfusion imaging in the severity of coronary artery lesion

国际放射医学核医学杂志. 2018, 42(2): 115–120 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673–4114.2018.02.004>

·心血管核医学技术诊疗应用· 利用 CZT SPECT 进行双核素双动态心脏 显像定量分析的可行性研究

任俊灵 张宗耀 王小迪 汪蕾 方伟

北京协和医学院, 国家心血管病中心, 中国医学科学院阜外医院核医学科,
北京 100037

通信作者: 方伟, Email: nuclearfw@126.com

【摘要】目的 探讨利用碲锌镉(CZT)SPECT进行 ^{99m}Tc -甲氧基异丁基异腈(MIBI)/ ^{123}I -间碘苄胍(MIBG)双核素双动态心脏显像,完成定量分析的可行性。**方法** 对2021年10月至2023年6月于中国医学科学院阜外医院治疗的24例心功能不全患者进行前瞻性研究,其中男性14例、女性10例,年龄(49.2±16.8)岁。所有患者均于第1日先行 ^{99m}Tc -MIBI单核素动态SPECT心脏显像;第2日行 ^{99m}Tc -MIBI/ ^{123}I -MIBG双核素双动态SPECT心脏显像,并进行完整物理校正和非完整物理校正。比较 ^{99m}Tc -MIBI单核素动态SPECT心脏显像与 ^{99m}Tc -MIBI/ ^{123}I -MIBG双核素双动态SPECT心脏显像计算获得的整体左心室(LV)和冠状动脉左前降支(LAD)、左回旋支(LCX)、右冠状动脉(RCA)支配区域心肌血流量(MBF)的差异,以及两种显像方法的相关性和一致性。采用Wilcoxon秩和检验比较 ^{99m}Tc -MIBI单核素动态SPECT心脏显像与 ^{99m}Tc -MIBI/ ^{123}I -MIBG双核素双动态SPECT心脏显像获得的LV和LAD、LCX、RCA支配区域MBF的差异。采用Pearson相关性分析及Bland-Altman法分析两种显像方法得到的MBF的相关性和一致性。**结果** ^{99m}Tc -MIBI单核素动态SPECT心脏显像与进行完整物理校正的 ^{99m}Tc -MIBI/ ^{123}I -MIBG双核素双动态SPECT心脏显像计算获得的LV的MBF分别为0.74(0.64, 0.79) ml·min⁻¹·g⁻¹和0.74(0.64, 0.80) ml·min⁻¹·g⁻¹, LAD支配区域的MBF分别为0.72(0.68, 0.82) ml·min⁻¹·g⁻¹和0.74(0.64, 0.84) ml·min⁻¹·g⁻¹, LCX支配区域的MBF分别为0.73(0.66, 0.80) ml·min⁻¹·g⁻¹和0.74(0.61, 0.79) ml·min⁻¹·g⁻¹, RCA支配区域的MBF分别为0.77(0.64, 0.82) ml·min⁻¹·g⁻¹和0.77(0.66, 0.82) ml·min⁻¹·g⁻¹。两者LV和LAD、LCX、RCA支配区域MBF的差异均无统计学意义($Z=-1.349$ 、 -0.396 、 -0.350 、 -1.126 , 均 $P>0.05$)。 ^{99m}Tc -MIBI单核素动态SPECT心脏显像与进行完整物理校正的 ^{99m}Tc -MIBI/ ^{123}I -MIBG双核素双动态SPECT心脏显像获得的LV和LAD、LCX、RCA支配区域的MBF均有较好的相关性($r=0.857$ 、 0.832 、 0.708 、 0.815 , 均 $P<0.001$)。 ^{99m}Tc -MIBI单核素动态SPECT心脏显像与进行完整物理校正的 ^{99m}Tc -MIBI/ ^{123}I -MIBG双核素双动态SPECT心脏显像计算获得的LV和LAD、LCX、RCA支配区域的MBF的平均差值为0.023、0.016、0.008、0.040 ml·min⁻¹·g⁻¹, 95%CI分别为-0.125~0.170、-0.196~0.228、-0.181~0.196、-0.193~0.271, 两者的一致性较好。**结论** 利用CZT SPECT行 ^{99m}Tc -MIBI/ ^{123}I -MIBG双核素双动态SPECT心脏显像,在经过完整物理校正后,能够得到与 ^{99m}Tc -MIBI单核素动态SPECT显像较为一致的MBF,通过一次检查完成MBF和心脏交感神经的定量分析是可行的。

【关键词】 冠状动脉疾病; 心肌灌注显像; 心肌血流量; 体层摄影术, 发射型计算机, 单光子; ^{99m}Tc 甲氧基异丁基异腈; ^{123}I -间碘苄胍; 散射校正

DOI: [10.3760/cma.j.cn121381-202309002-00385](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202309002-00385)

Feasibility study of quantitative analysis in dual-isotope and dual-dynamic cardiac imaging using CZT SPECT

Ren Junling, Zhang Zongyao, Wang Xiaodi, Wang Lei, Fang Wei

Peking Union Medical College, National Center for Cardiovascular Diseases, Department of Nuclear Medicine, Fuwai Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences, Beijing 100037, China

Corresponding author: Fang Wei, Email: nuclearfw@126.com

【Abstract】 Objective To explore the feasibility of quantitative analysis in $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -methoxyisobutylisonitrile (MIBI)/ ^{123}I -metaiodobenzylguanidine (MIBG) dual-isotope and dual-dynamic cardiac imaging using cadmium zinc telluride (CZT) SPECT. **Methods** Twenty-four patients (14 males and 10 females) aged (49.2±16.8) years with cardiac dysfunction were prospectively enrolled from October 2021 to June 2023 at Fuwai Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences. All the patients underwent $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI single-isotope dynamic cardiac imaging (referred to as single-isotope imaging) on the first day and $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI/ ^{123}I -MIBG dual-isotope dual-dynamic cardiac imaging (referred to as dual-isotope imaging) on the second day. And complete physical correction and incomplete-physical correction were performed. Myocardial blood flow (MBF) for left ventricle (LV), left anterior descending branch (LAD), left circumflex branch (LCX), and right coronary artery (RCA) dominant area was quantified. Differences, correlation, and agreement of these parameters from two imaging methods were analyzed using Wilcoxon rank sum test, Pearson correlation test, and Bland-Altman analysis. **Results** The MBF of LV and LAD, LCX, RCA dominant area of single-isotope imaging and dual-isotope imaging with complete physical correction were 0.74 (0.64, 0.79) $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ vs. 0.74 (0.64, 0.80) $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$, 0.72 (0.68, 0.82) $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ vs. 0.74 (0.64, 0.84) $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$, 0.73 (0.66, 0.80) $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ vs. 0.74 (0.61, 0.79) $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$, and 0.77 (0.64, 0.82) $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ vs. 0.77 (0.66, 0.82) $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. The differences were not statistically significant ($Z=-1.349$, -0.396 , -0.350 , -1.126 ; all $P>0.05$). The MBF of LV and LAD, LCX, RCA dominant area between single-isotope imaging and dual-isotope imaging with complete physical correction showed good correlations ($r=0.857$, 0.832 , 0.708 , 0.815 ; all $P<0.001$). The MBF mean differences of LV and LAD, LCX, RCA dominant area between single-isotope imaging and dual-isotope imaging with complete physical correction were 0.023, 0.016, 0.008, 0.040 $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$, and the 95% confidence intervals were -0.125 to 0.170 , -0.196 to 0.228 , -0.181 to 0.196 , and -0.193 to 0.271 , respectively. The agreement between the two acquisition methods was good. **Conclusions** CZT-SPECT can be used to obtain comparable MBF between single-isotope imaging and dual-isotope cardiac imaging on the basis of complete physical correction. It is feasible to conduct a quantitative analysis of MBF and cardiac sympathetic nervous system through a single examination.

【 Key words 】 Coronary artery disease; Myocardial perfusion imaging; Myocardial blood flow; Tomography, emission-computed, single-photon; Technetium Tc 99m sestamibi; 3-iodobenzylguanidine; Scatter correction

DOI: 10.3760/cma.j.cn121381-202309002-00385

近年来,基于SPECT的心脏动态显像定量分析技术已逐步成熟并开始应用于临床。与传统的静态显像定性分析技术相比,定量分析技术更能满足临床精准诊断的迫切需求,在诊断准确率方面具有明显的优势。与传统的定性诊断技术相比,SPECT心肌灌注显像心肌血流定量分析技术诊断心肌缺血的灵敏度有了显著的提高^[1-3];SPECT心脏神经显像也逐步建立了能够用于心脏疾病诊断和预后评估的定量指标^[4-7]。传统的定性诊断技术与SPECT心肌灌注显像心肌血流定量分析技术联合应用能够进一步提高对心肌损伤的诊断效能,对因冠状动脉痉挛引起的一过性心肌缺血、急性心肌梗死后恶性心律

失常等不良预后事件的预测等都有较好的诊断价值^[8-9]。

另一方面,SPECT显像的性能也在不断提高。与传统SPECT相比,碲锌镉(cadmium zinc telluride, CZT)心脏专用SPECT(简称CZT SPECT)具有更优越的物理性能,其探测灵敏度、空间分辨率和能量分辨率均明显提高,能够对能峰较为接近的 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 和 ^{123}I 信号进行有效地鉴别,从而实现双核素显像,明显提高了诊断效率^[10]。已有研究人员对 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI/ ^{123}I -间碘苄胍(metaiodobenzylguanidine, MIBG)双核素心肌灌注/交感神经显像的可行性进行了探索,结果表明CZT SPECT能够较好地辨别 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI和 ^{123}I -MIBG信号,有效避免双核素

间的干扰,一次检查可以同时得到较为清晰的 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI心肌灌注显像和 ^{123}I -MIBG心脏交感神经图像^[11-13]。本研究在上述研究的基础上,进一步利用CZT SPECT进行 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI/ ^{123}I -MIBG双核素双动态心脏显像定量分析,探讨双核素采集对心脏定量分析指标是否会产生显著的影响,从而确定这一技术在临床中应用的可行性。

1 资料与方法

1.1 一般资料

对2021年10月至2023年6月于中国医学科学院阜外医院治疗的24例心功能不全患者进行前瞻性研究,其中男性14例、女性10例,年龄(49.2±16.8)岁。纳入标准:心功能不全患者(射血分数<50%);年龄18~80岁。排除标准:妊娠和哺乳期女性。所有患者均于检查前签署了知情同意书。本研究获得了中国医学科学院阜外医院伦理委员会的批准(批准号:2021-1589)。

1.2 显像方法

所有患者均采用美国通用电气公司Discovery NM 530 c型CZT心脏专用SPECT进行双核素双动态心脏显像。显像前24 h患者口服碘剂(中国医学科学院阜外医院院内制剂)封闭甲状腺。第1日行 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI单核素动态SPECT心脏显像。动态显像前患者平躺于检查床,预注射 3.7×10^7 Bq $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI(北京原子高科股份有限公司)用于心脏定位,并测量静息心率与血压。动态显像采用列表模式,共采集10 min,采集开始10 s后,立即通过静脉“弹丸”式注射 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI 7.4×10^8 Bq。动态采集完成后,患者移至美国通用电气公司Optima 640型SPECT/CT进行低剂量CT扫描,用于组织衰减校正。第2日行 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI/ ^{123}I -MIBG双核素双动态SPECT心脏显像。显像前患者同样预注射 3.7×10^7 Bq $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI用于心脏定位,并测量静息心率与血压。动态显像采用列表模式,共采集20 min,采集开始10 s后,通过静脉“弹丸”式注射 ^{123}I -MIBG(北京原子高科股份有限公司) 3.7×10^8 Bq,10 min后再“弹丸”式注射 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI 7.4×10^8 Bq。

1.3 图像处理

1.3.1 列表模式数据重分

$^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI单核素动态SPECT心脏显像的列表模式数据按照10帧×10 s+5帧×20 s+6帧×60 s的方

式重分,重分能窗包括主峰能窗(131.6~148.4 keV)和下散射窗(118.5~138.5 keV)。 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI/ ^{123}I -MIBG双核素双动态SPECT心脏显像的列表模式数据也按照10帧×10 s+5帧×20 s+6帧×60 s的方式重分, ^{123}I -MIBG显像重分能窗包括主峰能窗(149.5~168.5 keV)、下散射窗(131.6~148.4 keV)及准直器穿透能窗(169.0~188.0 keV); $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI显像重分能窗包括主峰能窗(131.6~148.4 keV)和下散射窗(118.5~138.5 keV)。

1.3.2 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI动态SPECT的图像重建和物理校正

图像重建采用有序子集最大期望值法,共35次迭代,2个子集。第1日 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI单核素动态SPECT心脏显像采用的物理校正包括核素衰变校正、组织衰减校正、散射校正、空间分辨率校正及图像噪声校正,并将像素值转换为物理单位(Bq/ml)。 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI自身的散射校正采用 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI主峰能窗图像减去下散射窗图像的散射分量。第2日 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI/ ^{123}I -MIBG双核素双动态SPECT心脏显像的图像重建方法与第1日相似,其中核素衰变校正、组织衰减校正、空间分辨率校正及图像噪声校正与第1日方法相同,但散射校正不同。 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI的散射校正包括两部分,其中 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI自身的散射校正与第1日相同,除此之外,还需要在心肌同时存在 ^{123}I -MIBG和 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI摄取时校正 ^{123}I -MIBG对 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI的下散射干扰和准直器穿透干扰。校正方法为采用 ^{123}I -MIBG下散射窗预估 ^{123}I -MIBG对 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI的下散射干扰和准直器穿透干扰程度,由此对 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI主峰能窗图像进行校正。为验证 ^{123}I -MIBG对 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI的下散射干扰和准直器穿透干扰的影响,按物理校正方法不同分别对所有患者的 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI/ ^{123}I -MIBG双核素双动态SPECT心脏显像的原始图像进行完整物理校正和非完整物理校正。完整物理校正包括核素衰变校正、组织衰减校正、散射校正、空间分辨率校正、图像噪声校正、下散射干扰和准直器穿透干扰校正;非完整物理校正不进行下散射干扰和准直器穿透干扰校正。

1.3.3 SPECT心肌血流定量

第1日和第2日的 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI动态SPECT心脏显像图像通过三维采样生成心血池与心肌的时间-放射性活度曲线,将时间-放射性活度曲线用单组织双腔室动力学模型进行拟合,计算心肌摄取速

率参数 K1, 将⁹⁹Tc^m-MIBI 心肌放射性计数转换为心肌血流量(myocardial blood flow, MBF), 并以静息心率和血压的乘积进行校正。MBF 包括: 整体左心室(left ventricle, LV)和冠状动脉左前降支(left anterior descending branch, LAD)、左回旋支(left circumflex branch, LCX)、右冠状动脉(right coronary artery, RCA)支配区域 MBF。所有动态 SPECT 心脏显像图像的重建、物理校正和心肌血流的定量分析均应用 MyoFlowQ 软件(北京百灵云生物医学科技有限公司)完成。

1.4 统计学方法

应用 IBM SPSS 21.0 软件对数据进行统计学分析。不符合正态分布的计量资料以 $M(Q_1, Q_3)$ 表示, 采用 Wilcoxon 秩和检验比较⁹⁹Tc^m-MIBI 单核素动态 SPECT 心脏显像与⁹⁹Tc^m-MIBI/¹²³I-MIBG 双核素双动态 SPECT 心脏显像获得的 LV 和 LAD、LCX、RCA 支配区域 MBF 的差异。采用 Pearson 相关性分析及 Bland-Altman 法分析两种显像方法得到的 MBF 的相关性和一致性。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 ⁹⁹Tc^m-MIBI 单核素动态 SPECT 心脏显像与进行完整物理校正、非完整物理校正的⁹⁹Tc^m-MIBI/¹²³I-MIBG 双核素双动态 SPECT 心脏显像 MBF 的比较

由表 1 可知, ⁹⁹Tc^m-MIBI 单核素动态 SPECT 心脏显像与进行完整物理校正的⁹⁹Tc^m-MIBI/¹²³I-MIBG 双核素双动态 SPECT 心脏显像获得的 LV 和 LAD、

LCX、RCA 支配区域的 MBF 的差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$)。⁹⁹Tc^m-MIBI 单核素动态 SPECT 心脏显像与进行非完整物理校正的⁹⁹Tc^m-MIBI/¹²³I-MIBG 双核素双动态 SPECT 心脏显像获得的 LV 和 LAD、LCX、RCA 支配区域的 MBF 的差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$)。

2.2 ⁹⁹Tc^m-MIBI 单核素动态 SPECT 心脏显像与进行完整物理校正的⁹⁹Tc^m-MIBI/¹²³I-MIBG 双核素双动态 SPECT 心脏显像获得的 MBF 的相关性和一致性分析

如图 1 所示, ⁹⁹Tc^m-MIBI 单核素动态 SPECT 心脏显像与进行完整物理校正的⁹⁹Tc^m-MIBI/¹²³I-MIBG 双核素双动态 SPECT 心脏显像获得的 LV 和 LAD、LCX、RCA 支配区域的 MBF 均有较好的相关性(均 $P < 0.001$)。如图 2 所示, 2 种方法获得的 LV 和 LAD、LCX、RCA 支配区域的 MBF 的平均差值为 0.023、0.016、0.008、0.040 ml·min⁻¹·g⁻¹, 95%CI 分别为 -0.125~0.170、-0.196~0.228、-0.181~0.196、-0.193~0.271。⁹⁹Tc^m-MIBI 单核素动态 SPECT 心脏显像与进行完整物理校正的⁹⁹Tc^m-MIBI/¹²³I-MIBG 双核素双动态 SPECT 心脏显像获得的 LV 和 LAD、LCX、RCA 支配区域的 MBF 均有较好的相关性和一致性。

3 讨论

在本研究中, 我们发现, 使用 CZT SPECT 进行的⁹⁹Tc^m-MIBI/¹²³I-MIBG 双核素双动态 SPECT 心脏显像经过散射校正后, 较高能量的¹²³I-MIBG 信号不会对⁹⁹Tc^m-MIBI 心肌血流量定量产生明显的影响。

表 1 心功能不全患者⁹⁹Tc^m-MIBI 单核素动态 SPECT 心脏显像与进行完整物理校正、非完整物理校正的⁹⁹Tc^m-MIBI/¹²³I-MIBG 双核素双动态 SPECT 心脏显像获得的心肌血流量的比较 [ml·min⁻¹·g⁻¹, $M(Q_1, Q_3)$]

Table 1 Comparison of myocardial blood flow between ⁹⁹Tc^m-methoxyisobutylisonitrile (MIBI) single-isotope dynamic cardiac imaging and ⁹⁹Tc^m-MIBI/¹²³I-metaiodobenzylguanidine (MIBG) dual-isotope dual-dynamic cardiac imaging with or without complete physical correction (ml·min⁻¹·g⁻¹, $M(Q_1, Q_3)$)

显像方法	整体左心室	左前降支支配区域	左回旋支支配区域	右冠状动脉支配区域
⁹⁹ Tc ^m -MIBI 单核素动态 SPECT 心脏显像(n=24)	0.74 (0.64, 0.79)	0.72 (0.68, 0.82)	0.73 (0.66, 0.80)	0.77 (0.64, 0.82)
完整物理校正的 ⁹⁹ Tc ^m -MIBI/ ¹²³ I-MIBG 双核素双动态 SPECT 心脏显像(n=24)	0.74 (0.64, 0.80) ^a	0.74 (0.64, 0.84) ^a	0.74 (0.61, 0.79) ^a	0.77 (0.66, 0.82) ^a
非完整物理校正的 ⁹⁹ Tc ^m -MIBI/ ¹²³ I-MIBG 双核素双动态 SPECT 心脏显像(n=24)	0.88 (0.76, 0.94) ^b	0.91 (0.82, 1.10) ^b	0.92 (0.87, 1.10) ^b	0.86 (0.65, 0.98) ^b

注: ^a 表示与⁹⁹Tc^m-MIBI 单核素动态 SPECT 心脏显像比较, 差异均无统计学意义 ($Z = -1.349, -0.396, -0.350, -1.126$, 均 $P > 0.05$); ^b 表示与⁹⁹Tc^m-MIBI 单核素动态 SPECT 心脏显像比较, 差异均有统计学意义 ($Z = -3.455, -3.849, -3.661, -2.273$, 均 $P < 0.05$)。MIBI 为甲氧基异丁基异腈; SPECT 为单光子发射计算机断层摄影术; MIBG 为间碘苄胍

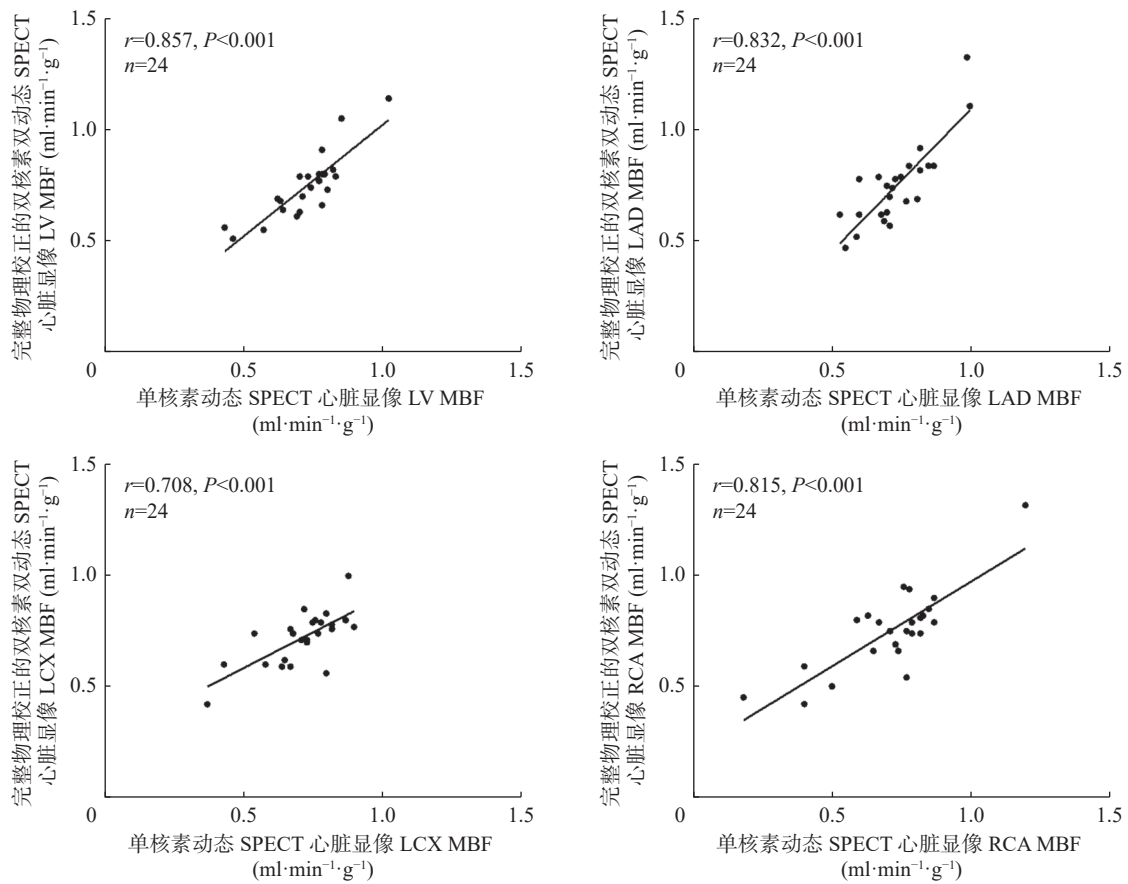


图 1 $^{99}\text{Tc}^m$ -MIBI 单核素动态 SPECT 心脏显像与进行完整物理校正的 $^{99}\text{Tc}^m$ -MIBI/ ^{123}I -MIBG 双核素双动态 SPECT 心脏显像获得的心肌血流量的相关性分析 MIBI 为甲氧基异丁基异腈; SPECT 为单光子发射计算机断层摄影术; MIBG 为间碘苄胍; LV 为左心室; MBF 为心肌血流量; LAD 为左前降支; LCX 为左回旋支; RCA 为右冠状动脉

Figure 1 Correlation analysis of myocardial blood flow between $^{99}\text{Tc}^m$ -methoxyisobutylisonitrile (MIBI) single-isotope dynamic cardiac imaging and $^{99}\text{Tc}^m$ -MIBI/ ^{123}I -metaiodobenzylguanidine (MIBG) dual-isotope dual-dynamic cardiac imaging with complete physical correction

$^{99}\text{Tc}^m$ 和 ^{123}I 的能峰分别为 140 keV 和 159 keV, 二者非常接近, 传统的碘化钠(NaI)晶体 SPECT 的能量分辨率 >10%, 难以区分这两种核素的能峰, 因此无法实现 $^{99}\text{Tc}^m$ / ^{123}I 双核素显像。但 CZT SPECT 的能量分辨率显著提高, 可达到 5%~6%^[14], 能够对 $^{99}\text{Tc}^m$ 和 ^{123}I 的双核素信号进行有效地鉴别。以往的研究结果表明, 即使不进行物理校正, CZT SPECT 采集到的心脏模型 $^{99}\text{Tc}^m$ 单核素显像和 $^{99}\text{Tc}^m$ / ^{123}I 双核素显像放射性计数相对分布的差异无统计学意义, 其对人体 $^{99}\text{Tc}^m$ -MIBI 单核素显像和 $^{99}\text{Tc}^m$ -MIBI/ ^{123}I -MIBG 双核素显像心脏图像的半定量评分差异无统计学意义^[11]。上述研究结果均是基于放射性计数的相对分布得出的, 并未进行绝对定量分析, 对于常规的心肌灌注显像和心脏神经显像的定性诊断是基本可行的。但本研究对于 $^{99}\text{Tc}^m$ -MIBI/ ^{123}I -MIBG 双核素显像 MBF 和心脏交感神经均进行绝对定量

分析, 因此与以往研究不同。

进行心脏 SPECT 绝对定量分析的前提是基于对心肌放射性计数的准确测量, 因此在行 $^{99}\text{Tc}^m$ -MIBI/ ^{123}I -MIBG 双核素显像时还需要对高能 ^{123}I 对低能 $^{99}\text{Tc}^m$ 信号的影响进行校正; 低能 $^{99}\text{Tc}^m$ 对高能 ^{123}I 信号不会产生明显影响, 因此不需要校正。行双核素 SPECT 心脏显像时, 可以从能谱与原始投影图观察到心肌的 ^{123}I -MIBG 摄取对 $^{99}\text{Tc}^m$ -MIBI 心肌图像产生的下散射干扰和准直器穿透干扰, 这种干扰会增加 $^{99}\text{Tc}^m$ -MIBI 主峰能窗的放射性计数, 进而影响动态 SPECT 图像重建和定量分析的准确性^[15-18]。因此, $^{99}\text{Tc}^m$ -MIBI 动态显像的散射校正应包括两个部分, 除 $^{99}\text{Tc}^m$ -MIBI 自身的散射校正外, 还需要校正 ^{123}I -MIBG 对 $^{99}\text{Tc}^m$ -MIBI 的下散射干扰和准直器穿透干扰。 $^{99}\text{Tc}^m$ -MIBI 自身的散射校正采用 $^{99}\text{Tc}^m$ -MIBI 主峰能窗图像减去下散射

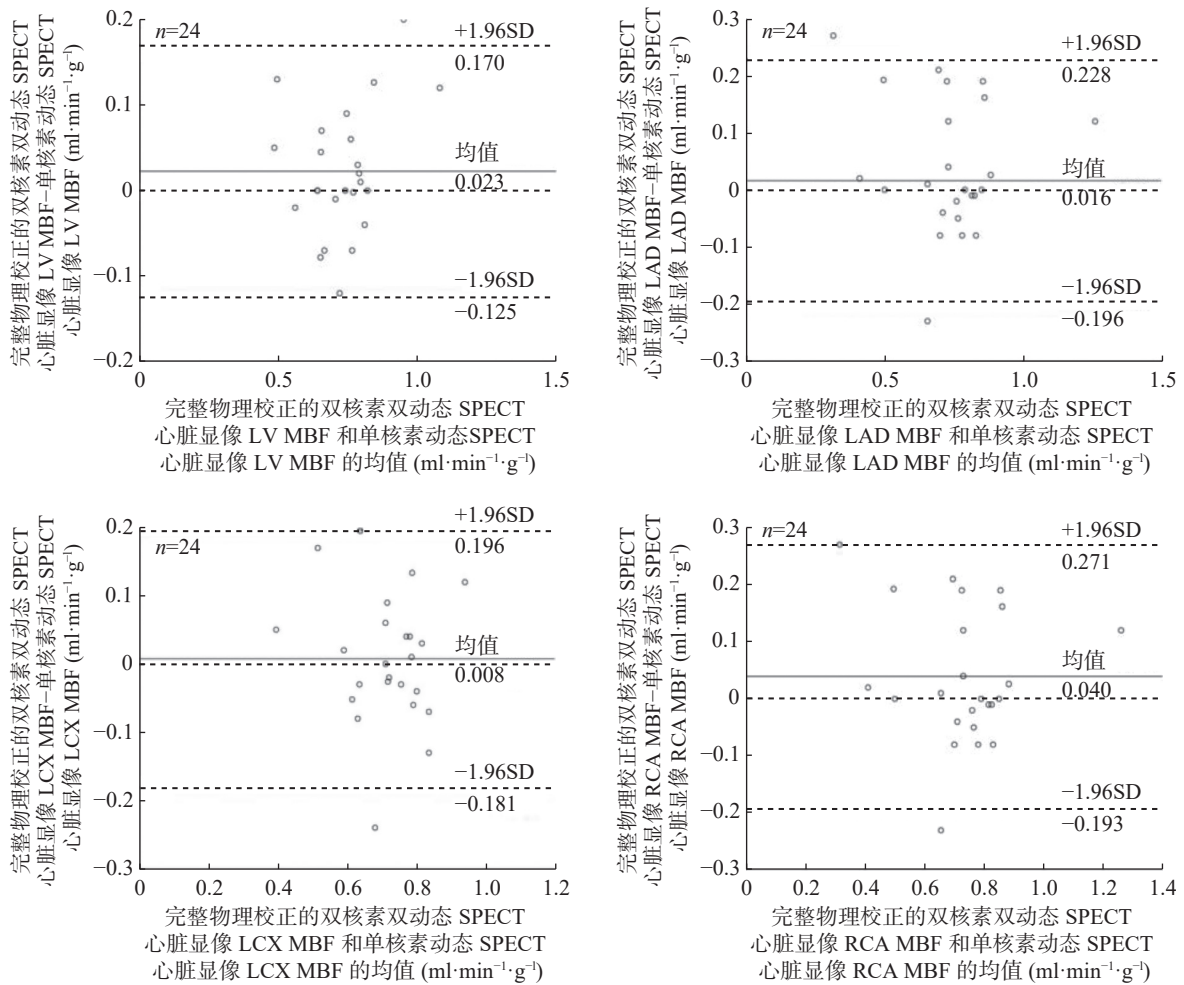


图2 ⁹⁹Tc^m-MIBI单核素动态SPECT心脏显像与进行完整物理校正的⁹⁹Tc^m-MIBI/¹²³I-MIBG双核素双动态SPECT心脏显像获得的心肌血流量的Bland-Altman一致性分析 MIBI为甲氧基异丁基异脲; SPECT为单光子发射计算机断层摄影术; MIBG为间碘苄胍; LV为左心室; MBF为心肌血流量; LAD为左前降支; LCX为左回旋支; RCA为右冠状动脉; SD为标准差

Figure 2 Bland-Altman agreement analysis of myocardial blood flow between ⁹⁹Tc^m-methoxyisobutylisonitrile (MIBI) single-isotope dynamic cardiac imaging and ⁹⁹Tc^m-MIBI/¹²³I-metaiodobenzylguanidine (MIBG) dual-isotope dual-dynamic cardiac imaging with complete physical correction

窗放射性计数估算的主峰能窗内的散射分量图像; 采用未注射⁹⁹Tc^m-MIBI前的¹²³I-MIBG下散射窗放射性计数和准直器穿透窗计数分别估算¹²³I-MIBG对⁹⁹Tc^m-MIBI的下散射干扰和准直器穿透干扰,并在⁹⁹Tc^m-MIBI主峰能窗图像中去除。经过上述校正后,¹²³I-MIBG对⁹⁹Tc^m-MIBI的散射影响基本可以消除,从而保证了图像重建和定量分析的准确性。

⁹⁹Tc^m-MIBI心肌灌注显像和¹²³I-MIBG心脏交感神经显像均是目前临床应用的重要的心脏功能评价技术,两者联合应用对心肌损伤性质和程度的判断、高危心肌的识别、预后评估等均具有重要的临床意义^[9,19-22]。近年来,基于动态显像的定量分析技术在⁹⁹Tc^m-MIBI心肌灌注显像和¹²³I-MIBG心脏

交感神经显像中的研究均已开展。通过⁹⁹Tc^m-MIBI心肌血流定量测定的负荷MBF和心肌血流储备可进一步提高对心肌缺血的诊断准确率,¹²³I-MIBG心脏交感神经分布定量指标的优化也是目前重要的研究课题^[23-25]。CZT SPECT为⁹⁹Tc^m-MIBI/¹²³I-MIBG双核素双动态SPECT心脏显像提供了可能,极大地提高了诊断效率。本研究进一步证实了这一技术应用的可行性,且具有重要的临床意义。

本研究具有一定的局限性:一是样本量相对较少,还需要更大样本量的研究进一步证实;二是受患者难以进行多次重复检查的限制,没有行⁹⁹Tc^m-MIBI/¹²³I-MIBG双核素显像与¹²³I-MIBG单核素显像获得的¹²³I-MIBG定量指标的比较,虽然理

论上^{99m}Tc^m的能量较低,不会明显影响¹²³I的放射性计数,但仍然需要进一步研究结果的证实,我们将在后续的研究中逐步完善。

综上所述,我们认为,利用CZT SPECT同时行^{99m}Tc^m-MIBI/¹²³I-MIBG双核素双动态SPECT心脏显像,通过一次检查完成MBF和心脏交感神经的定量分析是完全可行的。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 任俊灵负责研究方法的设计、数据的采集、论文的撰写;张宗耀、汪蕾负责图像的分析、数据的统计与分析;王小迪负责研究方法的设计、文献的检索;方纬负责命题的设计、研究的指导、论文的审阅

参 考 文 献

- [1] Fang YHD, Liu YC, Ho KC, et al. Single-scan rest/stress imaging with ^{99m}Tc-sestamibi and cadmium zinc telluride-based SPECT for hyperemic flow quantification: a feasibility study evaluated with cardiac magnetic resonance imaging[J/OL]. *PLoS One*, 2017, 12(8): e0183402[2023-08-31]. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0183402>. DOI: 10.1371/journal.pone.0183402.
- [2] Agostini D, Roule V, Nganoa C, et al. First validation of myocardial flow reserve assessed by dynamic ^{99m}Tc-sestamibi CZT-SPECT camera: head to head comparison with ¹⁵O-water PET and fractional flow reserve in patients with suspected coronary artery disease. The WATERDAY study[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2018, 45(7): 1079–1090. DOI: 10.1007/s00259-018-3958-7.
- [3] Dewey M, Siebes M, Kachelrieß M, et al. Clinical quantitative cardiac imaging for the assessment of myocardial ischaemia[J]. *Nat Rev Cardiol*, 2020, 17(7): 427–450. DOI: 10.1038/s41569-020-0341-8.
- [4] Lotze U, Kaepplinger S, Kober A, et al. Recovery of the cardiac adrenergic nervous system after long-term beta-blocker therapy in idiopathic dilated cardiomyopathy: assessment by increase in myocardial ¹²³I-metaiodobenzylguanidine uptake[J]. *J Nucl Med*, 2001, 42(1): 49–54.
- [5] Jacobson AF, Senior R, Cerqueira MD, et al. Myocardial iodine-123 meta-iodobenzylguanidine imaging and cardiac events in heart failure: results of the prospective ADMIRE-HF (AdreView myocardial imaging for risk evaluation in heart failure) study[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2010, 55(20): 2212–2221. DOI: 10.1016/j.jacc.2010.01.014.
- [6] Agostini D, Verberne HJ, Burchert W, et al. I-123-mIBG myocardial imaging for assessment of risk for a major cardiac event in heart failure patients: insights from a retrospective European multicenter study[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2008, 35(3): 535–546. DOI: 10.1007/s00259-007-0639-3.
- [7] Arora R, Ferrick KJ, Nakata T, et al. I-123 MIBG imaging and heart rate variability analysis to predict the need for an implantable cardioverter defibrillator[J]. *J Nucl Cardiol*, 2003, 10(2): 121–131. DOI: 10.1067/mnc.2003.2.
- [8] Jayachandran JV, Sih HJ, Winkle W, et al. Atrial fibrillation produced by prolonged rapid atrial pacing is associated with heterogeneous changes in atrial sympathetic innervation[J]. *Circulation*, 2000, 101(10): 1185–1191. DOI: 10.1161/01.cir.101.10.1185.
- [9] Zhou YL, Zhou WH, Folks RD, et al. I-123 mIBG and Tc-99m myocardial SPECT imaging to predict inducibility of ventricular arrhythmia on electrophysiology testing: a retrospective analysis[J]. *J Nucl Cardiol*, 2014, 21(5): 913–920. DOI: 10.1007/s12350-014-9911-7.
- [10] Bocher M, Blevis IM, Tsukerman L, et al. A fast cardiac gamma camera with dynamic SPECT capabilities: design, system validation and future potential[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2010, 37(10): 1887–1902. DOI: 10.1007/s00259-010-1488-z.
- [11] 张宗耀, 汪蕾, 张海龙, 等. 利用CZT SPECT进行心脏^{99m}Tc^m-MIBI/¹²³I-MIBG双核素显像的可行性研究[J]. *中华核医学与分子影像杂志*, 2021, 41(9): 536–539. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20200915-00347.
- Zhang ZY, Wang L, Zhang HL, et al. A feasibility study of ^{99m}Tc^m-MIBI/¹²³I-MIBG dual-isotope cardiac imaging using CZT SPECT[J]. *Chin J Nucl Med Mol Imaging*, 2021, 41(9): 536–539. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20200915-00347.
- [12] Blaire T, Bailliez A, Bouallegue FB, et al. Left ventricular function assessment using ¹²³I/^{99m}Tc dual-isotope acquisition with two semi-conductor cadmium-zinc-telluride (CZT) cameras: a gated cardiac phantom study[J/OL]. *EJNMMI Phys*, 2016, 3(1): 27[2023-08-31]. <https://ejnmmiphys.springeropen.com/articles/10.1186/s40658-016-0163-2>. DOI: 10.1186/s40658-016-0163-2.
- [13] Blaire T, Bailliez A, Ben Bouallegue F, et al. First assessment of simultaneous dual isotope (¹²³I/^{99m}Tc) cardiac SPECT on two different CZT cameras: a phantom study[J]. *J Nucl Cardiol*, 2018, 25(5): 1692–1704. DOI: 10.1007/s12350-017-0841-z.
- [14] Sharir T, Slomka PJ, Berman DS. Solid-state SPECT technology: fast and furious[J]. *J Nucl Cardiol*, 2010, 17(5): 890–896. DOI: 10.1007/s12350-010-9284-5.
- [15] Fan P, Hutton BF, Holstenson M, et al. Scatter and crosstalk corrections for ^{99m}Tc/¹²³I dual-radionuclide imaging using a CZT SPECT system with pinhole collimators[J]. *Med Phys*, 2015, 42(12): 6895–6911. DOI: 10.1118/1.4934830.
- [16] Du Y, Tsui BMW, Frey EC. Model-based crosstalk compensation for simultaneous ^{99m}Tc/¹²³I dual-isotope brain SPECT imaging[J]. *Med Phys*, 2007, 34(9): 3530–3543. DOI: 10.1118/1.2768863.
- [17] Niimi T, Nanasato M, Sugimoto M, et al. Comparative cardiac phantom study using Tc-99m/I-123 and Tl-201/I-123 tracers

with cadmium-zinc-telluride detector-based single-photon emission computed tomography[J]. *Nucl Med Mol Imaging*, 2019, 53(1): 57–63. DOI: [10.1007/s13139-018-0559-0](https://doi.org/10.1007/s13139-018-0559-0).

[18] Yang JT, Yamamoto K, Sadato N, et al. Clinical value of triple-energy window scatter correction in simultaneous dual-isotope single-photon emission tomography with ^{123}I -BMIPP and ^{201}Tl [J]. *Eur J Nucl Med*, 1997, 24(9): 1099–1106. DOI: [10.1007/BF01254240](https://doi.org/10.1007/BF01254240).

[19] Gimelli A, Liga R, Avogliero F, et al. Relationships between left ventricular sympathetic innervation and diastolic dysfunction: the role of myocardial innervation/perfusion mismatch[J]. *J Nucl Cardiol*, 2018, 25(4): 1101–1109. DOI: [10.1007/s12350-016-0753-3](https://doi.org/10.1007/s12350-016-0753-3).

[20] Gimelli A, Liga R, Genovesi D, et al. Association between left ventricular regional sympathetic denervation and mechanical dyssynchrony in phase analysis: a cardiac CZT study[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2014, 41(5): 946–955. DOI: [10.1007/s00259-013-2640-3](https://doi.org/10.1007/s00259-013-2640-3).

[21] Gimelli A, Masci PG, Liga R, et al. Regional heterogeneity in cardiac sympathetic innervation in acute myocardial infarction: relationship with myocardial oedema on magnetic resonance[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2014, 41(9): 1692–1694. DOI: [10.1007/s00259-014-2792-9](https://doi.org/10.1007/s00259-014-2792-9).

[22] Klein T, Abdulghani M, Smith M, et al. Three-dimensional ^{123}I -meta-iodobenzylguanidine cardiac innervation maps to assess substrate and successful ablation sites for ventricular tachycardia: feasibility study for a novel paradigm of innervation imaging[J]. *Circ Arrhythm Electrophysiol*, 2015, 8(3): 583–591. DOI: [10.1161/CIRCEP.114.002105](https://doi.org/10.1161/CIRCEP.114.002105).

[23] Giorgetti A, Burchielli S, Positano V, et al. Dynamic 3D analysis of myocardial sympathetic innervation: an experimental study using ^{123}I -MIBG and a CZT camera[J]. *J Nucl Med*, 2015, 56(3): 464–469. DOI: [10.2967/jnumed.114.143669](https://doi.org/10.2967/jnumed.114.143669).

[24] Tinti E, Positano V, Giorgetti A, et al. Feasibility of [^{123}I]-meta-iodobenzylguanidine dynamic 3-D kinetic analysis *in vivo* using a CZT ultrafast camera: preliminary results[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2014, 41(1): 167–173. DOI: [10.1007/s00259-013-2549-x](https://doi.org/10.1007/s00259-013-2549-x).

[25] Wu J, Lin SF, Gallezot JD, et al. Quantitative analysis of dynamic ^{123}I -mIBG SPECT imaging data in healthy humans with a population-based metabolite correction method[J]. *J Nucl Med*, 2016, 57(8): 1226–1232. DOI: [10.2967/jnumed.115.171710](https://doi.org/10.2967/jnumed.115.171710).

(收稿日期: 2023-09-01)



· 读者 · 作者 · 编者 ·

2024 年本刊可直接使用缩写形式的常用词汇

ATP(adenosine-triphosphate), 三磷酸腺苷
AUC(area under curve), 曲线下面积
CI(confidence interval), 置信区间
CT(computed tomography), 计算机体层摄影术
CV(coefficient of variation), 变异系数
DNA(deoxyribonucleic acid), 脱氧核糖核酸
DTC(differentiated thyroid cancer), 分化型甲状腺癌
DTPA(diethylene-triaminepentaacetic acid), 二亚乙基三胺五乙酸
DWI(diffusion weighted imaging), 弥散加权成像
FDG(fluorodeoxyglucose), 氟脱氧葡萄糖
MDP(methylenediphosphonate), 亚甲基二膦酸盐
MIBI(methoxyisobutylisonitrile), 甲氧基异丁基异腈
MRI(magnetic resonance imaging), 磁共振成像
MTT(3-(4, 5-dimethylthiazol-2-yl)-2, 5-diphenyltetrazolium bromide), 3-(4, 5-二甲基噻唑-2)-2, 5-二苯基四氮唑溴盐
PBS(phosphate-buffered solution), 磷酸盐缓冲液
PCR(polymerase chain reaction), 聚合酶链反应
PET(positron emission tomography), 正电子发射断层显像术
RBC(red blood cell), 红细胞
RNA(ribonucleic acid), 核糖核酸
ROC(receiver operating characteristic), 受试者工作特征

ROI(region of interest), 感兴趣区
SER(sensitization enhancement ratio), 放射增敏比
SPECT(single photon emission computed tomography), 单光子发射计算机体层摄影术
SUV(standardized uptake value), 标准化摄取值
SUV_{max}(maximum standardized uptake value), 最大标准化摄取值
SUV_{mean}(mean standardized uptake value), 平均标准化摄取值
SUV_{min}(minimum standardized uptake value), 最小标准化摄取值
T1WI(T1 weighted image), T1加权成像
T2WI(T2 weighted image), T2加权成像
T₃(triiodothyronine), 三碘甲腺原氨酸
T₄(thyroxine), 甲状腺素
TNF(tumor necrosis factor), 肿瘤坏死因子
TNM(tumor, node, metastasis), 肿瘤、淋巴结、转移
T/NT(the ratio of target to non-target), 靶/非靶比值
TSH(thyroid-stimulating hormone), 促甲状腺激素
WBC(white blood cell), 白细胞
WHO(world health organization), 世界卫生组织

本刊编辑部