

·综述·

门控心肌灌注显像相位分析及其临床应用进展

郑丹栅 兰晓莉 覃春霞

华中科技大学同济医学院附属协和医院核医学科, 分子影像湖北省重点实验室, 武汉 430022

通信作者: 覃春霞, Email: qin_chunxia@hust.edu.cn

【摘要】 在门控心肌灌注显像(GMPI)中采用相位分析获得简单的参数值来评估左室机械不同步性具有简便和可重复等优势, 同时, 其也受到多种因素的影响。GMPI 相位分析的应用前景广阔, 其研究和应用的主要方向包括心脏再同步化治疗、其他多种心脏疾病的早期诊断、帮助制定临床决策以及预测疾病的临床结局等。笔者对 GMPI 相位分析及其临床应用进展进行综述。

【关键词】 心肌灌注显像; 心脏再同步化疗法; 冠心病; 心肌疾病; 相位分析

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(81873906); 华中科技大学同济医学院研究型临床医师资助计划(5001530008)

DOI: [10.3760/cma.j.cn121381-202006012-00060](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202006012-00060)

Phase analysis of gated myocardial perfusion imaging and its progress in clinical application

Zheng Danzha, Lan Xiaoli, Qin Chunxia

Department of Nuclear Medicine, Union Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Hubei Province Key Laboratory of Molecular Imaging, Wuhan 430022, China

Corresponding author: Qin Chunxia, Email: qin_chunxia@hust.edu.cn

【Abstract】 Using the simple parameters obtained by phase analysis in gated myocardial perfusion imaging (GMPI) to evaluate the left ventricular mechanical dyssynchrony has the advantages of simplicity and repeatability, while the parameters can be affected by many factors. GMPI phase analysis has wide potentials, including cardiac resynchronization therapy, early diagnosis of several cardiac diseases, helping clinical decision-making and predicting the clinical outcome of diseases. This review briefly introduces GMPI phase analysis and its progress in clinical application.

【Key words】 Myocardial perfusion imaging; Cardiac resynchronization therapy; Coronary disease; Cardiomyopathies; Phase analysis

Fund programs: General Program of National Natural Science Foundation of China (81873906); Clinical Research Physician Fund Program of Tongji Medical College of Huazhong University of Science and Technology (5001530008)

DOI: [10.3760/cma.j.cn121381-202006012-00060](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202006012-00060)

心脏疾病会干扰左室不同区域的协调性, 使其发生不同步收缩或舒张的现象, 这被称为左室不同步性。左室不同步性使局部心室壁运动不协调, 影响心肌代谢效率和心肌血流量, 损伤左室功能, 并可能引起心室重构。电不同步性和机械不同步性常用于描述左室不同步性水平, 电不同步性指左右室的电活动不同步, 表现为心电图 QRS 波持续时间

延长或左束支传导阻滞; 机械不同步性更能反映左室收缩或舒张活动的不同步^[1]。

目前, 评估左室机械不同步性(left ventricular mechanical dyssynchrony, LVMD)的方法主要有 M 型超声心动图、多普勒组织成像、斑点追踪成像、MRI 组织标记、速度编码 MRI、平面和断层放射性核素心室造影及其相位分析以及门控心肌灌注显

像(gated myocardial perfusion imaging, GMPI)及其相位分析等^[2-3]。GMPI相位分析因具有方法简便、用途广泛、可重复性强及可用于数据的回顾性分析等优点,被认为是极具潜力的影像学分析技术^[2]。我们主要阐述 GMPI 相位分析及其临床应用进展。

1 GMPI 相位分析的方法

GMPI 相位分析是在对观察对象成像后,进行滤波投影重建以获取每个心肌样本的 16 帧时间-活性曲线,经一次谐波傅里叶变换处理后,获取心室局部收缩起始时间(即时相)和收缩幅度(即振幅)参数。对时相和振幅进行影像重建可以获得心室的时相图、振幅图和时相电影 3 种功能影像以及相位直方图。相位直方图是表示心室时相频率分布的图形,其 X 轴为相位,即心动周期的时间点:0°对应心电图中 R 波最高峰,360°对应一个 RR 间期;Y 轴为对应 X 轴的机械收缩起始时间的像素计数,通过不同区域的收缩时间间隔来评估左室收缩不同步水平^[4]。进行 3 次谐波傅里叶变换处理则可评估左室舒张不同步水平^[5],常以左室收缩不同步水平指代 LVMD 水平。

峰值相、相位标准差(phase standard deviation, PSD)、相位直方图带宽(phase histogram bandwidth, PHB)、偏斜度和峰度这 5 个参数指标被用于定量评价图像^[4]。其中,PSD 与 PHB 应用最为广泛,分别表示相位分布的标准偏差和 95% 宽度。参数值熵的概念由经典信息熵引出,用于表示相位分布不一致的水平,可用来鉴别左束支传导阻滞与冠心病可能性低的患者^[6]。

GMPI 相位分析常用的软件为四维模型心肌断层显像(Corridor4DM)、爱莫瑞心脏工具箱(ECTb)、定量门控 SPECT(QGS)以及 cardioREPO(cREPO)。Aguadé-Bruix 等^[7]经爱莫瑞心脏工具箱软件验证,认为 SPECT-GMPI 中 PSD>18.4°、PHB>51°、偏斜度≤3.2 和峰度≤9.3 可作为鉴别满足心脏再同步化治疗(cardiac resynchronization therapy, CRT)标准人群与正常人群临界值,且其一致性较强,以 PSD 和 PHB 为著,按患者存在的异常参数值数目可将 LVMD 分为 4 级。Hess 等^[8]则认为,心脏事件的可能性与同步性水平存在连续关系,并提倡使用 LVMD 连续变量来建模。

GMPI 相位分析的参数值与成像及图像重建的

过程和受检人群的危险因素有关。在成像及图像重建的过程中,不同显像类型、显像剂剂量、每一帧的采集计数、图像重建时的滤波函数类型、瓣膜平面的选择及检测心肌计数的算法等均影响 GMPI 相位分析参数值的大小^[9-10],因此,Jimenez-Heffernan 等^[11]系统地阐述了获取参数值时需注意的细节。此外,Folks 等^[10]提出了优化瓣膜平面选择的系统处理方法。有研究结果表明,男性、高血压、糖尿病、血脂异常、肥胖、QRS 波持续时间≥120 ms、冠心病史、左室功能不全和心肌灌注缺损等危险因素均与相位分析的参数值有关^[12],需要通过更多研究确定不同人群的参数值范围。

碲化铯 SPECT 是近年来推出的心脏专用的 SPECT,其能快速完成 GMPI,比传统 SPECT 的灵敏度更高、图像更清晰、可明显降低患者的辐射剂量,且可进行动态显像^[13],其与常规 SPECT 相位分析的参数值具有良好的一致性^[14]。对于肥胖患者,行碲化铯 SPECT 可同时获得 LVMD 水平和良好的灌注图像,并可降低常规 SPECT 中软组织衰减所造成的伪影^[15]。

2 GMPI 相位分析的临床应用

2.1 在心脏疾病起搏治疗中的应用

2.1.1 应用于 CRT

CRT 是心衰患者的重要治疗方法,有研究结果显示,对 CRT 治疗有应答的患者的 PSD 和 PHB 水平远高于无应答的患者^[16],因此,GMPI 相位分析有利于行 CRT 患者的筛选及治疗方案的优化。此外,其还可识别心室的 U 型收缩模式,将其应用于行 CRT 患者的选择有望改善 CRT 治疗的应答情况^[17]。基于爱莫瑞心脏工具箱软件确定的 PHB>135°和 PSD>43°可作为患者对 CRT 治疗有应答的预测因子^[16]。

患者对 CRT 治疗无应答的主要原因之一是左室导联位置不佳,GMPI 相位分析可以识别出心室最迟收缩的节段和心肌瘢痕位置,从而确定最佳的左室导联位置^[2]。邹建刚等^[18]在 GMPI 相位分析的指导下将导线植入左室最迟收缩且非瘢痕的节段或其临近节段,观察到 CRT 的疗效显著提高。Zhou 等^[19]开发出了一种基于 GMPI 相位分析的时相图以自动检测左室最迟收缩节段的方法,其可协助指导 CRT 中左室探头的放置,该方法与专家的视觉

判断具有很高的-致性,且在不同的操作者之间具有良好的可重复性。另有研究结果表明,将导线植入左室同时收缩和舒张的节段有可能增强 CRT 应答^[20]。但仍有研究者认为,将导线植入最迟收缩的节段并未改善临床结局^[21],这尚需进一步研究。

在行 CRT 前后应用 GMPI 相位分析能够观察 CRT 是否改善了患者的 LVMD 水平并评估预后。在一项多中心研究中,Peix 等^[21]对接受 CRT 的患者进行了随访,以患者的心功能参数、左室射血分数、收缩末期容积和生活质量等来评估患者的临床结局,结果表明,行 CRT 前及行 CRT 后 6 个月的 PSD 出现差异是预测患者临床结局的灵敏参数,CRT 可有效改善此类患者的 LVMD 水平及其临床结局。此外,有研究结果表明,左室收缩不同步和舒张不同步均对扩张型心肌病心衰患者中 CRT 的疗效有一定预测价值^[20]。

2.1.2 应用于心律失常植入除颤器及心脏起搏的治疗

在心率失常应用植入型心脏复律除颤器的患者中,发生死亡或电击事件的患者的 PSD 均 $\geq 50^\circ$ ^[22],根据 PSD 能够鉴别出易发生心源性病死和恶性心衰的患者^[23]。GMPI 相位分析还可以评估完全性房室传导阻滞患者右室中隔和心尖部起搏的急性和慢性影响,从而辅助确定起搏位置^[24]。

2.2 在冠心病中的应用

在冠心病患者中,LVMD 水平与心肌缺血和心肌瘢痕的程度及范围呈正相关^[25]。导致负荷状态下 LVMD 水平较静息状态下升高的重要影响因素有负荷心肌血流量 $< 1.28 \text{ mL}/(\text{g}\cdot\text{min})$ 、冠状动脉血管阻力 $> 75 \text{ mmHg}/(\text{mL}\cdot\text{g}\cdot\text{min})$ 。研究结果显示,使用标准差衡量不同节段负荷心肌血流量的异质水平时,标准差的减小与负荷状态下 LVMD 的改善显著相关^[26]。

与冠状动脉造影相比,GMPI 相位分析可应用于冠心病患者的早期诊断。冠状动脉造影结果正常但伴有灌注可逆性缺损的患者也可能存在 LVMD,这可能与隐匿性动脉粥样硬化有关^[27]。碲化铋 SPECT 所评估的 LVMD 水平与心肌灌注受损的相关性大于冠状动脉病变,这或许有助于心绞痛患者的危险分层^[28]。在崔博等^[29]的研究中,冠状动脉狭窄程度 $> 50\%$ 和 $\leq 50\%$ 的冠心病患者与冠状动脉正常者的 PSD、PHB 和熵的差异均有统计学意义,以上参数对冠状动脉病变程度的评估有一定的价

值,其中,PHB 最为显著。但另一项应用碲化铋 SPECT 的研究并没有得到类似的结论^[30],这或许与所选用的显像方案、负荷药物和软件等因素有关,尚需进行更多的研究。

通过 GMPI 相位分析可观察冠心病患者采用不同治疗方案后的疗效及预后。Venkataraman 等^[31]通过 GMPI 相位分析评价雷诺嗪药物对冠心病患者的疗效,结果表明,治疗前后的负荷 LVMD 水平差异显著,这提示 LVMD 可用于鉴别药物治疗获益不同的患者。在冠状动脉旁路移植术后出现严重 LVMD 是冠心病患者主要心血管不良事件的独立危险因素,有助于冠心病患者的预后判断及危险再分层^[32]。在冠状动脉旁路移植术后 3 个月应用 GMPI 相位分析进行评估,出现 LVMD 的患者 1 年后发生逆向重构的概率亦升高^[33]。

GMPI 相位分析可用于冠心病患者的预后评估。与电不同步性相比,通过 GMPI 相位分析获得的负荷 LVMD 与冠心病患者心源性病死的相关性更大^[34]。一项对 627 例冠心病患者的研究结果显示,通过 GMPI 相位分析获得的负荷 PHB 和熵是预测冠心病患者发生主要心血管不良事件的独立危险因素,且其对冠心病患者具有很高的危险分层价值^[35]。GMPI 相位分析对合并多支血管病变的急性心肌梗死患者临床转归的预测至关重要,多因素分析结果显示,负荷 PSD $\geq 45.5^\circ$ 和负荷 PHB $\geq 126.0^\circ$ 是此类患者发生主要心血管不良事件的预测因子^[36]。GMPI 相位分析评估的左室舒张不同步水平与冠心病患者心源性病死及全因死亡相关,故其可帮助鉴别死亡风险升高的冠心病患者^[37]。

2.3 在部分类型心肌病中的应用

通过 GMPI 相位分析可评估部分原发性心肌病患者的临床预后。Wang 等^[38]的研究结果表明,在经药物治疗的扩张性心肌病患者中,将同时存在 PHB $> 135^\circ$ 和 PSD $> 43^\circ$ 视为具有严重 LVMD 的患者,其累积心源性病死率明显高于无严重 LVMD 的患者。通过 GMPI 相位分析还能够鉴别出相对低风险的非缺血性心肌病中全因死亡风险较高的患者,其临床意义和治疗意义值得在大型前瞻性研究中进一步探索^[39]。

3 小结与展望

除了上述临床应用外,GMPI 相位分析还可用

于评估早期高血压患者的 LVMD 水平和糖尿病患者的心脏预后, 以及早期评价弥漫性大 B 细胞淋巴瘤患者经蒽环类药物化疗所致的心肌损害等, 从而有利于疾病的早期诊断和临床决策的制定^[40-42]。GMPI 相位分析在评估药物治疗疗效、非缺血性心肌病和放疗化疗心肌损伤等方面的应用还需进一步拓展, 除了传统的 SPECT 相位分析, 尚需更多的临床研究以明确碲化铋 SPECT、门控心肌代谢显像和右室相位分析的应用优势。

目前, GMPI 相位分析尚未作为临床常规的检查方法。参数值范围不统一限制了相位分析研究的开展, 有限的时间分辨率以及心肌瘢痕所致的图像噪声和伪影等也限制了其在临床上的应用^[43]。应用 GMPI 相位分析时, 临床医师还需综合分析受检对象不同的临床和生理特点对参数值的影响^[44]。目前, 将 GMPI 相位分析应用于临床决策的证据尚不足, LVMD 的作用机制尚未完全明确, 仍有研究者认为没有高质量的证据支持评估 LVMD 在临床实践中的作用^[45]。因此, 规范成像程序并开展大样本的前瞻性研究以建立不同人群相位分析的参数值并明确 LVMD 的作用机制将为 GMPI 的临床应用创造有利条件。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展, 不涉及任何利益冲突。

作者贡献声明 郑丹珊负责文献的收集与整理、综述的撰写与修订; 兰晓莉负责综述的审阅、建议的提出; 覃春霞负责命题的提出与设计、综述的审阅与修订。

参 考 文 献

- [1] Nguyễn UC, Verzaal NJ, van Nieuwenhoven FA, et al. Pathobiology of cardiac dyssynchrony and resynchronization therapy[J]. *Europace*, 2018, 20(12): 1898–1909. DOI: [10.1093/europace/euy035](https://doi.org/10.1093/europace/euy035).
- [2] Chen J, Garcia EV, Bax JJ, et al. SPECT myocardial perfusion imaging for the assessment of left ventricular mechanical dyssynchrony[J]. *J Nucl Cardiol*, 2011, 18(4): 685–694. DOI: [10.1007/s12350-011-9392-x](https://doi.org/10.1007/s12350-011-9392-x).
- [3] Yu CM, Bax JJ, Goresan J 3rd. Critical appraisal of methods to assess mechanical dyssynchrony[J]. *Curr Opin Cardiol*, 2009, 24(1): 18–28. DOI: [10.1097/hco.0b013e32831bc34e](https://doi.org/10.1097/hco.0b013e32831bc34e).
- [4] Chen J, Garcia EV, Folks RD, et al. Onset of left ventricular mechanical contraction as determined by phase analysis of ECG-gated myocardial perfusion SPECT imaging: development of a diagnostic tool for assessment of cardiac mechanical dyssynchrony[J]. *J Nucl Cardiol*, 2005, 12(6): 687–695. DOI: [10.1016/j.nuclcard.2005.06.088](https://doi.org/10.1016/j.nuclcard.2005.06.088).
- [5] Chen J, Kalogeropoulos AP, Verdes L, et al. Left-ventricular systolic and diastolic dyssynchrony as assessed by multi-harmonic phase analysis of gated SPECT myocardial perfusion imaging in patients with end-stage renal disease and normal LVEF[J]. *J Nucl Cardiol*, 2011, 18(2): 299–308. DOI: [10.1007/s12350-010-9331-2](https://doi.org/10.1007/s12350-010-9331-2).
- [6] Baughan N, Poitrasson-Rivière A, Moody JB, et al. Quantification of cardiac dyssynchrony entropy implemented in a commercial nuclear medicine software application[J]. *Nucl Technol*, 2020, 206(7): 977–983. DOI: [10.1080/00295450.2019.1708142](https://doi.org/10.1080/00295450.2019.1708142).
- [7] Aguadé-Bruix S, Romero-Farina G, Candell-Riera J, et al. Mechanical dyssynchrony according to validated cut-off values using gated SPECT myocardial perfusion imaging[J]. *J Nucl Cardiol*, 2018, 25(3): 999–1008. DOI: [10.1007/s12350-016-0684-z](https://doi.org/10.1007/s12350-016-0684-z).
- [8] Hess PL, Shaw LK, Vemulapalli S, et al. An alternative method to examine the predictive value of mechanical dyssynchrony[J]. *J Nucl Cardiol*, 2015, 22(4): 686–689. DOI: [10.1007/s12350-015-0145-0](https://doi.org/10.1007/s12350-015-0145-0).
- [9] Nakajima K, Okuda K, Matsuo S, et al. Comparison of phase dyssynchrony analysis using gated myocardial perfusion imaging with four software programs: based on the Japanese Society of Nuclear Medicine working group normal database[J]. *J Nucl Cardiol*, 2017, 24(2): 611–621. DOI: [10.1007/s12350-015-0333-y](https://doi.org/10.1007/s12350-015-0333-y).
- [10] Folks RD, Cooke CD, Garcia EV. Optimizing gated myocardial perfusion imaging processing for phase analysis[J]. *J Nucl Cardiol*, 2016, 23(6): 1348–1354. DOI: [10.1007/s12350-016-0543-y](https://doi.org/10.1007/s12350-016-0543-y).
- [11] Jimenez-Heffernan A, Butt S, Mesquita CT, et al. Technical aspects of gated SPECT MPI assessment of left ventricular dyssynchrony used in the VISION-CRT study[J]. *J Nucl Cardiol*, 2021, 28(3): 1165–1171. DOI: [10.1007/s12350-020-02122-3](https://doi.org/10.1007/s12350-020-02122-3).
- [12] Tavares A, Peclat T, Lima RSL. Prevalence and predictors of left intraventricular dyssynchrony determined by phase analysis in patients undergoing gated SPECT myocardial perfusion imaging [J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2016, 32(5): 845–852. DOI: [10.1007/s10554-015-0833-5](https://doi.org/10.1007/s10554-015-0833-5).
- [13] Oldan JD, Shaw LK, Hofmann P, et al. Prognostic value of the cadmium-zinc-telluride camera: a comparison with a conventional (Anger) camera[J]. *J Nucl Cardiol*, 2016, 23(6): 1280–1287. DOI: [10.1007/s12350-015-0181-9](https://doi.org/10.1007/s12350-015-0181-9).
- [14] 张宗耀, 吴大勇, 郭风, 等. 新型碲-铋-镅单光子发射断层显像仪检测心力衰竭左心室机械收缩失同步研究[J]. *中华心律失常学杂志*, 2018, 22(6): 477–481. DOI: [10.3760/cma.j.issn.1007-](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1007-)

- 6638.2018.06.004.
Zhang ZY, Wu DY, Guo F, et al. Evaluation of left ventricular mechanical dyssynchrony in patients with heart failure using a novel cadmium-zinc-telluride single photon emission computed tomography[J]. *Chin J Cardiac Arrhyth*, 2018, 22(6): 477–481. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1007-6638.2018.06.004.
- [15] Zhang H, Fan X, Qin SS, et al. Left ventricular mechanical dyssynchrony assessment in obese patients using the cadmium-zinc telluride SPECT camera[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2020, 36(4): 757–765. DOI: 10.1007/s10554-019-01762-y.
- [16] Henneman MM, Chen J, Dibbets-Schneider P, et al. Can LV dyssynchrony as assessed with phase analysis on gated myocardial perfusion SPECT predict response to CRT?[J]. *J Nucl Med*, 2007, 48(7): 1104–1111. DOI: 10.2967/jnumed.107.039925.
- [17] Tao NC, Qiu YH, Tang HP, et al. Assessment of left ventricular contraction patterns using gated SPECT MPI to predict cardiac resynchronization therapy response[J]. *J Nucl Cardiol*, 2018, 25(6): 2029–2038. DOI: 10.1007/s12350-017-0949-1.
- [18] 邹建刚, 华伟, 宿燕岗, 等. 核素心肌显像指导左心室导线植入提高心脏再同步治疗疗效的临床研究: 基本原理和设计方案[J]. *中华心律失常学杂志*, 2018, 22(3): 192–198. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1007-6638.2018.03.003.
Zou JG, Hua W, Su YG, et al. Single photon emission computed tomography myocardial perfusion imaging guided left ventricular lead implantation to improve the response to cardiac resynchronization therapy: rationale and design[J]. *Chin J Cardiac Arrhyth*, 2018, 22(3): 192–198. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1007-6638.2018.03.003.
- [19] Zhou WH, Tao NC, Hou XF, et al. Development and validation of an automatic method to detect the latest contracting viable left ventricular segments to assist guide CRT therapy from gated SPECT myocardial perfusion imaging[J]. *J Nucl Cardiol*, 2018, 25(6): 1948–1957. DOI: 10.1007/s12350-017-0853-8.
- [20] Wang C, Shi JZ, Ge JC, et al. Left ventricular systolic and diastolic dyssynchrony to improve cardiac resynchronization therapy response in heart failure patients with dilated cardiomyopathy[J]. *J Nucl Cardiol*, 2021, 28(3): 1023–1036. DOI: 10.1007/s12350-020-02132-1.
- [21] Peix A, Karthikeyan G, Massardo T, et al. Value of intraventricular dyssynchrony assessment by gated-SPECT myocardial perfusion imaging in the management of heart failure patients undergoing cardiac resynchronization therapy (VISION-CRT)[J]. *J Nucl Cardiol*, 2021, 28(1): 55–64. DOI: 10.1007/s12350-018-01589-5.
- [22] Aljaroudi WA, Hage FG, Hermann D, et al. Relation of left-ventricular dyssynchrony by phase analysis of gated SPECT images and cardiovascular events in patients with implantable cardiac defibrillators[J]. *J Nucl Cardiol*, 2010, 17(3): 398–404. DOI: 10.1007/s12350-009-9169-7.
- [23] Zafrir N, Bental T, Strasberg B, et al. Yield of left ventricular dyssynchrony by gated SPECT MPI in patients with heart failure prior to implantable cardioverter-defibrillator or cardiac resynchronization therapy with a defibrillator: characteristics and prediction of cardiac outcome[J]. *J Nucl Cardiol*, 2017, 24(1): 122–129. DOI: 10.1007/s12350-015-0310-5.
- [24] Zhang HX, Hou XF, Wang Y, et al. The acute and chronic effects of different right ventricular site pacing on left ventricular mechanical synchrony as assessed by phase analysis of SPECT myocardial perfusion imaging[J]. *J Nucl Cardiol*, 2014, 21(5): 958–966. DOI: 10.1007/s12350-014-9912-6.
- [25] Zhang FF, Yang W, Wang YT, et al. Is there an association between hibernating myocardium and left ventricular mechanical dyssynchrony in patients with myocardial infarction?[J]. *Hell J Nucl Med*, 2018, 21(1): 28–34. DOI: 10.1967/s002449910704.
- [26] Van Tosh A, Votaw JR, Cooke CD, et al. Relationships between left ventricular asynchrony and myocardial blood flow[J]. *J Nucl Cardiol*, 2017, 24(1): 43–52. DOI: 10.1007/s12350-015-0270-9.
- [27] Karacalioglu AO, Balta S, Emer O, et al. Phase analysis in patients with reversible perfusion defects and normal coronary arteries at angiography[J]. *Ann Nucl Med*, 2013, 27(5): 416–422. DOI: 10.1007/s12149-013-0700-1.
- [28] Gimelli A, Liga R, Giorgetti A, et al. Determinants of left ventricular mechanical dyssynchrony in patients submitted to myocardial perfusion imaging: a cardiac CZT study[J]. *J Nucl Cardiol*, 2016, 23(4): 728–736. DOI: 10.1007/s12350-015-0247-8.
- [29] 崔博, 刘保平, 谢新立, 等. 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[J]. *国际放射医学核医学杂志*, 2018, 42(2): 115–120. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2018.02.004.
Cui B, Liu BP, Xie XL, et al. Assessment of the value of summed stress score and phase analysis of gated myocardial perfusion imaging in the severity of coronary artery lesion[J]. *Int J Radiat Med Nucl Med*, 2018, 42(2): 115–120. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2018.02.004.
- [30] Lin WL, Wang SY, Shiao YC, et al. The clinical usefulness of phase analysis in detecting coronary artery disease using dipyridamole thallium-201-gated myocardial perfusion imaging with a cadmium-zinc-telluride camera[J]. *J Nucl Cardiol*, 2020, 27(1): 241–250. DOI: 10.1007/s12350-018-1417-2.
- [31] Venkataraman R, Chen J, Garcia EV, et al. Effect of ranolazine on left ventricular dyssynchrony in patients with coronary artery disease[J]. *Am J Cardiol*, 2012, 110(10): 1440–1445. DOI: 10.1016/j.amjcard.2012.06.055.
- [32] 张飞飞, 王建锋, 邵晓梁, 等. 冠状动脉旁路移植术前存活心肌和术后左心室机械不同步对冠心病患者的预后判断价值[J]. *中华核医学与分子影像杂志*, 2018, 38(7): 466–470. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2018.07.003.
Zhang FF, Wang JF, Shao XL, et al. Clinical value of

- preoperative viable myocardium and postoperative left ventricular mechanical dyssynchrony for prognosis evaluation in patients undergoing coronary artery bypass graft[J]. *Chin J Nucl Med Mol Imaging*, 2018, 38(7): 466–470. DOI: [10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2018.07.003](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2018.07.003).
- [33] Park S, Cheon GJ, Paeng JC, et al. Phase analysis of gated myocardial perfusion single-photon emission computed tomography after coronary artery bypass graft surgery: reflection of late reverse remodeling in patients with patent grafts after coronary artery bypass graft surgery[J]. *Nucl Med Commun*, 2016, 37(11): 1139–1147. DOI: [10.1097/MNM.0000000000000565](https://doi.org/10.1097/MNM.0000000000000565).
- [34] Hess PL, Shaw LK, Fudim M, et al. The prognostic value of mechanical left ventricular dyssynchrony defined by phase analysis from gated single-photon emission computed tomography myocardial perfusion imaging among patients with coronary heart disease[J]. *J Nucl Cardiol*, 2017, 24(2): 482–490. DOI: [10.1007/s12350-015-0388-9](https://doi.org/10.1007/s12350-015-0388-9).
- [35] 罗诗雨, 姚稚明, 陈聪霞, 等. 门控心肌灌注显像相位分析预测冠心病主要心脏不良事件的价值[J]. *中华核医学与分子影像杂志*, 2020, 40(3): 136–141. DOI: [10.3760/cma.j.cn321828-20190816-00171](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn321828-20190816-00171).
- Luo SY, Yao ZM, Chen CX, et al. Predictive value of phase analysis of gated myocardial perfusion imaging for major adverse cardiac events in patients with coronary artery disease[J]. *Chin J Nucl Med Mol Imaging*, 2020, 40(3): 136–141. DOI: [10.3760/cma.j.cn321828-20190816-00171](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn321828-20190816-00171).
- [36] Cho SG, Jabin Z, Park KS, et al. Clinical values of left ventricular mechanical dyssynchrony assessment by gated myocardial perfusion SPECT in patients with acute myocardial infarction and multivessel disease[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2017, 44(2): 259–266. DOI: [10.1007/s00259-016-3542-y](https://doi.org/10.1007/s00259-016-3542-y).
- [37] Fudim M, Fathallah M, Shaw LK, et al. The prognostic value of diastolic and systolic mechanical left ventricular dyssynchrony among patients with coronary heart disease[J]. *JACC Cardiovascular Imaging*, 2019, 12(7): 1215–1226. DOI: [10.1016/j.jcmg.2018.05.018](https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2018.05.018).
- [38] Wang L, Yang MF, Cai M, et al. Prognostic significance of left ventricular dyssynchrony by phase analysis of gated SPECT in medically treated patients with dilated cardiomyopathy[J]. *Clin Nucl Med*, 2013, 38(7): 510–515. DOI: [10.1097/RLU.0b013e318292eedf](https://doi.org/10.1097/RLU.0b013e318292eedf).
- [39] Goldberg AS, Alraies MC, Cerqueira MD, et al. Prognostic value of left ventricular mechanical dyssynchrony by phase analysis in patients with non-ischemic cardiomyopathy with ejection fraction 35-50% and QRS<150 ms[J]. *J Nucl Cardiol*, 2014, 21(1): 57–66. DOI: [10.1007/s12350-013-9787-y](https://doi.org/10.1007/s12350-013-9787-y).
- [40] Alvandi M, Shaghaghi Z, Aryafar V, et al. The evaluation of left ventricular dyssynchrony in hypertensive patients with a preserved systolic function undergoing gated SPECT myocardial perfusion imaging[J]. *Ann Nucl Med*, 2019, 33(12): 899–906. DOI: [10.1007/s12149-019-01402-4](https://doi.org/10.1007/s12149-019-01402-4).
- [41] Malik D, Mittal BR, Sood A, et al. Prognostic value of left ventricular mechanical dyssynchrony indices in long-standing type II diabetes mellitus with normal perfusion and left ventricular systolic functions on SPECT-MPI[J]. *J Nucl Cardiol*, 2020, 27(5): 1640–1648. DOI: [10.1007/s12350-018-1436-z](https://doi.org/10.1007/s12350-018-1436-z).
- [42] 邱春, 林艳, 顾伟英, 等. 门控心肌灌注显像相位分析对弥漫性大B细胞淋巴瘤患者蒽环类药物所致心肌损害的早期诊断价值[J]. *中华核医学与分子影像杂志*, 2019, 39(10): 591–596. DOI: [10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2019.10.004](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2019.10.004).
- Qiu C, Lin Y, Gu WY, et al. Phase analysis of gated myocardial perfusion imaging for early diagnosis of cardiotoxicity caused by anthracyclines in patients with diffuse large B-cell lymphoma [J]. *Chin J Nucl Med Mol Imaging*, 2019, 39(10): 591–596. DOI: [10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2019.10.004](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2019.10.004).
- [43] Aljaroudi W. Mechanical dyssynchrony with phase analysis of gated SPECT: nap time is over[J]. *J Nucl Cardiol*, 2018, 25(6): 2039–2043. DOI: [10.1007/s12350-017-0951-7](https://doi.org/10.1007/s12350-017-0951-7).
- [44] De Souza Filho EM, Mesquita CT. Phase analysis of gated myocardial perfusion SPECT and cardiac resynchronization therapy: the good, the bad, and the ugly[J]. *J Nucl Cardiol*, 2021, (3): 1136–1139. DOI: [10.1007/s12350-020-02056-w](https://doi.org/10.1007/s12350-020-02056-w).
- [45] Lee R, Shah RV, Murthy VL. Assessment of dyssynchrony by gated myocardial perfusion imaging does not improve patient management[J]. *J Nucl Cardiol*, 2018, 25(2): 526–531. DOI: [10.1007/s12350-017-1022-9](https://doi.org/10.1007/s12350-017-1022-9).

(收稿日期: 2020-06-07)