

双源双能量 CT 心肌灌注成像的研究进展

郑雪 孙凯

014040, 内蒙古医科大学包头临床医学院, 包头市中心医院影像科

通信作者: 孙凯, Email: Henrysk@163.com

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2016.04.013

【摘要】 近年来, 双源双能量 CT 心肌灌注成像在临床中的应用及研究逐渐增多, 能够反映心肌微循环状况, 定性及定量地评价心肌血流状态, 检测心肌微循环及心肌活性, 并且可以在评估冠状动脉的同时评估由于心肌缺血导致的心肌受损情况。其诊断心肌损伤的灵敏度、特异度、阴性预测值和阳性预测值与组织病理学检查的一致性好。相对于其他检查技术, 双能量心肌灌注成像能便捷地提供更丰富的临床信息。笔者对双源双能量 CT 心肌灌注成像的研究进展进行综述。

【关键词】 心肌灌注显像; 体层摄影术, X 线计算机; 双能量

基金项目: 国家自然科学基金(81560286); 内蒙古自治区卫生和计划生育委员会项目(201302124)

Progress of dual-energy myocardial perfusion imaging by dual-source computed tomography

Zheng Xue, Sun Kai

Department of Image, Inner Mongolia Medical University, Baotou Central Hospital, Baotou 014040, China

Corresponding author: Sun Kai, Email: Henrysk@163.com

【Abstract】 In recent years, dual-energy myocardial perfusion imaging via dual-source CT has been extensively used in clinical diagnoses and research. This technique can reflect the condition of myocardial microcirculation blood flow, qualitatively and quantitatively evaluate myocardial blood flow, identify myocardial microcirculation and myocardial viability, assess myocardial damage caused by myocardial ischemia, and assess the coronary artery. The sensitivity, specificity, negative predictive value, and positive predictive value of the diagnosis of myocardial damage demonstrated good consistency with pathologic tissue examination. Compared with other techniques, dual-energy myocardial perfusion imaging provides more detailed clinical information. This paper reviews the progress of dual-energy myocardial perfusion imaging via dual-source CT in clinical applications.

【Key words】 Myocardial perfusion imaging; Tomography, X-ray computed; Dual energy

Fund program: National Natural Science Foundation of China(81560286); Inner Mongolia Autonomous Region Health and Family Planning Commission(201302124)

心肌灌注成像(myocardial perfusion imaging, MPI)是指在团注碘对比剂后心肌组织密度随时间而变化, 根据不同的数学模型计算出组织的血流灌注量、血流容积等参数, 进行定量评价心肌的灌注程度, 是评价心肌微循环和判断心血管疾病预后及不良事件的重要无创性检查方法^[1]。

1 MPI 技术的比较

目前 MPI 技术主要有 MR-MPI、PET/CT、SPECT、负荷超声心动图、CT-MPI 等。核素 MPI 作为心肌灌注的经典方法, 多被认为是心肌灌注诊断冠心病

的参考标准, 在临床上应用较多, 但其检查程序复杂, 检查时间长, 同时其空间分辨率低^[2], 不能同时显示心脏解剖细节和缺血区责任血管, 尤其不能显示心内膜下心肌梗死或缺血, 对早期、无症状冠心病的诊断不敏感, 对于三血管平衡缺血区易产生假阴性, 且不能显示冠状动脉的管腔结构。负荷超声心动图检查多通过负荷诱导心肌缺血从而显示病变血管远端区域的室壁运动异常^[3]。超声图像分辨率低, 需要足够的声学窗, 且结果的判断亦以观察者的主观印象为主, 缺乏量化指标, 易受人为因素的影响, 限制了其在临床的广泛应用。MR-MPI

的时间、空间分辨率尚可,可显示心肌缺血的范围和活力,但容易高估缺血程度,且MR-MPI属于定性或半定量评价,不能定量地分析实际心肌血流量,MRI数据采集的时间长,技术难度也较大,对幽闭恐惧症、携起搏器等患者有一定限制。多层螺旋CT具有较好的时间、空间分辨率,CT-MPI可避免上述限制,在某些方面弥补其他灌注方式的不足。且双源CT的迭代重建技术(sinogram affirmed iterative reconstruction, SAFIRE)可通过降低图像噪声,提高信噪比,从而有效地减低辐射剂量。

2 CT-MPI的发展

2.1 CT动态MPI的发展

CT-MPI经历了电子束CT(electron beam computed tomography, EBCT)、普通多排螺旋CT(≤ 64 螺旋CT)、超宽探测器CT(256排、320排)以及双源CT心肌灌注的发展阶段。CT灌注成像最早出现在20世纪80年代,利用EBCT发射的电子束轰击扫描架上的靶环产生射线^[4]。EBCT时间分辨率较高,可以在冠状动脉成像的同时,得到全心静息和负荷状态下血流量以及灌注贮存比,但其空间分辨率低,对冠状动脉或病变的细节显示不清,不能达到临床诊断的要求,且EBCT设备昂贵,检查费用高,不适于临床,现已基本被淘汰。

随着多排螺旋CT的应用,研究显示CT-MPI对心肌缺血诊断灵敏度、特异度可达78%~88%和70%~79%,与核素心肌灌注结果的一致性达83%~89%。2004年Hoffmann等^[5]结扎猪的前降支建立急性心肌梗死模型,使用4节多探头螺旋CT进行心肌灌注扫描,结果表明,梗死区心肌较正常心肌灌注减低并且和病理染色结果相一致。随着超宽探测器CT进入临床,256排、320排乃至640排超宽探测器断层可进行全心脏同层动态CT-MPI,George等^[6-7]和Ko等^[8]分别使用超宽探测器CT(256、320排)研究全心MPI诊断冠状动脉疾病的灵敏度和特异度分别为81%、76%和85%、84%,且探测器面积可达160mm,只需1圈不动床扫描即可完整覆盖心脏,获取全心脏范围扫描数据,且不产生阶梯状伪影,受试者所受射线剂量较低,平均有效辐射剂量均在10mSv以内。双源CT在后64层CT系列机型中具有独特的成像结构和优势,其独有的大螺距动态穿梭扫描能力也使全心MPI

成为可能,同时,由于采用与大螺距动态穿梭扫描相匹配的适宜准直(与256、320排CT采用的超宽准直不同),射线束较窄,减少了锥形束伪影的产生,可获得较为准确的心肌灌注参数,明显增加射线束利用率,使辐射剂量进一步降低。

2.2 双源双能量CT-MPI(dual energy CT-MPI, DE-CT-MPI)的发展

2008年Ruzsice等^[9]应用第一代双源CT对35例冠心病患者的冠状动脉狭窄情况和心肌灌注情况进行评价,并与冠状动脉造影以及SPECT心肌灌注进行比较,首次报道了DE-CT-MPI检测心肌缺血具有较高的准确率。2011年Feuchtnner等^[10]应用第二代双源CT行腺苷负荷实验得到冠状动脉图像,与冠状动脉造影MR-MPI相比,其诊断 $>70\%$ 狭窄及心肌灌注缺损的准确率较高。2012年Feuchtnner等^[11]应用CT血管造影(CT angiography, CTA)、CT-MPI与SPECT核素心肌显像进行对比,结果显示,CT-MPI及CTA诊断的灵敏度和特异度分别为92%、70.4%和95%、95.5%,因此CTA结合CT-MPI可以明显提高诊断的阳性预测值。2014年Koonce等^[12]采用体模验证了第一代和第二代DE-CT-MPI扫描的准确率,结果表明,第二代DE-CT-MPI的准确率优于第一代。

3 双源DE-CT-MPI的成像特点

双源CT具有两套球管——探测器系统,被安装在同一个旋转机架上,能同时进行两种不同能量的扫描^[13]。双源DE-CT-MPI技术的首过灌注可以在显示冠状动脉解剖和病变情况的同时显示病变血管相应供血范围内的心肌的血流灌注情况^[14],能够完整地评价心脏的血流动力学情况。双能量成像是依据高低密度物质分别在高低能量下衰减特性的不同实现物质成分分离,可直接反映组织内碘浓度的差异,并可定量测量组织内对比剂浓度。对比剂首次流入心肌组织时,其效应不受对比剂再分布的影响,心肌的强化程度可以直接反映其血流量的变化。灌注缺损区心肌的对比剂浓度低于周围正常心肌,即灌注缺损区CT值较周围正常心肌低,利用其非线性融合技术和虚拟单谱成像技术可以提高延迟强化的程度,有助于鉴别灌注缺损心肌和正常心肌^[15-16]。Bamberg等^[17]研究表明动态心肌灌注可以量化心肌血流量,无创性地测定血流储备分数,

可在解剖学层面评估冠状动脉的狭窄程度,其与血流动力学的相关性上具有重要临床意义。双源 DE-CT-MPI 能有效减少定位不准和运动伪影,但上腔静脉及心腔内对比剂残余、浓度不均及金属支架等因素会导致组织不均匀吸收低能量光子而产生 X 线束硬化伪影^[18],其和缺血、梗死心肌的灌注缺损表现类似,难以区分。2014 年 Mangold 等^[19]研究认为双能量 CT 成像具有物质成分分析及线束伪影矫正功能,高低双球管发出的混合能量 X 线可按任意混合比模拟生成 40~190 keV 的单能量图像,纯化的 X 线能有效减少能量的不均匀吸收,可以有效纠正线束硬化伪影。

4 双源 DE-CT-MPI 基本成像原理

由于高密度和低密度物质对于 X 线的主要衰减方式不同,导致高、低密度物体分别在不同电压条件下产生的 X 射线衰减不同^[20]。利用此差异性,采用两种不同能量的 X 射线(最主要是电压的变化)分别对被照射物体进行成像,根据衰减值的不同对被照射物体进行二维能量空间内的定位和成像运算,从而实现对被照射物体的性质识别、定量分析等。

双源 DE-CT-MPI 的原理是在进行含碘的 CT 造影剂增强检查时,正常的心肌组织和发生梗死或缺血的心肌组织对造影剂的摄取能力是不同的,正常的心肌组织增强正常,而发生梗死或缺血的心肌组织则没有增强或增强程度降低^[21]。把造影剂在心肌组织内不同的分布情况用伪彩色表达出来,就得到了心脏双源 DE-CT-MPI。由于双能量成像是在二维能量空间里进行造影剂的识别和表达,对造影剂分布浓度的识别敏感性要大于一维能量空间(如在 80 kV 或 140 kV 的单一条件下),所以能够显著地将造影剂浓度差异的分布(即心肌灌注情况)表达出来,同时还可以对碘含量进行定量计算。

双源 DE-CT-MPI 与双源 CT 的常规心脏成像一样,可采用回顾性心电门控螺旋采集模式或心电图前瞻性心电门控序列采集模式。为了降低辐射剂量,一般采用单次对比增强获得冠状动脉 CTA 和心肌灌注两组信息。双源 DE-CT-MPI 扫描条件分别采用 100 kV 和 140 kV 两种管电压,一般不采用 80 kV 和 140 kV 的管电压组合,目的是为了提体部的低千伏扫描图像的信噪比。双源 DE-CT-MPI 的评

估主要在双能量的形态学和心肌灌注血池容量算法软件中完成^[22]。将两个球管产生的两组数据分别重建,得到 3 组数据(高能 140 kV、低能 100 kV 及高低能以一定比例的融合数据)。高、低能数据同时调入心肌灌注血池容量算法软件后,通过双能量的特殊算法,碘对比剂与软组织影像得以分离从而获取心肌内碘分布图和虚拟平扫图。通过对两者比例的调节,可同时显示心肌内碘的分布和相应的解剖信息,进而对心肌灌注进行评价。

5 双源 DE-CT-MPI 的临床应用

双源 DE-CT-MPI 的临床应用目的是在对受检者进行冠状动脉评估的同时也能够对心肌的灌注情况进行评估,并能够与对冠状动脉的诊断评估结合在一起进行观察,有利于医师作出更全面准确的诊断。双源 DE-CT-MPI 技术利用采集到的双能量心脏扫描数据经过计算得到心肌的灌注情况,在数据采集过程中不需要对心脏进行平扫,只需利用造影剂的射线能量敏感性来进行处理计算。基于正常心肌组织和受损心肌组织对造影剂的摄取差异性,双源 DE-CT-MPI 检查能够检测出心肌内很小的灌注缺损区,具有很高的灵敏度。

Ruzsics 等^[19]的初步研究结果显示,与 SPECT 相比,双源 DE-CT-MPI 检测心肌缺血的灵敏度、特异度分别为 84%、94%;而同时以导管法冠状动脉造影为参照标准,双源 DE-CT-MPI 诊断 $\geq 50\%$ 冠状动脉狭窄的灵敏度、特异度分别是 98%、88%。彭晋和张龙江^[23]研究表明,以组织病理学检查为金标准,双源 DE-CT-MPI 诊断心肌损伤的灵敏度、特异度、阴性预测值和阳性预测值分别为 89.3%、93.5%、78.1%、97.1%;Kappa 值为 0.79,与组织病理学检查结果的一致性良好。Ko 等^[24]与 Weininger 等^[25]分别进行了负荷双源 DE-CT-MPI 的研究,灵敏度和特异度可分别达 98%、93% 和 100%、99%,较 SPECT 诊断准确率有了进一步的提高;Weininger 等^[25]的临床研究发现,双源 DE-CT-MPI 诊断冠状动脉疾病的灵敏度达 84%,特异度 94%,准确率 92%,同时 Ko 等^[24]发现,双源 DE-CT-MPI 对于狭窄程度 $> 50\%$ 的冠状动脉评估的灵敏度也达到了 98%,特异度达 88%,准确率达 92%。孙凯等^[26]建立猪急性心肌梗死的模型研究表明,利用第二代双源 DE-CT-MPI 的扫描方式可实现

“一站式”获得心肌灌注和冠状动脉的图像, 进一步提高了心脏 CT 检测心肌梗死的准确率, 有效辐射剂量低。综上所述, 双源 DE-CT-MPI 能够评估冠状动脉的同时评估由于心肌缺血导致的心肌受损情况。国内外学者关于双源 DE-CT-MPI 的检测性能评价见表 1。

表 1 双源双能量 CT 对急性心肌梗死及冠心病的检测性能(%)

Table 1 Dual-source and dual energy CT detection performance in monitoring of acute myocardial infarction and coronary heart disease(%)

参考文献	灵敏度	特异度	阳性预测值	阴性预测值	准确率
Weininger 等 ^[25]	86.0	98.0	94.0	96.0	88.0
孙凯等 ^[26]	93.0	95.0	95.0	93.0	86.0
Peng 等 ^[27]	85.0	84.1	65.4	94.1	84.3
Hulten 等 ^[28]	88.0	82.0	74.0	92.0	84.0
Abdel-Rahman 等 ^[29]	87.0	86.0	74.0	92.0	70.0
王瑞等 ^[30]	76.0	85.0	76.0	83.0	81.0

6 展望

双源 DE-CT-MPI 不仅可以准确评价冠状动脉和心脏的解剖学信息, 又可同时评价心肌灌注学, 实现了冠状动脉成像联合心肌灌注一站式解剖学与功能学的结合, 更利于对患者病情的真实情况进行全面分析。2015 年推出的第三代双源 CT 即 FORCE CT, 时间分辨率达 66 ms, 双能量能谱更纯化, 扫描时间缩短, 具有明显的优势。然而, 目前国内尚未见关于 FORCE CT 双能量 MPI 的研究, 值得进一步探索。

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 郑雪负责论文撰写; 孙凯负责提出命题、论文审阅。

参 考 文 献

- [1] Becker A, Becker C. CT imaging of myocardial perfusion: possibilities and perspectives[J]. J Nucl Cardiol, 2013, 20(2):289-296. DOI:10.1007/s12350-013-9681-7.
- [2] Li W, Zhu X, Li J, et al. Comparison of the sensitivity and specificity of 5 image sets of dual-energy computed tomography for detecting first-pass myocardial perfusion defects compared with positron emission tomography[J/OL]. Medicine (Baltimore), 2014, 93(28):e329[2016-04-05]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25526492>. DOI:10.1097/MD.0000000000000329.
- [3] Thorstensen A, Dalen H, Hala P, et al. Three-dimensional echocardiography in the evaluation of global and regional function in patients with recent myocardial infarction: a comparison with magnetic resonance imaging[J]. Echocardiography, 2013, 30(6):682-692. DOI:10.1111/echo.12115.
- [4] 李松娜, 欧陕兴. 腺苷负荷双能量 CT 心肌灌注研究进展[J]. 影像诊断与介入放射学, 2011, 20(5):394-396. Li SN, Ou SX. Adenosine stress dual energy CT myocardial perfusion is reviewed[J]. Diagnostic Imaging Int Radiol, 2011, 20(5):394-396.
- [5] Hoffmann U, Millea R, Enzweiler C, et al. Acute myocardial infarction: contrast-enhanced multi-detector row CT in a porcine model[J]. Radiology, 2004, 231(3):697-701. DOI:10.1148/radiol.2313030132.
- [6] George RT, Jerosch-Herold M, Silva C, et al. Quantification of myocardial perfusion using dynamic 64-detector computed tomography[J]. Invest Radiol, 2007, 42(12):815-822. DOI:10.1097/RLI.0b013e318124a884.
- [7] George RT, Silva C, Cordeiro MA, et al. Multidetector computed tomography myocardial perfusion imaging during adenosine stress[J]. J Am Coll Cardiol, 2006, 48(1):153-160. DOI:10.1016/j.jacc.2006.04.014.
- [8] Ko SM, Choi JW, Song MG, et al. Myocardial perfusion imaging using adenosine-induced stress dual-energy computed tomography of the heart: comparison with cardiac magnetic resonance imaging and conventional coronary angiography[J]. Eur Radiol, 2011, 21(1):26-35. DOI:10.1007/s00330-010-1897-1.
- [9] Ruzsics B, Lee H, Zwerner PL, et al. Dual-energy CT of the heart for diagnosing coronary artery stenosis and myocardial ischemia-initial experience[J]. Eur Radiol, 2008, 18(11):2414-2424. DOI:10.1007/s00330-008-1022-x.
- [10] Feuchtner G, Goetti R, Plass A, et al. Adenosine stress high-pitch 128-slice dual-source myocardial computed tomography perfusion for imaging of reversible myocardial ischemia: comparison with magnetic resonance imaging[J]. Circ Cardiovasc Imaging, 2011, 4(5):540-549. DOI:10.1161/CIRCIMAGING.110.961250.
- [11] Feuchtner GM, Plank F, Pena C, et al. Evaluation of myocardial CT perfusion in patients presenting with acute chest pain to the emergency department: comparison with SPECT-myocardial perfusion imaging[J]. Heart, 2012, 98(20):1510-1517. DOI:10.1136/heartjnl-2012-302531.
- [12] Koonce JD, Vliegthart R, Schoepf UJ, et al. Accuracy of dual-energy computed tomography for the measurement of Iodine concentration using cardiac CT protocols: validation in a phantom model[J]. Eur Radiol, 2014, 24(2):512-518. DOI:10.1007/s00330-013-3040-6.
- [13] So A, Hsieh J, Narayanan S, et al. Dual-energy CT and its potential use for quantitative myocardial CT perfusion[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2012, 6(5):308-317. DOI:10.1016/j.jcct.2012.07.

- 002.
- [14] Bastarrika G, Ramos-Duran L, Rosenblum MA, et al. Adenosine-stress dynamic myocardial CT perfusion imaging: initial clinical experience[J]. *Invest Radiol*, 2010, 45(6):306-313.
- [15] Wichmann JL, Hu X, Kerl JM, et al. Non-linear blending of dual-energy CT data improves depiction of late Iodine enhancement in chronic myocardial infarction[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2014, 30(6):1145-1150. DOI:10.1007/s10554-014-0440-x.
- [16] Wichmann JL, Arbaciauskaite R, Kerl JM, et al. Evaluation of monoenergetic late Iodine enhancement dual-energy computed tomography for imaging of chronic myocardial infarction[J]. *Eur Radiol*, 2014, 24(6):1211-1218. DOI:10.1007/s00330-014-3126-9.
- [17] Bamberg F, Becker A, Schwarz F, et al. Detection of hemodynamically significant coronary artery stenosis: incremental diagnostic value of dynamic CT-based myocardial perfusion imaging[J]. *Radiology*, 2011, 260(3):689-698. DOI:10.1148/radiol.11110638.
- [18] Secchi F, De Cecco CN, Spearman JV, et al. Monoenergetic extrapolation of cardiac dual energy CT for artifact reduction[J]. *Acta Radiol*, 2015, 56(4):413-418. DOI:10.1177/0284185114527867.
- [19] Mangold S, Gatidis S, Luz O, et al. Single-source dual-energy computed tomography: use of monoenergetic extrapolation for a reduction of metal artifacts[J]. *Invest Radiol*, 2014, 49(12):788-793. DOI:10.1097/RLI.0000000000000083.
- [20] Petersilka M, Bruder H, Krauss B, et al. Technical principles of dual source CT. *Eur J Radiol*, 2016, 68(3):362-368. DOI:10.1016/j.ejrad.2008.08.013.
- [21] 王洁, 陈宏伟, 方向明. 负荷 CT 心肌灌注在冠心病中应用的初步研究进展[J]. *国际医学放射学杂志*, 2013, 36(2):122-126. DOI:10.3874/j.issn.1674-1897.2013.02.Z0204.
- Wang J, Chen HW, Fang XM. Stress CT myocardial perfusion imaging in coronary artery disease: preliminary study progress[J]. *Int J Med Radiol*, 2013, 36(2):122-126.
- [22] 王未, 张龙江, 卢光明, 等. 第二代双源双能量 CT 心肌灌注成像的初步应用[J]. *放射学实践*, 2014, 29:993-997. DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2014.09.003.
- Wang W, Zhang LJ, Lu GM, et al. Preliminary application of second-generation dual-source dual-energy CT in myocardial perfusion imaging[J]. *Radiol Practice*, 2014, 29:993-997.
- [23] 彭晋, 张龙江. 双源双能量 CT 成像评估猪急性心肌缺血再灌注损伤的实验研究[J]. *中华放射学杂志*, 2011, 45(10):974-979. DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2011.10.019.
- Peng J, Zhang LJ. Dual source dual energy CT of acute myocardial ischemic reperfusion injury: an experimental study in swine[J]. *Chin J Radiol*, 2011, 45(10):974-979.
- [24] Ko BS, Cameron JD, Meredith IT, et al. Computed tomography stress myocardial perfusion imaging in patients considered for revascularization: a comparison with fractional flow reserve[J]. *Eur Heart J*, 2012, 33(1):67-77. DOI:10.1093/eurheartj/ehr268.
- [25] Weininger M, Schoepf UJ, Ramachandra A, et al. Adenosine-stress dynamic real-time myocardial perfusion CT and adenosine-stress first-pass dual-energy myocardial perfusion CT for the assessment of acute chest pain: initial results[J]. *Eur J Radiol*, 2012, 81(12):3703-3710. DOI:10.1016/j.ejrad.2010.11.022.
- [26] 孙凯, 李坤成, 韩瑞娟, 等. 第二代双源 CT 冠状动脉成像结合双能量心肌灌注评价猪急性心肌梗死的实验研究[J]. *国际放射医学核医学杂志*, 2015, 39(3):209-214. DOI:10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2015.03.005.
- Sun K, Li KC, Han RJ, et al. Evaluation of combined coronary CT angiography and dual-energy myocardial perfusion imaging for detection of acute myocardial infarction via second-generation dual-source CT: an experimental study in a porcine phantom model[J]. *Int J Radiat Med Nucl Med*, 2015, 39(3):209-214.
- [27] Peng J, Zhang LJ, Schoepf UJ, et al. Acute myocardial infarct detection with dual energy CT: correlation with single photon emission computed tomography myocardial scintigraphy in a canine model[J]. *Acta Radiol*, 2013, 54(3):259-266. DOI:10.1258/ar.2012.120104.
- [28] Hulten E, Ahmadi A, Blankstein R. CT assessment of myocardial perfusion and fractional flow reserve[J]. *Prog Cardiovasc Dis*, 2015, 57(6):623-631. DOI:10.1016/j.pcad.2015.03.003.
- [29] Abdel-Rahman AS, Aly HI, Saleh MA, et al. Alternative technique using dual source CT imaging for assessment of myocardial perfusion[J]. *Egyptian J Radiol Nucl Med*, 2015, 46(2):339-354. DOI:10.1016/j.ejmm.2015.01.003
- [30] 王瑞, 张兆琪, 郭森, 等. 双能量 CT 冠状动脉成像结合 CT 心肌灌注诊断冠心病准确性的初步研究[J]. *中华放射学杂志*, 2011, 45(2):111-115. DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2001.02.004.
- Wang R, Zhang ZQ, Guo M, et al. Dual-energy CT angiography plus CT perfusion-diagnostic value in coronary artery disease: initial experience[J]. *Chin J Radiol*, 2011, 45(2):111-115.

(收稿日期: 2016-04-11)