

## ·综述·

## 影像融合技术在冠心病中的临床应用进展

陈越 李剑明

**【摘要】** 冠心病的诊断越来越倚重于多种影像学手段的联合。解剖与功能的融合影像实现了便捷的“一站式”检查,完善了现有的影像学诊断流程。影像融合技术如 SPECT/冠状动脉造影、SPECT/CT,尤其是 PET/CT 的飞速发展,在冠心病的诊断、危险度分层、治疗方案的制定及预后评估等方面具有明显优于单一影像学检查的医学价值,更加完善的影像学资料及定量分析数据为临床提供了更多有用的信息。

**【关键词】** 冠状动脉疾病;正电子发射断层显像术;体层摄影术,发射型计算机,单光子;体层摄影术,X线计算机;融合影像

**Advances on the clinical applications of the image fusion techniques in coronary heart disease**

Chen Yue, Li Jianming. Department of Nuclear Medicine, TEDA International Cardiovascular Hospital, Tianjin 300457, China

Corresponding author: Li Jianming, Email: ichlijm@163.com

**【Abstract】** The diagnosis of coronary heart disease increasingly depends on referring and combining the information from a variety of imaging techniques. The fusion imaging of the anatomy and function provides a convenient "one stop" examination which improves the existing imaging examination process. The development of the image fusion techniques, such as SPECT/coronary angiography, SPECT/CT, especially PET/CT, has shown a larger value in the diagnosis, risk stratification, clinical treatment guidance and efficacy prognosis of coronary heart disease than a single imaging examination, while the more complete data of the image and the quantitative analysis provide more useful information for the clinic.

**【Key words】** Coronary disease; Positron-emission tomography; Tomography, emission-computed, single-photon; Tomography, X-ray computed; Fusion imaging

## 1 概述

冠心病的全称为冠状动脉性心脏病。经过长期、大量的临床实践及研究证实:冠心病早期、准确地诊断对于患者的治疗及预后有着十分重大的意义。随着医学科技的发展,各种影像学技术在冠心病诊断方面的应用达到了一个新的高度。从各影像学技术的实质来看,可分为解剖形态学影像及功能学影像,前者如超声、侵入性冠状动脉造影(coronary angiography, CAG)、CT 冠状动脉造影(CT coronary angiography, CTCA)、心脏磁共振(cardiac magnetic resonance, CMR)等;后者以 SPECT 和 PET 为代表。

各种技术虽然各有优势,但单一的影像均不能很好地同时提供心脏及冠状动脉(以下简称冠脉)的解剖形态学和功能学信息。仅凭单一的影像学检查会导致对冠心病的诊断尤其是病情的准确评估存在一定的片面性。

目前临床中对冠心病患者的诊断评价通常会采用多种影像学检查联合的方法,以获得更为全面、准确的信息,并得到很好的显像效果。心肌灌注显像(myocardial perfusion imaging, MPI)是观察心肌血流和功能的直观影像学方法,美国将其作为稳定性心绞痛患者行 CAG 前的必要检查<sup>[1]</sup>;CTCA 等则对冠脉病变解剖异常有绝对的指导作用,它与 MPI 提供的医学信息相互补充,形成“优势互补”,对于冠心病的诊断、危险度分层、治疗方案的制定及预后评估提供了大量有价值的信息<sup>[2]</sup>。因此,在使用 MPI 观察心肌功能的同时,融合血管病变的影像成为了科研的重点。

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2014.01.008

**基金项目:** 天津市卫生局科技基金(2011KZ12);天津市滨海新区卫生局医药卫生科技项目(2011BHKY004);天津市滨海新区医疗卫生科技项目(2012-BK15W005)

**作者单位:** 300457 天津,泰达国际心血管病医院核医学科

**通信作者:** 李剑明(Email: ichlijm@163.com)

随着科技的发展,目前已实现了解剖形态学影像与功能学影像的异机或同机融合,并且形成了“一站式(one stop)”的检查流程,这种新的影像学技术能同时提供冠脉解剖形态学信息和心肌血流灌注情况,提示患者心肌损伤与冠脉病变的关联,从单一的血管或心肌病变诊断,上升到对功能相关病变冠脉的测定,融合影像学技术在为患者提供方便的同时,也为临床医师提供了更多的诊断信息,改善了原有的诊断冠心病的模式。以下将对冠脉解剖与功能影像融合技术的研究进展进行综述。

## 2 影像融合在冠心病中的技术进展

2005年时 Hacker 等<sup>[3]</sup>就已经提出:CTCA 具有很高的灵敏度,能提供血管病变的信息,结合 SPECT 或 PET 的 MPI 可以检测导致血流动力学异常的血管狭窄性病变,肯定了两种无创性检查对于后续治疗的指导意义,并预言此后的研究方向应该是 MPI 与 CTCA 影像的融合。

冠脉解剖与功能影像融合技术的发展经历了异机融合与同机融合两个阶段,前者基于第三方软件(CardIQ Fusion 等)的处理,将两台设备上的图像进行融合;后者基于高端硬件科技,实现了同机完成两种显像并通过软件(AutoQUANT 等)进行影像融合<sup>[4]</sup>。异机与同机融合技术不同,但都可以实现解剖与功能的影像融合,应用价值是一致的。

参与影像融合的检查方面,在 CTCA 未开展之前,人们尝试将 CAG 与 MPI 融合,Nishimura 等<sup>[5]</sup>将 CAG 左前斜 60°和右前斜 30°的图像与 MPI 的三维心肌图像匹配,得到冠脉树与心肌血流灌注融合影像,并认为这种融合图像可以更好地评价冠脉血管病变与相应心肌血流灌注异常的关系,使病灶定位更精准,并且在心肌功能和靶血管病变信息的提示下,有利于指导血运重建治疗及预后评估。但 CAG 与 MPI 的融合影像存在一定的局限性,如:需要高度一致的图像匹配,操作要求高;辐射剂量总量较高;CAG 为有创性检查,应于 MPI 等无创性检查筛查后实施,否则会降低 CAG 的阳性率,不符合科学的临床路径,也增加了患者额外的经济负担。

无创性 CTCA 被认为是与 MPI 融合的理想影像,多层螺旋 CT 的发展推动了这种融合影像学技术的开展,特别是 64 排 CT 的加入,时间分辨率

的改善大大减少了心率对成像的影响,进一步提高了成像质量<sup>[6]</sup>。尽管二者的异机融合同样面临图像匹配精度的问题,但随着 SPECT/CT 和 PET/CT 的问世和发展,CTCA 和 MPI 两种无创性影像技术实现了从“异机”到“同机一体化”,通过先进的图像处理软件完成高质量、高精度的图像融合<sup>[7]</sup>。MPI 与 CTCA 的影像融合经大量研究证明,其可操作性及合理性要明显高于与 CAG 融合,因此在诊断冠心病、了解冠脉病变及其病理生理方面有重要价值<sup>[8-9]</sup>。

PET/CT 近年来发展较快,与 SPECT/CT 同为解剖与功能学影像的融合显像技术,相比之下却有着更大的优势,主要包括对冠心病的诊断准确率更高、辐射剂量更小、空间分辨更精细、可即时显像和定量分析等,在诊断、危险度分层、治疗方案决策及预后评估等方面发挥着重要作用<sup>[10-11]</sup>。PET 所用的显像剂不同于 SPECT,多种显像剂在不同方面发挥着针对性很强的作用,各国学者也在不断开发更为适用的新显像剂,目前心肌灌注常见的显像剂为  $^{82}\text{Rb}$ 、 $^{13}\text{N-NH}_3$  和  $^{15}\text{O-H}_2\text{O}$ ,心肌代谢常用的显像剂为  $^{18}\text{F-FDG}$ 。新显像剂如  $^{18}\text{F-flurpiridaz}$  等尚处于临床试验阶段,但应用前景值得期待<sup>[10]</sup>。

## 3 影像融合在冠心病中的临床应用

### 3.1 冠心病诊断,“犯罪血管”鉴别

目前的观点普遍认为,当冠脉狭窄达到 50%~60%以上,才可能引起血流动力学改变,而冠脉狭窄致心肌供血不足引起心脏功能障碍或器质性病变才能诊断为冠心病,故单纯以冠脉解剖性狭窄诊断冠心病,具有一定的片面性,不能真正全面反映冠心病的内涵。

SPECT/CT 和 PET/CT 的 CTCA 与 MPI 的异机或同机融合中,CTCA 提供冠脉病变信息,MPI 提供心肌血流灌注情况,通过对二者融合图像的匹配情况进行分析,可进一步明确冠心病诊断及确定“犯罪血管”——功能相关冠脉病变,还可以对该冠脉病变所致心肌损伤程度有直观了解,评估冠脉狭窄是否具有临床意义,便于正确评估病情。

Rispler 等<sup>[12]</sup>研究发现,仅用 CTCA 诊断冠心病的灵敏度、特异度、阳性预测值和阴性预测值分别为 96%、63%、31%和 99%,而应用 MPI 联合 CTCA 诊断时上述指标分别为 96%、95%、76%和 99%,可

见影像融合在提高特异度和阳性预测值方面的优势明显。王倩等<sup>[13]</sup>也证实, MPI/CTCA 对冠心病的诊断及评价冠脉病变功能改变的灵敏度、特异度、阳性预测值、阴性预测值和准确率分别为 96.43%、90.32%、81.82%、98.25%和 92.22%, 同比均明显高于单一 MPI 或 CTCA 检查。另外, Thilo 等<sup>[14]</sup>还提出, MPI 融合 CTCA 可以“一站式”检测冠脉的解剖及心肌灌注功能, 并通过衰减校正提高冠心病的诊断准确率, 肯定了 MPI 和 CTCA 的阴性结果对于排除冠心病的重要作用。李剑明等<sup>[15-16]</sup>也证实: CTCA 预测心肌灌注缺损的诊断特异度和阴性预测值较佳; 当管腔狭窄 $\geq 75\%$ 时, 其阳性预测值较 $\geq 50\%$ 时有明显提高, 对功能相关性冠脉狭窄的检测能力提高。

PET/CT 与 SPECT/CT 在诊断冠心病及“犯罪血管”中有着同样的临床价值, 相比之下, PET/CT 的显像剂有着更广阔的研究和应用空间, 在<sup>13</sup>N-NH<sub>3</sub>、<sup>15</sup>O-H<sub>2</sub>O、<sup>82</sup>Rb 等显像剂的临床应用中, 大量研究均得出了令人满意的结果, 不仅在提高灵敏度、特异度、阳性及阴性预测值和准确率方面有明显优势, 而且有效地降低了总辐射剂量, 这种 PET/CT 融合影像使冠脉树与心肌节段有了更精确的匹配, 可以更准确地判定“犯罪血管”, 并为治疗提供指导意见<sup>[17-19]</sup>。

### 3.2 定量分析, 危险度分层

融合影像不仅可以在视觉诊断中提供准确而有力的证据, 其定量化分析也为临床提供了很多额外的重要信息, 这一点在 PET/CT 显像中尤为突出。与 SPECT 提供的左心室射血分数(left ventricle ejection fraction, LVEF)相比, PET 可获取负荷试验过程中的 LVEF, 负荷与静息显像中 LVEF 的变化在危险度评估及预后评价中具有重要意义<sup>[20]</sup>。

心肌血流量(myocardial blood flow, MBF)和冠状动脉血流储备(coronary flow reserve, CFR)是 PET/CT 可以提供的重要定量指标, 对冠心病的诊断、病情评估及预后均有价值, 逐渐开始在临床中被常规应用, 也有大量研究表明, MBF 与性别、年龄、体重指数及多个冠心病的危险因素有关联<sup>[21]</sup>。在 Heijne 等<sup>[22]</sup>报道的个例中, PET/CT 融合影像显示出了患者的病变冠脉以及相应心肌灌注损伤, 并定量计算出单支冠脉 MBF 和 CFR, 在直观观察病变部位解剖功能影像的同时, 量化了病变冠脉功能损

伤的程度, 对患者的后续治疗提供了有力支持。

冠脉动脉钙化(coronary artery calcification, CAC)斑块会影响 CTCA 对冠脉病变的观察, 以致无法准确判断血管的狭窄程度, SPECT/CT 行 CTCA/MPI 融合显像后, 可以通过 MPI 提供的心肌灌注情况判断钙化斑块较严重的冠脉是否引起相应区域血流的变化, 且 SPECT/CT 或 PET/CT 的 CT 衰减校正扫描就可以得到较准确的 CAC 评分, 不但可以明确诊断并进行危险度分层, 指导合理化治疗和预后评价, 还避免了患者接受单独扫描计算钙化积分的额外辐射<sup>[23-24]</sup>。

Schenker 等<sup>[25]</sup>研究指出, 当 CAC 评分大于 400 时, 心肌灌注异常的情况明显增多; 而当 CAC 评分大于 1000 时, 不论心肌灌注有无异常, 心脏不良事件的年发生率均明显增高。也有研究表明: CAC 评分与 MBF、CFR 等指标及冠心病危险因素存在一定关联, 揭示了 CAC 与心脏冠脉功能之间的关系以及受冠心病危险因素的影响程度, 证明了 CAC 评分在综合分析评估冠心病方面的价值<sup>[26-27]</sup>。

对冠脉粥样硬化患者冠脉斑块性质的鉴别有利于危险度分层和预后评价, PET/CT 融合显像不仅可以对斑块进行精确定位, 而且利用 <sup>18</sup>F-FDG 作为显像剂, 可以检测有炎性反应的易损斑块, 做到定性、定位检查, 这种技术在近年来已经逐渐受到临床重视。在 Alexanderson 等<sup>[28]</sup>报道的个例中, <sup>18</sup>F-FDG PET/CT 显像能对患者冠脉上的多处钙化及非钙化斑块准确定位及定性, 并清楚地显示出斑块处冠脉狭窄的情况, 为患者后续的合理治疗提供了充分证据。但 <sup>18</sup>F-FDG 并非斑块特异性摄取, 同时也受心肌生理性摄取的干扰, 将其应用于斑块的检测还有很多需要解决的技术性问题, 存在一定的局限性。很多学者也在开发新的更为适用的显像剂, 如 <sup>68</sup>Ga-DOTATATE(即 <sup>68</sup>Ga-DOTA-octreotate, 其中, DOTA 为 1, 4, 7, 10-四氮杂环十二烷-1, 4, 7, 10-四乙酸)等, 现均处于试验阶段, 预计未来将会有突破性的进展<sup>[29]</sup>。

### 3.3 治疗决策指导与疗效评价

血管再通和重建术是冠心病的有效治疗方法, 对疗效的评价及治疗后随访、追踪病情的进展极为重要。SPECT/CT 和 PET/CT 融合显像可以同时观察冠脉血管是否通畅、支架内或桥血管内有无再狭窄及其对应供血区域的心肌血流灌注情况, 更全面地

评价患者的治疗效果和治疗后病情的发展趋势<sup>[30-31]</sup>。这种融合影像作为术前检查是评估病情、指导临床治疗选择的有效方法。Gaemperli 等<sup>[32]</sup>报道了 CTCA 与 MPI 的融合影像对引起血流受限的血管狭窄的诊断灵敏度、特异度、阳性预测值、阴性预测值和准确率均较高,并发现组中 53% 的患者不存在血运障碍,76% 的患者血管重建术后的冠脉血管与心肌缺血无关联,因此认为 CTCA/MPI 融合影像可以作为“把关者(gate keeper)”,避免临床中过度地进行有创的 CAG 检查,也避免了对非功能相关性冠脉血管进行重建的过度医疗。

### 3.4 存活心肌的检测

心肌缺血最终将导致心肌细胞的生物学改变,发生心肌顿抑、冬眠甚至坏死。顿抑心肌和冬眠心肌为存活心肌,是“可逆性”心肌损害,通过冠脉再通恢复其血供后,可实现部分或全部恢复正常,明显改善心功能并提高患者生存率,对于不存在存活心肌的区域,则不应该行侵入性手术,因为这样既会承担相应的手术风险,又不能起到改善心功能的作用<sup>[33]</sup>。

<sup>18</sup>F-FDG PET 心肌代谢显像是国际公认的检测存活心肌的金标准,CTCA 可以明确冠脉解剖形态学的病变,用 PET 静息 <sup>15</sup>N-NH<sub>3</sub> 心肌灌注与 <sup>18</sup>F-FDG 心肌代谢显像匹配检测存活心肌,再将其与 CTCA 图像进行融合,可以明确病变血管支配区域的血供及心肌的存活情况,有利于选择针对性更强的临床治疗方案,改善患者预后,且避免过度医疗的风险<sup>[4]</sup>。

近年来也有学者进行其他显像剂的探索,de Haan 等<sup>[34]</sup>对 46 例患者进行 <sup>15</sup>O-H<sub>2</sub>O 检测存活心肌的定量分析研究,得到可灌注组织指数和可灌注组织分数,并与 CMR 的钆延迟增强成像对比分析后认为,由 <sup>15</sup>O-H<sub>2</sub>O 显像得到的可灌注组织指数和可灌注组织分数可以作为冠心病患者存活心肌的标志物,且前者在假阴性的判断上优于后者。

### 3.5 其他

除冠脉狭窄性病变以外,冠脉畸形、心肌桥等也可能引起心肌血流灌注功能的改变,CTCA 与 MPI 的融合影像不仅可以通过 CTCA 检测解剖形态学的病变情况,还能同时匹配 MPI 观察相应心肌的血供情况,评价这些异常情况是否造成冠脉血供异常、影响心肌血流灌注等。对于冠脉痉挛、微血

管病变等 CTCA 结果无明显异常的情况,MPI 的功能性检查可以补充医学信息及进行辅助诊断,从而指导进一步的治疗<sup>[35]</sup>。对于这些较特殊的冠脉相关性疾病,融合影像在对其进行危险度分层、预后评估和治疗指导中有重要价值<sup>[4]</sup>。

## 4 小结与展望

解剖与功能影像融合技术在冠心病方面的主要贡献在于对该病的诊断、危险度分层、治疗指导、疗效观察及预后评估这一系统化诊疗流程的改善。目前,在核素功能影像融合技术中以 PET/CT 融合显像发展最快,应用价值也最被认可。相信随着医疗科技的发展,解剖与功能乃至分子影像融合技术在冠心病领域将会更加受到关注,越来越多地被应用于冠心病诊疗实践的临床工作中。

## 参 考 文 献

- [1] Klocke FJ, Baird MG, Lorell BH, et al. ACC/AHA/ASNC guidelines for the clinical use of cardiac radionuclide imaging—executive summary: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines (ACC/AHA/ASNC Committee to Revise the 1995 Guidelines for the Clinical Use of Cardiac Radionuclide Imaging)[J]. *Circulation*, 2003, 108(11): 1404–1418.
- [2] Li JM, Li T, Shi RF, et al. Comparative Analysis between SPECT Myocardial Perfusion Imaging and CT Coronary Angiography for Diagnosis of Coronary Artery Disease[J/OL]. *Int J Mol Imaging*, 2012, 2012 [2013-01-09]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3405566>.
- [3] Hacker M, Jakobs T, Matthies F, et al. Comparison of spiral multidetector CT angiography and myocardial perfusion imaging in the noninvasive detection of functionally relevant coronary artery lesions: first clinical experiences[J]. *J Nucl Med*, 2005, 46(8): 1294–1300.
- [4] 黄钢, 石洪成. 心脏核医学[M]. 上海: 科学技术出版社, 2011: 279–280.
- [5] Nishimura Y, Fukuchi K, Katafuchi T, et al. Superimposed display of coronary artery on gated myocardial perfusion scintigraphy[J]. *J Nucl Med*, 2004, 45(9): 1444–1449.
- [6] 孙晓昕, 田月琴. PET/CT 在冠心病的临床应用[J]. *中国医疗器械信息*, 2007, 13(7): 11–14.
- [7] Schäfers KP, Stegger L. Combined imaging of molecular function and morphology with PET/CT and SPECT/CT: image fusion and motion correction[J]. *Basic Res Cardiol*, 2008, 103(2): 191–199.
- [8] Gaemperli O, Schepis T, Kalff V, et al. Validation of a new cardiac image fusion software for three-dimensional integration of myocardial perfusion SPECT and stand-alone 64-slice CT angiography[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2007, 34(7): 1097–1106.

- [9] Gaemperli O, Schepis T, Valenta I, et al. Cardiac image fusion from stand-alone SPECT and CT: clinical experience[J]. J Nucl Med, 2007, 48(5): 696-703.
- [10] Di Carli MF, Murthy VL. Cardiac PET/CT for the evaluation of known or suspected coronary artery disease[J]. Radiographics, 2011, 31(5): 1239-1254.
- [11] Knaapen P, de Haan S, Hoekstra OS, et al. Cardiac PET-CT: advanced hybrid imaging for the detection of coronary artery disease[J]. Neth Heart J, 2010, 18(2): 90-98.
- [12] Rispler S, Keidar Z, Ghersin E, et al. Integrated single-photon emission computed tomography and computed tomography coronary angiography for the assessment of hemodynamically significant coronary artery lesions[J]. J Am Coll Cardiol, 2007, 49(10): 1059-1067.
- [13] 王蓓, 杨继敏, 米宏志, 等. 融合影像技术评价冠状动脉病变功能改变及临床价值[J]. 中国循环杂志, 2010, 25(5): 336-339.
- [14] Thilo C, Schoepf UJ, Gordon L, et al. Integrated assessment of coronary anatomy and myocardial perfusion using a retractable SPECT camera combined with 64-slice CT: initial experience[J]. Eur Radiol, 2009, 19(4): 845-856.
- [15] 李剑明, 史蓉芳, 张立仁, 等. CT血管造影在诊断功能相关性冠状动脉狭窄中的应用[J]. 中国医学影像学杂志, 2012, 20(9): 703-710.
- [16] 李剑明, 史蓉芳, 李婷, 等. 核素显像心肌灌注缺损与CTCA冠状动脉不同狭窄程度的关系分析[J]. 中华核医学杂志, 2011, 31(6): 394-399.
- [17] Namdar M, Hany TF, Koepfli P, et al. Integrated PET/CT for the assessment of coronary artery disease: a feasibility study[J]. J Nucl Med, 2005, 46(6): 930-935.
- [18] Kajander S, Joutsiniemi E, Saraste M, et al. Cardiac positron emission tomography/computed tomography imaging accurately detects anatomically and functionally significant coronary artery disease[J]. Circulation, 2010, 122(6): 603-613.
- [19] Javadi MS, Lautamäki R, Merrill J, et al. Definition of vascular territories on myocardial perfusion images by integration with true coronary anatomy: a hybrid PET/CT analysis[J]. J Nucl Med, 2010, 51(2): 198-203.
- [20] Dorbala S, Hachamovitch R, Curillova Z, et al. Incremental prognostic value of gated Rb-82 positron emission tomography myocardial perfusion imaging over clinical variables and rest LVEF[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2009, 2(7): 846-854.
- [21] Danad I, Raijmakers PG, Appelman YE, et al. Coronary risk factors and myocardial blood flow in patients evaluated for coronary artery disease: a quantitative [ $^{15}\text{O}$ ]H $_2$ O PET/CT study[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2012, 39(1): 102-112.
- [22] Heijne M, Raijmakers PG, Harms HJ, et al. Coronary steal: revealing the diagnosis with quantitative cardiac PET/CT[J]. J Nucl Cardiol, 2010, 17(6): 1118-1121.
- [23] Einstein AJ, Johnson LL, Bokhari S, et al. Agreement of visual estimation of coronary artery calcium from low-dose CT attenuation correction scans in hybrid PET/CT and SPECT/CT with standard Agatston score[J]. J Am Coll Cardiol, 2010, 56(23): 1914-1921.
- [24] Ghadri JR, Fiechter M, Fuchs TA, et al. Registry for the Evaluation of the PROgnostic value of a novel integrated imaging approach combining Single Photon Emission Computed Tomography with coronary calcification imaging (REPROSPECT)[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2013, 14(4): 374-380.
- [25] Schenker MP, Dorbala S, Hong EC, et al. Interrelation of coronary calcification, myocardial ischemia, and outcomes in patients with intermediate likelihood of coronary artery disease: a combined positron emission tomography/computed tomography study[J]. Circulation, 2008, 117(13): 1693-1700.
- [26] Danad I, Raijmakers PG, Appelman YE, et al. Quantitative relationship between coronary artery calcium score and hyperemic myocardial blood flow as assessed by hybrid  $^{15}\text{O}$ -water PET/CT imaging in patients evaluated for coronary artery disease[J]. J Nucl Cardiol, 2012, 19(2): 256-264.
- [27] Curillova Z, Yaman BF, Dorbala S, et al. Quantitative relationship between coronary calcium content and coronary flow reserve as assessed by integrated PET/CT imaging[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2009, 36(10): 1603-1610.
- [28] Alexanderson E, Slomka P, Cheng V, et al. Fusion of positron emission tomography and coronary computed tomographic angiography identifies fluorine 18 fluorodeoxyglucose uptake in the left main coronary artery soft plaque[J]. J Nucl Cardiol, 2008, 15(6): 841-843.
- [29] Rominger A, Saam T, Vogl E, et al. In vivo imaging of macrophage activity in the coronary arteries using  $^{67}\text{Ga}$ -DOTATATE PET/CT: correlation with coronary calcium burden and risk factors[J]. J Nucl Med, 2010, 51(2): 193-197.
- [30] Yoshikai M, Ikeda K, Itoh M, et al. Cardiac fusion image from myocardial perfusion scintigraphy and 64-slice computed tomography before and after coronary artery bypass grafting[J]. Eur J Cardiothorac Surg, 2009, 35(6): 1078.
- [31] Sun D, Wang J, Tian Y, et al. Multimodality imaging evaluation of functional and clinical benefits of percutaneous coronary intervention in patients with chronic total occlusion lesion[J]. Theranostics, 2012, 2(8): 788-800.
- [32] Gaemperli O, Husmann L, Schepis T, et al. Coronary CT angiography and myocardial perfusion imaging to detect flow-limiting stenoses: a potential gatekeeper for coronary revascularization?[J]. Eur Heart J, 2009, 30(23): 2921-2929.
- [33] Kobylecka M, Maćzewska J, Fronczewska-Wieniawska K, et al. Myocardial viability assessment in 18FDG PET/CT study (18FDG PET myocardial viability assessment)[J]. Nucl Med Rev Cent East Eur, 2012, 15(1): 52-60.
- [34] de Haan S, Harms HJ, Lubberink M, et al. Parametric imaging of myocardial viability using  $^{15}\text{O}$ -labelled water and PET/CT: comparison with late gadolinium-enhanced CMR[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2012, 39(8): 1240-1245.
- [35] Knuuti J, Kajander S, Mäki M, et al. Quantification of myocardial blood flow will reform the detection of CAD[J]. J Nucl Cardiol, 2009, 16(4): 497-506.

(收稿日期: 2013-01-09)