

综述

CCTA在评估冠状动脉粥样硬化易损斑块中的应用价值*

于昊冉^{1,2} 刘挨师^{2,*}

1.内蒙古医科大学(内蒙古 呼和浩特 010000)

2.内蒙古医科大学附属医院影像诊断科

(内蒙古 呼和浩特 010000)

【摘要】冠状动脉粥样硬化斑块破裂是引起急性冠脉综合征(ACS)的首要原因。检测高危(易损)斑块是动脉粥样硬化和心血管疾病管理的终极目标。随着人们对冠状动脉粥样硬化病理机制的不断了解和医学影像领域的快速发展,冠状动脉CT血管成像(CCTA)已成为诊断可疑冠心病的主要影像技术,并成为检测斑块易损性的有力手段。CCTA可对冠状动脉粥样硬化斑块负荷进行无创的全面定性定量评估,不仅能检测高危斑块的形态特征,还可通过钙化积分及一系列CT衍生技术反应斑块的不稳定程度。此外,各种成像设备的发展继续扩大了CCTA对斑块的成像能力。全文综述了CCTA在检测冠状动脉粥样硬化中的作用及当前成像上的技术进步,强调了它作为无创性操作评估易损斑块的重要价值及未来仍需完善的方面。

【关键词】冠状动脉疾病;动脉粥样硬化;易损斑块;计算机断层扫描

【中图分类号】R445.3; R543.3

【文献标识码】A

【基金项目】中华小型猪冠状动脉狭窄致慢性心肌缺血多模态CT可行性与诊断效能评价研究(2019GG070)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2023.05.062

Application Value of CCTA in Evaluating Vulnerable Coronary Atherosclerotic Plaques*

YU Hao-ran^{1,2}, LIU Ai-shi^{2,*}

Department of Imaging Diagnosis, Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010000, Inner Mongolia Autonomous region, China

ABSTRACT

Coronary atherosclerotic plaque rupture is the primary cause of acute coronary syndrome (ACS). The detection of high-risk (vulnerable) plaques is the ultimate goal of atherosclerosis and cardiovascular disease management. With the continuous understanding of the pathological mechanism of coronary atherosclerosis and the rapid development of medical imaging field, coronary artery CT angiography (CCTA) has become the main imaging technique for the diagnosis of suspected coronary heart disease and a powerful means to detect plaque vulnerability. CCTA can make a non-invasive and comprehensive qualitative and quantitative evaluation of coronary atherosclerotic plaque load. It can not only detect the morphological characteristics of high-risk plaques, but also reflect the degree of plaque instability through calcification scores and a series of CT derivative techniques. In addition, the development of various imaging devices continues to expand the plaque imaging ability of CCTA. This paper reviews the role of CCTA in the detection of coronary atherosclerosis and the current technical progress in imaging, and emphasizes its important value as a non-invasive operation to evaluate vulnerable plaques and the aspects that need to be improved in the future.

Keywords: Coronary Disease; Atherosclerosis; Vulnerable Plaque; Computed Tomography

近几年,随着社会的进步及生活质量的改善,冠心病的发病率和死亡率不断上升,已成为我国全因性死亡的主要病因^[1]。既往认为心血管事件的发生与冠状动脉管腔狭窄存在极大关联^[2]。但后续研究表明,管腔狭窄与心肌缺血、变异型心绞痛、急性心肌梗死,甚至心源性死亡等结局的相关性不高^[3]。因此,管腔狭窄程度不能完全作为急性心血管事件的预测指标,其发生主要取决于管腔内动脉粥样硬化斑块的数目与性质^[4]。Naghavi等在2003年将“所有具备破裂倾向、容易产生血栓和(或)发展迅速的高危斑块”定义为易损斑块(vulnerable plaque, VP)^[5]。纤维及钙化成分占比越重,斑块越稳定,临床发生急性心血管事件的可能性越低;相反,如果脂质成分多即易损斑块占比高,斑块发生破裂的概率越大^[6]。尸检结果表明,斑块破裂是所有急性冠脉综合征(acute coronary syndromes, ACS)的主要病理机制,占73%^[7]。因此,在临床出现症状前可靠地诊断易损斑块是心血管疾病预防和管理管理的终极目标。

斑块破裂主要发生在以薄帽纤维动脉瘤(thin cap fibroatheromas, TCFA)为特征的易损斑块中,作为斑块破裂的前驱病变^[8],TCFA有如下特点:大于斑块体积30%的富含脂质的坏死核心;覆盖一层被炎症细胞浸润的薄层纤维帽(<65μm);含有少量平滑肌细胞;正性重构;有新生血管形成;斑块内出血;血管外膜或周围炎;微小钙化^[9]。TCFA具有的这些特征使易损斑块的检测成为可能。

长期以来,冠状动脉造影(coronary angio graphy, CAG)始终被视为是检测冠状动脉管腔狭窄情况的“金标准”。然而因CAG不能准确显示管壁斑块的结构和血管重构情况,在评价斑块表征方面具有难以避免的缺陷。而血管内超声(intravascular ultrasound, IVUS)虽有“活体组织学”之称,在对斑块性质的判断上拥有独特优势,但IVUS仅能对单一血管腔进行测量而不能同时检测整个冠状动脉的局限性,及其有创性和费用昂贵等问题限制了在冠状动脉粥样硬化中的应用。目前,诊断易损斑块的影像学检查方法主要为冠状动脉CT血管成像(coronary computed tomographic angiography, CCTA)。因此,全文就CCTA识别冠状动脉粥样硬化易损斑块的相关文献进行简要综述,旨在总结其技术发展及优势为CCTA应用于临床冠心病诊疗提供依据。

2 CCTA成像设备的进步

2.1 宽体探测器 CT自20世纪80年代以来,多层螺旋CT心脏成像技术发展迅速,但因空间分辨率和时间分辨率及z轴覆盖有限,常会产生阶梯状配准伪影高估冠状动脉粥样硬化的钙化程度^[10]。在这方面,16厘米广域覆盖CT扫描仪已经能够在在一个心脏周期内的单个时间点对整个心脏进行容积成像,提高了时间分辨率和空间分辨率;扫描过程中无需床面运动,减少了产生配准伪影的机会。随着机架旋转时间的改进和运动校正算法的应用,最新版本的宽体探测器CT扫描仪即使患者心率较高依然能高质量成像^[11]。同时,宽体探测器CT扫描仪还允许使用冠状动脉减影技术,其原理就是基于单一屏气法,使用相应血管的非对比度和对比度数据集获取图像进行配准和减去^[12]。理论上,这可去除斑块中的钙化成分,使影像医生更清晰的判断余斑块特征。这些技术的出现,提高了

【第一作者】于昊冉,女,医师,主要研究方向:心血管影像诊断。E-mail: yhr_wangyi@163.com

【通讯作者】刘挨师,男,主任医师,主要研究方向:心血管影像诊断。E-mail: liuایش@sina.com

CCTA对冠状动脉粥样硬化准确识别的可能,有机会在未来广泛应用于临床。

当然,宽体探测器CT扫描仪的相关技术还有待完善之处。成功实现减影CCTA最重要的因素是两个数据集的准确配准,但在近几年发表的研究^[13]中,由于配准错误而被排除的片段比例仍然很高(53%)。虽然在病变严重的情况下可以考虑人工手动矫正,但这非常耗时。

2.2 双源CT 双源CT(dual source computed tomography, DSCT)有2个球管、2个探测器,图像采集过程中2束X线间重叠率超过50%,其空间分辨率小于0.4mm,即便微小的组织结构也能高水平呈现。DSCT另一个潜在优势是组织表征,两个探测器在不同Kv电压下运行,即所谓的“双能CT”,可更好展示不同组织的衰减特性,在斑块性质分析中有重要作用。DSCT同样具有较好的时间分辨率,心率>100次/分图像质量仍能保持良好^[14];还具有功能强大的Circulation后处理软件,扫描后联合应用迭代重建算法、多层面重组、曲面重建、最大密度投影、容积再现和心血管优化分析软件等对图像进行处理,可有效提高冠状动脉病变的成像质量及对斑块的评估能力^[15]。

关于DSCT在冠状动脉斑块中的应用,吴启源等^[16]采用血管外膜面积减去血管腔面积来定量斑块体积。Schlett等^[17]采用半自动软件直接检测非钙化斑块面积,优点是更接近组织病理学。Carrascosa等^[18]以金标准IVUS为参照,发现由DSCT检测出的冠状动脉粥样硬化者中有99%的病变获得了IVUS的证实,这其中被DSCT诊断为易损斑块的233个病变中也有192个被IVUS确认,认为DSCT在判断冠状动脉粥样硬化斑块存在、成分等方面与IVUS相关性良好。Kitagawa等^[19]认为在一定程度上,DSCT可替代IVUS用于评估因血管正性重构而在CAG检查中呈阴性的早期冠状动脉病变,有助于在疾病初期发现高危斑块并采取积极治疗。

不过,DSCT同样存在局限性。理论上DSCT在多层面重组后处理时可对斑块进行任意角度的观察、测量,但实际情况是无法实现对每个斑块的细致评估,造成对斑块偏心性存在检测误差^[15]。其次在IVUS的图像上,斑块内膜与管腔、斑块外膜与血管外弹力膜间均分界明显;而在DSCT中管腔和斑块及血管外弹力膜的分界则显示不清,极大影响影像医生CT诊断结果的稳定性^[20]。同时,DSCT仍无法明确鉴别脂质斑块和纤维斑块,影像诊断结论与组织病理学之间存在偏差,改善的方法为更进一步增强CT的采集速率,提升图像的密度分辨率及空间分辨率,尽可能消除运动伪影。

3 CCTA对易损斑块的识别

CCTA是目前最常用的非侵入性冠状动脉检查技术,作为CAG的替代检查,早期的CCTA多用于评估管腔狭窄。近年来,随着对动脉粥样硬化病理机制的认识及CT硬件设备和成像技术的发展与图像后处理软件的更新,CCTA已从评估简单的管腔狭窄程度向更全面的检测斑块成分及其功能状态转变。已有研究将易损斑块的CT影像特点总结为:低密度斑块、餐巾环征、正性重构和点状钙化^[3, 21]。(1)低密度斑块是指如发现低CT衰减的非钙化斑块,随机选取该处3个感兴趣区测量CT值,所得的平均CT值<30HU。富含脂质的坏死核心(低密度斑块)的出现是鉴别稳定斑块和TCFA最有效的方法之一,但平均CT值的最佳阈值仍存有争议。Leber等^[22]的研究,将斑块依据CT值分为脂质斑块(CT值49±22HU)、纤维斑块(CT值91±22HU)、钙化斑块(CT值391±156HU)和混合斑块(CT值在纤维斑块与钙化斑块之间且混有钙化影)。(2)餐巾环征的定义是与管腔相接的中心低CT衰减、周围被环状稍高密度影(CT值≤130HU)包绕的病变。组织学分析发现,具有这项特征的斑块会拥有更大体积的坏死核心,并且其内通常存在微钙化,这进一步破坏了它们的稳定性,进而导致斑块破裂^[23]。Feuchtnner等^[24]在对1469例冠心病患者的随访中发现,餐巾环征和低密度斑块是中低风险患者发生ACS强有力的预测因素。(3)随着病变的进展,管腔可有正性和负性2种重构模式。重构指数(remodeling index, RI)为血管腔最狭窄处的横截面积除以近、远端参照段横截面积的平均值,若RI≥1.05为正性重构,这时管壁向外扩张以

尽可能保证管腔直径不变;RI<0.95为负性重构,会导致管腔狭窄程度加重;RI=0.95-1.05为无重构。已有研究发现^[25],较负性重构而言,正性重构管腔内的斑块常拥有更多的炎症细胞浸润和脂质成分,表明正性重构具有预测斑块易损性的作用。(4)点状钙化:目前因CT的空间分辨率达不到微钙化的显示阈值,所以CT上可检测到的危险钙化是点状钙化,这是CCTA中“微钙化”的概念;定义为CT斑块图像中直径<3mm的钙化部分,其长度不超过管腔直径的1.5倍,宽度不超过管腔直径的2/3且密度>130HU。Ozaki等^[26]的研究认为点状钙化是TCFA中最常见的病变,可促使稳定型心绞痛患者病情恶化。

在ROMICAT II试验的研究中,低密度斑块、餐巾环征、正性重构和点状钙化均能独立预测ACS的发生,易损斑块至少具有以上1项CT表现^[27]。同时,Voros等^[28]的荟萃分析显示,依据CT表现,与IVUS的结果相比,CCTA对冠状动脉斑块的诊断效能良好,AUC为0.94,灵敏度和特异度分别为90%、92%。

4 钙化评分

除了通过特征性影像改变对冠状动脉粥样硬化斑块进行定性评估外,CCTA还可通过对血管壁成分的衰减分析,定量评估斑块中钙质成分的多少。CT上根据斑块内钙质成分的含量将其分为非钙化斑块、部分钙化斑块和钙化斑块,原钙化因子和抑制因子的平衡决定了钙化是否会发生以微钙化为代表的易损斑块向以大钙化为代表的稳定斑块转变^[29],钙化成分的大小是ACS发生与否的重要预测因子。

冠状动脉钙化评分(coronary artery calcium score, CACS)是评估斑块钙质负荷最有效的技术,被广泛用于冠心病临床危险分层。最常见的CACS系统是Agatston评分,它是由量化血管钙化位置所对应的高衰减体素面积(以mm²为单位)与其最大钙化病变密度(以HU为单位)所对应的加权分数的乘积确定的^[30]。当最大钙化病变密度为130-199HU、200-299HU、300-399HU、≥400HU时所对应的加权分数依次为1、2、3、4。例如,冠状动脉左回旋支钙化面积为3mm²、峰值密度为240HU,得分为6分(3mm²×加权分数2)。由此制定了CACS的标准化评分:0分代表无钙化斑块,1-10分代表微小钙化斑块,11-100分代表轻度钙化斑块,101-400分代表中度钙化斑块,>400分代表重度钙化斑块。已证明CACS和CACS随时间的增长变化均可独立预测ACS^[31-32]。同时,CACS为0是一个强有力的低存活率预测因子,与5年内极低水平的ACS发生相关^[33]。此外,钙质量评分^[34]和钙容量评分^[35]也被证实可准确量化冠状动脉钙化情况。

但是,并不是所有增长的CACS都是病理的^[36],正常情况下CACS也会随年龄的增加缓慢增长,这种增长遵循可预测的进展曲线不会影响患者的风险预测。因此,CACS最需解决的问题一直是将生理性CACS和病理性CACS区分开。同时,CACS为0分不能100%排除ACS,在Pursnani等^[37]的ROMICAT II试验CACS为0分的人群中,仍有0.8%最终发展为ACS。其次,IVUS研究表明钙化斑块不会受药物等干预措施影响^[38],CACS在评估冠状动脉钙化斑块消退方面用处不大,限制了其在冠心病二级预防中的价值。

5 CCTA衍生技术的发展

内皮剪应力(endothelial shear stress, ESS)、CT血流储备分数(computed tomographic fractional flow reserve, CT-FFR)与脂肪衰减指数(fat attenuation index, FAI)是基于CCTA数据进一步处理衍生出的新量化指标,分别对腔内剪应力、主干分支血流储备与冠周脂肪浸润进行定量分析。

5.1 ESS ESS是血液流动时摩擦血管内皮细胞表面产生的切向力,是由冠状动脉解剖的几何变化决定的。低ESS(<0.5Pa)易导致动脉粥样硬化的发生和发展,造成易损斑块的形成^[39]。CCTA被认为是一种新的ESS评估工具,有希望克服对CAG和IVUS等侵入性检测的需要^[40]。其原理为使用CT扫描仪采集冠状动脉图像,通过计算机模拟血流动力学为基础,导出血管局部的剪应力图^[41]。Emerald等^[42]回顾性分析了72名ACS患者中的66个罪犯病变和

150个非罪犯病变,这些患者在ACS指征前1个月至2年间接受了CCTA,研究结果表明在不良斑块特征的基础上增加ESS可提高对未来ACS罪犯病变的检出率。

5.2 CT-FFR CAG成像的同时测定FFR一直被认为是识别有临床意义的冠状动脉斑块的金标准,有利于指导临床治疗策略^[43]。但常规FFR测量价格高昂且为有创性操作。近几年根据CT数据构建冠状动脉形态结合计算机血流模拟获得的无创CT-FFR,可综合斑块的功能信息和形态参数,以新的无创性技术反映冠状动脉主干的血流储备能力,从而间接诊断高危斑块^[44]。但该检查方式目前尚处于发展早期,仅适用于肉眼可见动脉粥样硬化的情况限制了其在冠心病二级预防中的应用,并突显了对能够在早期阶段检测动脉粥样硬化关键过程(如炎症、细胞坏死或凋亡)的非侵入性成像手段的需要。

5.3 FAI 炎症是动脉粥样硬化斑块发展与破裂的关键因素^[45]。冠状动脉炎症与其邻近血管周围脂肪组织的表型变化动态相关,现可通过由CCTA衍生的FAI来捕捉和量化^[46]。已有研究分析表明冠状动脉周围较高的FAI与不良心血管事件风险正相关,且FAI=70.1HU时为最佳阈值^[47]。FAI可在冠状动脉树的任何节段测量,与冠状动脉狭窄的严重程度无关;其独立于患者的全身炎症,可作为早期冠状动脉粥样硬化易损斑块形成的检测指标^[47-48]。同时,由于具有动态测量的特性,FAI可作为疾病活动的标志跟踪冠状动脉炎症随时间的变化,反映动脉粥样硬化抗炎治疗效果,在冠心病一、二级预防中都具有显著价值^[49]。

6 不足

尽管CCTA在识别易损斑块中有了长足进步,但现阶段还存在许多不足。首先,CCTA的空间分辨率仍不及CAG和IVUS,导致其不能识别TCFA的薄层纤维帽且难以区分斑块内出血和富含脂质的坏死核心,这成为CCTA斑块表征的主要技术限制之一。另一个局限性是到目前为止,从CT图像中提取冠状动脉斑块的研究大多是基于衰减值的差异,这难以准确评价斑块性质。例如,由于非钙化斑块的CT强度相似,CCTA很难区分纤维斑块、脂质斑块和二者的混合斑块^[50]。同时,部分容积效应的存在进一步限制了CT在区分不同衰减值的相邻结构时的空间分辨率^[51]。此外,CCTA扫描中难以避免因相位配准错误引起的模糊或阶梯状伪影及冠状动脉支架等高衰减结构导致的波束硬化伪影,这同样会影响图像质量^[51]。今后势必需更多技术创新来克服这些困难。

7 总结

早期识别易损斑块,并在发生ACS前进行治疗是冠状动脉粥样硬化斑块成像的最终目的。虽然面临诸多挑战,但随着技术的不断发展,未来CCTA成像有望成为无创性识别ACS高危患者及冠状动脉疾病个性化诊治方面最有效的手段。最近的数据也支持CCTA作为动脉粥样硬化非侵入性评估的主要诊断工具,推荐作为有症状的冠心病患者的初始检查^[52]。

参考文献

- [1] Media Centre: Cardiovascular Disease. Available online: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)) (accessed on 11 June 2021).
- [2] 赵均雄,陈惠枚,吴菊芳,等. 64层螺旋CT对冠状动脉易损斑块的诊断价值与血管内超声对比[J]. 中国CT和MRI杂志, 2012, 10(4): 33-36.
- [3] 李晓卫,赵茹,屈志萍,等. 高危斑块对冠状动脉轻度狭窄胸痛患者的预测价值[J]. 临床心血管病杂志, 2017, 33(9): 866-870.
- [4] 杜蕾. 冠状动脉不稳定斑块的特征与识别[J]. 同济大学学报, 2003, 24(4): 279-281.
- [5] Naghavi M, Libby P, Falk E, et al. From vulnerable plaque to vulnerable patient: a call for new definitions and risk assessment strategies: Part I[J]. Circulation, 2003, 108(14): 1664-1672.
- [6] Ando K, Takahashi H, Watanabe T, et al. Impact of Serum Uric Acid Levels on Coronary Plaque Stability Evaluated Using Integrated Backscatter Intravascular Ultrasound in Patients with Coronary Artery Disease[J]. J Atheroscler Thromb, 2016, 23(8): 932-939.
- [7] Virmani R, Burke A, Farb A, et al. Pathology of the vulnerable plaque[J]. J Am Coll Cardiol, 2006, 47(8 Suppl): C13-18.
- [8] Inaba S, Mintz GS, Burke AP, et al. Intravascular Ultrasound and Near-Infrared Spectroscopic Characterization of Thin-Cap Fibroatheroma[J].

- Am J Cardiol, 2017, 119(3): 372-378.
- [9] Santos-Gallego CG, Picatoste B, Badimon JJ. Pathophysiology of acute coronary syndrome[J]. Curr Atheroscler Rep, 2014, 16(4): 401.
- [10] Park MJ, Jung JI, Choi YS, et al. Coronary CT angiography in patients with high calcium score: evaluation of plaque characteristics and diagnostic accuracy[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2011, 27 Suppl 1: 43-51.
- [11] Liu Z, Zhang Z, Hong N, et al. Diagnostic performance of free-breathing coronary tomography angiography without heart rate control using 16-cm z-coverage CT with motion-correction algorithm[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2019, 13(2): 113-117.
- [12] Tanaka R, Yoshioka K, Muranaka K, et al. Improved evaluation of calcified segments on coronary CT angiography: a feasibility study of coronary calcium subtraction[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2013, 29 Suppl 2: 75-81.
- [13] Fuchs A, Kuhl JT, Chen MY, et al. Subtraction CT angiography improves evaluation of significant coronary artery disease in patients with severe calcifications or stents—the C-sub 320 multicenter trial[J]. Eur Radiol, 2018, 28(10): 4077-4085.
- [14] 方长海,舒天笑,梅尧,等. 双源CT在不控制心率患者冠状动脉斑块评价中的价值探讨[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2018, 24(6): 479-485.
- [15] 李岳军,闫继锋. 双源CT与冠状动脉血管内超声评估冠状动脉粥样硬化斑块价值的对照研究[J]. 中华实用诊断与治疗杂志, 2016, 30(5): 463-466.
- [16] 吴启源,袁明远,许建荣,等. 双源CT对冠状动脉临界狭窄病变斑块判断的价值[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2017, 23(3): 217-221.
- [17] Schlett CL, Ferencik M, Celeng C, et al. How to assess non-calcified plaque in CT angiography: delineation methods affect diagnostic accuracy of low-attenuation plaque by CT for lipid-core plaque in histology[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2013, 14(11): 1099-1105.
- [18] Carrasosa PM, Capuñay CM, Garcia-Merletti P, et al. Characterization of coronary atherosclerotic plaques by multidetector computed tomography[J]. Am J Cardiol, 2006, 97(5): 598-602.
- [19] Kitagawa T, Yamamoto H, Ohhashi N, et al. Comprehensive evaluation of noncalcified coronary plaque characteristics detected using 64-slice computed tomography in patients with proven or suspected coronary artery disease[J]. Am Heart J, 2007, 154(6): 1191-1198.
- [20] 吴强,黄方炯,孙东,等. 冠状动脉旁路移植术后移植血管64排螺旋CT血管成像与选择性血管造影对比研究[J]. 中华实用诊断与治疗杂志, 2011, 25(1): 18-20.
- [21] Kolossváry M, Szilveszter B, Merkely B, et al. Plaque imaging with CT—a comprehensive review on coronary CT angiography based risk assessment[J]. Cardiovasc Diagn Ther, 2017, 7(5): 489-506.
- [22] Leber AW, Knez A, Becker A, et al. Accuracy of multidetector spiral computed tomography in identifying and differentiating the composition of coronary atherosclerotic plaques: a comparative study with intracoronary ultrasound[J]. J Am Coll Cardiol, 2004, 43(7): 1241-1247.
- [23] Dahal S, Budoff MJ. Implications of serial coronary computed tomography angiography in the evaluation of coronary plaque progression[J]. Curr Opin Lipidol, 2019, 30(6): 446-451.
- [24] Feuchtnner G, Kerber J, Burghard P, et al. The high-risk criteria low-attenuation plaque<60HU and the napkin-ring sign are the most powerful predictors of MACE: a long-term follow-up study[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2017, 18(7): 772-779.
- [25] 郑冲,卢洁. 一站式计算机断层血管成像在头颈及冠状动脉粥样硬化的研究进展[J]. 中华老年心脑血管病杂志, 2020, 22(8): 891-893.
- [26] Ozaki Y, Okumura M, Ismail TF, et al. Coronary CT angiographic characteristics of culprit lesions in acute coronary syndromes not related to plaque rupture as defined by optical coherence tomography and angiography[J]. Eur Heart J, 2011, 32: 2814-2823.
- [27] Puchner SB, Liu T, Mayrhofer T, et al. High-risk plaque detected on coronary CT angiography predicts acute coronary syndromes independent of significant stenosis in acute chest pain: results from the ROMICAT-II trial[J]. J Am Coll Cardiol, 2014, 64(7): 684-692.
- [28] Voros S, Rinehart S, Qian Z, et al. Coronary atherosclerosis imaging by coronary CT angiography: current status, correlation with intravascular interrogation and meta-analysis[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2011, 4(5): 537-548.
- [29] Nakahara T, Dweck MR, Narula N, et al. Coronary artery calcification: from mechanism to molecular imaging[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2017, 10(5): 582-593.
- [30] Agatston AS, Janowitz WR, Hildner FJ, et al. Quantification of coronary artery calcium using ultrafast computed tomography[J]. J Am Coll Cardiol, 1990, 15(4): 827-832.
- [31] Detrano R, Guerci AD, Carr JJ, et al. Coronary calcium as a predictor of coronary events in four racial or ethnic groups[J]. N Engl J Med, 2008, 358(13): 1336-1345.
- [32] Budoff MJ, Young R, Lopez VA, et al. Progression of coronary calcium and incident coronary heart disease events: MESA (Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis) [J]. J Am Coll Cardiol, 2013, 61(12): 1231-1239.
- [33] Sarwar A, Shaw LJ, Shapiro MD, et al. Diagnostic and prognostic value of absence of coronary artery calcification[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2009, 2(6): 675-688.

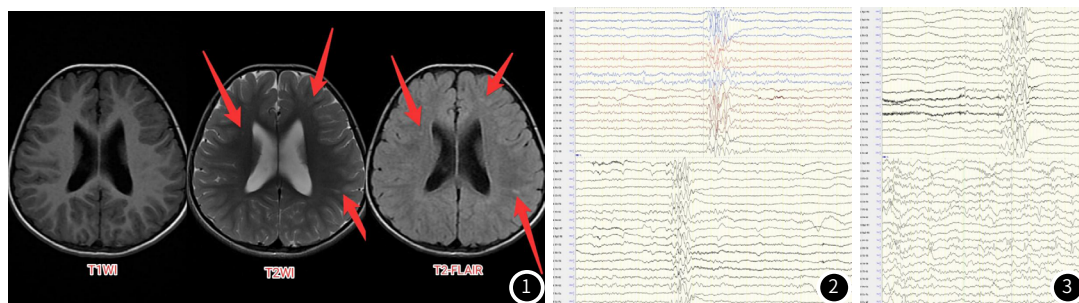


图1 脑内多发异常信号，T₁WI呈等信号，T₂WI呈稍高信号，T₂-FLAIR呈高信号。图2~图3 醒-睡各期局灶性双侧顶、中后颞，同步或不同步尖波、多棘波2-3Hz棘慢波或尖慢波、多棘慢波；局灶性双侧额、中央区低中波幅尖波少量散发；局灶性双侧顶、中央区(Pz)中高波幅尖波少量散发；广泛性高-极高波幅2-3Hz棘慢波、尖慢波、慢波少量散发。

参考文献

- [1] Yi-Heng Hao, Michael D Fountain Jr, Klementina Fon Tacer, et al. USP7 Acts as a Molecular Rheostat to Promote WASH-Dependent Endosomal Protein Recycling and Is Mutated in a Human Neurodevelopmental Disorder. *Mol Cell*, 2015 Sep 17; 59 (6): 956-969.
- [2] Michael D. Fountain PhD, David S. Oleson BS, [...] Christian P. Schaaf MD, PhD. Pathogenic variants in USP7 cause a neurodevelopmental disorder with speech delays, altered behavior, and neurologic anomalies. *Genetics in Medicine* volume 21, pages 1797-1807 (2019).
- [3] 凌志勇, 陈楷哲, 费西平, 等. 头颅MRI诊断评估轻度认知功能障碍的价值及影像特点分析[J]. 中国CT和MRI杂志, 2021, 19 (1): 8-10.
- [4] 姜华, 宛丰, 吕衍文, 等. 2型糖尿病伴认知功能障碍患者基于体素的脑形态学MRI研究[J]. 中国CT和MRI杂志, 2018, 16 (4): 22-25.
- [5] 何成, 尹羽, 刘衡, 等. 儿童脑瘫运动功能障碍的结构MR研究进展[J]. 中国CT和MRI杂志, 2021, 19 (2): 12-16.
- [6] 汝艳辉, 王新怡, 杨志强, 等. 多b值弥散加权成像与动脉自旋标记评估轻度认知功能障碍海马灌注的对比研究[J]. 中国临床医学影像杂志, 2017, 28 (8): 533-537.
- [7] 中华医学会儿科学分会康复学组. 脑性瘫痪的病因学诊断策略专家共识[J]. 中华儿科杂志, 2019, 57 (10): 746-751.
- [8] Patel DR, Neelakantan M, Pandher K, et al. Cerebral palsy in children: A clinical overview[J]. *Translat pediatri*, 2020, 9 (S1): S125-S135.
- [9] 中华医学会儿科学分会康复学组. 儿童脑性瘫痪肉毒毒素治疗专家共识[J]. 中华儿科杂志, 2018, 56 (7): 484-488.
- [10] Stirrups R. Cerebral palsy: Managing expectations and optimising outcomes[J]. *Lancet Child Adolesc Health*, 2020, 4 (3): 179-180.

(收稿日期: 2022-03-15)
(校对编辑: 朱丹丹)

(上接第182页)

- [34] Hoffmann U, Siebert U, Bull-Stewart A, et al. Evidence for lower variability of coronary artery calcium mineral mass measurements by multi-detector computed tomography in a community-based cohort—consequences for progression studies[J]. *Eur J Radiol*, 2006, 57 (3): 396-402.
- [35] Hong C, Bae KT, Pilgram TK. Coronary artery calcium: accuracy and reproducibility of measurements with multi-detector row CT—assessment of effects of different thresholds and quantification methods[J]. *Radiology*, 2003, 227 (3): 795-801.
- [36] Schermund A, Baumgart D, Möhlenkamp S, et al. Natural history and topographic pattern of progression of coronary calcification in symptomatic patients: An electron-beam CT study[J]. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*, 2001, 21 (3): 421-426.
- [37] Pursnani A, Chou ET, Zakrotsky P, et al. Use of coronary artery calcium scanning beyond coronary computed tomographic angiography in the emergency department evaluation for acute chest pain: the ROMICAT II trial[J]. *Circ Cardiovas Imaging*, 2015, 8 (3): e002225.
- [38] Nicholls SJ, Tuzcu EM, Wolski K, et al. Coronary artery calcification and changes in atheroma burden in response to established medical therapies[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2007, 49 (2): 263-270.
- [39] Chatzizisis YS, Jonas M, Coskun AU, et al. Prediction of the localization of high-risk coronary atherosclerotic plaques on the basis of low endothelial shear stress: an intravascular ultrasound and histopathology natural history study[J]. *Circulation*, 2008, 117 (8): 993-1002.
- [40] Samady H, Molony DS, Coskun AU, et al. Risk stratification of coronary plaques using physiologic characteristics by CCTA: Focus on shear stress[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2020, 14 (5): 386-393.
- [41] Frauenfelder T, Boutsianis E, Schertler T, et al. In-vivo flow simulation in coronary arteries based on computed tomography datasets: feasibility and initial results[J]. *Eur Radiol*, 2007, 17 (5): 1291-1300.
- [42] Collet C, Conte E, Mushtaq S, et al. Reviewing imaging modalities for the assessment of plaque erosion[J]. *Atherosclerosis*, 2021, 318: 52-59.
- [43] Nakanishi R, Budoff MJ. Noninvasive FFR derived from coronary CT angiography in the management of coronary artery disease: technology and clinical update[J]. *Vasc Health Risk Manag*, 2016, 12: 269-278.
- [44] Min JK, Leipsic J, Pencina MJ, et al. Diagnostic accuracy of fractional flow reserve from anatomic CT angiography[J]. *JAMA*, 2012, 308 (12): 1237-1245.
- [45] Ross R. Atherosclerosis—an inflammatory disease[J]. *N Engl J Med*, 1999, 340 (2): 115-126.
- [46] Antonopoulos AS, Sanna F, Sabharwal N, et al. Detecting human coronary inflammation by imaging perivascular fat[J]. *Sci Transl Med*, 2017, 9 (398): eaal2658.
- [47] Oikonomou EK, Marwan M, Desai MY, et al. Non-invasive detection of coronary inflammation using computed tomography and prediction of residual cardiovascular risk (the CRISP CT study): a post-hoc analysis of prospective outcome data[J]. *Lancet*, 2018, 392 (10151): 929-939.
- [48] Oikonomou EK, West HW, Antoniadou C. Cardiac computed tomography: assessment of coronary inflammation and other plaque features[J]. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*, 2019, 39 (11): 2207-2219.
- [49] Dai X, Yu L, Lu Z, et al. Serial change of perivascular fat attenuation index after statin treatment: insights from a coronary CT angiography follow-up study[J]. *Int J Cardiol*, 2020, 319: 144-149.
- [50] Liu J, Jin C, Feng J, et al. A vessel-focused 3D convolutional network for automatic segmentation and classification of coronary artery plaques in cardiac CTA[A]. *Statistical Atlases and Computational Models of the Heart. Atrial Segmentation and LV Quantification Challenges*[C]. Cham: Springer International Publishing, 2019: 131-141.
- [51] Ghekiere O, Salgado R, Buls N, et al. Image quality in coronary CT angiography: challenges and technical solutions[J]. *Br J Radiol*, 2017, 90 (1072): 20160567.
- [52] Knuuti J, Wijns W, Saraste A, et al. 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes[J]. *Eur Heart J*, 2020, 41 (3): 407-477.

(收稿日期: 2022-04-14)
(校对编辑: 朱丹丹)