

冠状动脉 CT 血管成像定量评估心肌桥收缩对壁冠状动脉压迫程度的价值^{*}

申兵 侯博 张世斌 张建良 李进中

(邯郸市中心医院 CT/MR 科, 河北 邯郸 056008)

【摘要】 目的 探究冠状动脉 CT 血管成像 (CCTA) 定量评估心肌桥 (MB) 收缩对壁冠状动脉压迫程度的价值。方法 回顾性收集 295 例 2017 年 8 月—2022 年 3 月于我院行 CCTA 检查证实有 MB 的患者临床资料, 根据壁冠状动脉 (MCA) 的收缩期狭窄率分为无压迫组 (80 例)、轻度压迫组 (141 例)、显著压迫组 (74 例)。测量并比较 3 组患者一般资料、左前降支 (LAD)、血管密度梯度 (TAG)、TAG 校正值 (TAGs)、MCA 血管密度差 (MCA-COD) 及 MB 深度和长度的差异。采用受试者工作曲线 (ROC) 分析 TAGs、MCA-COD 定量评估 MB 显著收缩压迫的效能。结果 3 组性别、年龄、临床症状、高危因素等一般资料比较差异均无统计学意义 ($P > 0.05$)。MB 患者 TAG、TAGs、MCA-COD 值随收缩期压迫程度增加而依次降低, 且不同组间 TAG、TAGs、MCA-COD 值比较差异有统计学意义 ($P < 0.05$), 不同组间 MB 深度、MB 长度比较差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。ROC 曲线结果显示, TAGs 和 MCA-COD 定量评估 MB 显著收缩压迫的 AUC 分别为 0.844、0.815 ($P < 0.05$), 二者联合评估的 AUC 为 0.935 ($P < 0.05$), 联合评估效能更高。结论 CCTA 可用于定量评估 MB 患者收缩压迫程度, 且 TAGs、MCA-COD 联合评估 MB 显著性收缩压迫的效能较高, 可为临床诊断提供更为精确的指导。

【关键词】 心肌桥; 冠状动脉 CT 血管成像; 壁冠状动脉; 收缩期压迫程度; 定量评估

【中图分类号】 R540.4 **【文献标志码】** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-3511.2023.12.026

Study on mural coronary artery compression degree by coronary CT angiography quantitative evaluation of myocardial bridge contraction

SHEN Bing, HOU Bo, ZHANG Shibin, ZHANG Jianliang, LI Jinzhong

(Department of CT/MR, Handan Central Hospital, Handan 056008, Hebei, China)

【Abstract】 **Objective** To explore the value of coronary CT angiography (CCTA) quantitative evaluation of myocardial bridge (MB) on the degree of mural coronary artery compression. **Methods** The clinical data of patients with MB confirmed by CCTA in the hospital from August 2017 to March 2022 were retrospectively collected. The differences in general data, left anterior descending artery (LAD), transluminal attenuation gradient (TAG), TAG corrected value (TAGs), mural coronary artery (MCA)-contrast opacification difference (MCA-COD) and MB depth and length were detected and compared among patients with different degrees of systolic compression (no compression group, mild compression group, significant compression group). Receiver operating characteristic (ROC) curve was used to analyze the efficiency of TAGs and MCA-COD on quantitatively evaluating MB significant systolic compression. **Results** From the aspects of general data, there were no statistical differences in gender, age, clinical symptoms, and high-risk factors among no compression group, mild compression group and significant compression group ($P > 0.05$). Comparisons of CCTA parameters showed that the TAG and TAGs of patients with MB were successively reduced with the increase of degree of systolic compression while the MCA-COD was enhanced in turn, and the TAG, TAGs, and MCA-COD were significantly different among different groups ($P < 0.05$), but the differences in MB depth and MB length among the different groups were not statistically significant ($P > 0.05$). In terms of efficiency of TAG-related parameters in the quantitative

基金项目: 邯郸市科学技术研究与发展计划项目 (19422083009-21)

引用本文: 申兵, 侯博, 张世斌, 等. 冠状动脉 CT 血管成像定量评估心肌桥收缩对壁冠状动脉压迫程度的价值[J]. 西部医学, 2023, 35(12): 1852-1856. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3511.2023.12.026

evaluation of MB significant systolic compression, ROC curve results showed that the AUCs of TAGs and MCA-COD on quantitatively evaluating the significant systolic compression of MB were 0.844 and 0.815 ($P < 0.05$), the AUC of the combination of the two was 0.935 ($P < 0.05$), and the combined evaluation had higher efficiency. **Conclusion** CCTA can be used to quantitatively evaluate the degree of systolic compression in patients with MB, and the combined evaluation with TAGs and MCA-COD has high efficiency on the significant systolic compression of MB, which can provide more accurate guidance for clinical diagnosis.

【Key words】 Myocardial bridge; Coronary CT angiography; Mural coronary artery; Systolic compression degree; Quantitative evaluation

心肌桥(Myocardial bridge, MB)是指覆盖于走行异常的冠状动脉节断表面的心肌束,该节断冠状动脉则被称为壁冠状动脉(Mural coronary artery, MCA), MB好发于前降支中段,多由冠状动脉先天发育异常引起^[1-2]。既往认为 MB 是一种良性病变过程,但陆续研究发现 MCA 在收缩期时的管径会因 MB 的挤压变窄,引起心律失常、胸闷、心悸等心肌缺血症状,甚至心肌梗死或者猝死^[3-4]。目前,MB 尚无法被治愈,且该病无明显发病前兆,但对于有症状者及时给予规范治疗后预后较好,而受检查方式的影响,MB 的检出率存在较大差异^[5]。因此,如何提高 MB 的诊断准确率并有效预测 MB 对 MCA 的收缩压迫程度,对改善患者预后具有重要意义。临床上用于诊断 MB 的方法很多,其中以冠状动脉造影(Coronary angiography, CAG)为诊断金标准,但这种方法为有创性检查,不利于 MB 的定期复查和随访,加上不能直观显示 MB,使得 CAG 可提供的精细有效信息有限^[6-7]。有研究表明,冠状动脉 CT 血管成像(Coronary computed tomography angiography, CCTA)在无创筛查与诊断冠状动脉疾病方面具有可靠的临床价值,能否用于 MB 对 MCA 收缩压迫程度的评估仍有待明确^[8-9]。为此,本研究旨在探究 CCTA 定量评估 MB 对壁冠状动脉压迫程度的价值,现报告如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性收集 295 例 2017 年 8 月—2022 年 3 月于我院行 CCTA 检查证实有 MB 的患者临床资料。纳入标准:成像方式为回顾性心电门控;图像(舒张期和收缩期)无伪影可满足诊断;MB 主要存在于左前降支(Left anterior descending artery, LAD);均签署知情同意书。排除标准:成像方式为前瞻性心电门控;LAD 血管出现弥漫性钙化者;MCA 直径 < 2 mm 者;既往有冠状动脉重建术史者。纳入患者中男性 203 例,女性 92 例,年龄 36~80 岁,平均(58.37 ± 10.23)岁。本研究已通过我院医学伦理审核。

1.2 方法

1.2.1 CCTA 检查 使用二代双源 CT 扫描仪(德国 Siemens 公司)采用心电门控技术进行扫描,检查开始

前所有患者均予以一片硝酸甘油(哈药集团制药六厂,国药准字 H23021574)舌下含服,心率 > 70 次/min 者给予 25~75 mg 倍他乐克(阿斯利康制药,国药准字 H32025391)口服。患者取仰卧位,双手放置头顶,经肘静脉注射用双通道高压注射器以 4.5~5.0 mL/s 流率注射对比剂碘普胺(350 mgI/mL,按体重 1 mL/kg)和生理盐水(30 mL),于升主动脉根部放置监测 ROI,采用团注跟踪法技术,触发阈值 ≥ 100 HU,延迟 5 s 后开始扫描,扫描为头足方向,范围自气管隆突下 2 cm 至心脏膈面下 3 cm。CCTA 主要扫描参数:管电压 100~120 kV,有效管电流 200 mA(依据心电图自动调制,全剂量时间窗为 35%~75%);准直 2 mm × 128 mm × 0.6 mm,螺距 0.2~0.5(依据心电图自动匹配);重建层厚 0.6 mm,间距 0.5 mm;球管旋转时间 0.28 s,转速 300 ms/rot。

1.2.2 CCTA 图像重建及分析 扫描完成后,使用迭代重建技术 SAFIRE 重建最佳舒张期(65%~80% R-R 间期)与最佳收缩期(30%~45% R-R 间期)的轴位容积图像(矩阵 512 × 512,间距 0.5 mm,层厚 0.6 mm,卷积核 B26f)。之后将获得的数据传输至工作站(Syngo Via, Siemens)进行处理,包括容积再现(volume rendering, VR)、轴位断面图像、曲面重组(curved planar reformation, CPR)、projection, MIP)。

1.2.3 数据测量 CCTA 诊断 MB 的标准为某一节段冠状动脉的血管截面图上显示血管被心肌 360° 环形包绕,且周围脂肪消失^[10]。在收缩期图像上测量 MB 深度、长度及管腔内密度参数。其中 MB 的深度和长度均在 MCA 的 MPR 切面上进行测量,调整 CPR 图像使其垂直于血管腔段,取最深的一处测量心肌外膜至动脉外侧壁的距离为 MB 的深度,然后调整图像为其最佳显示面上测量心肌段开始处至心肌段结束的长度即为 MB 的长度^[11]。之后分别于最佳舒张期和最佳收缩期测量管腔内密度参数,包括血管密度梯度(Transluminal attenuation gradient, TAG)、TAG 校正值(TAGs)和 MCA 血管密度差(MCA-COD),其中 TAG 测量方法为管腔内每间隔 10 mm

测得的 CT 值与 LAD 开口位置间的线性回归系数,测量时尽量避开粥样斑块^[12-13]。TAGs 的测量为先计算每 10 mm LAD 断面 CT 值与其同层面主动脉 CT 值的比值,以此作为校正值,然后计算每间隔 10 m 与 LAD 开口位置间的回归系数。MCA-COD 的计算于 MCA 的 CPR 图像上进行,先在图像上按 MCA 入口处、距入口 5 mm、距 MCA 出口 5 mm、MCA 出口处取 4 个点,之后测量这几个点的 CT 值及相对应层面的主动脉 CT 值并两者计算比值,作为校正后的值,然后将校正后的 MCA 入口与出口的平均值作为 MCA 近端与远端 CT 值,MCA 远端 CT 值-MCA 近端 CT 值即为 MCA-COD。

1.2.4 MCA 的收缩压迫程度及分组 MCA 的收缩压迫程度主要依据舒张末期与收缩末期 MCA 血管直径的变化进行评估,其中 MCA 收缩期狭窄率=(舒张末期管径-收缩末期管径)/舒张末期管径,分为无收缩期压迫组(简称无压迫组,狭窄率<10%)、轻度收缩期压迫组(简称轻度压迫组,狭窄率为 10%~49%)、显著收缩期压迫组(简称显著压迫组,狭窄率 50%)^[14]。以上数据测量及评估均由两名经验丰富的放射科医师采用双盲法进行,每组数据测三次后取平均值。

1.3 统计学分析 采用 SPSS 21.0 统计学软件进行统计学分析,计数资料以(%)表示;计量资料以($\bar{x} \pm s$)表示,两组对比行独立 *t* 检验,多组对比采用单因素

方差分析;采用 ROC 曲线分析 TAGs、MCA-COD 定量评估 MB 患者收缩压迫程度的临床价值。以 *P*<0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 3 组一般资料比较 3 组性别、年龄、临床症状、高危因素等一般资料比较差异均无统计学意义(*P*>0.05),见表 1。

表 1 一般资料比较 [*n*, ($\bar{x} \pm s$)]

Table 1 Comparison of general data

项目	无压迫组 (<i>n</i> =80)	轻度压迫组 (<i>n</i> =141)	显著压迫组 (<i>n</i> =74)	<i>F</i> / χ^2	<i>P</i>
性别(男/女)	37/43	80/61	44/30	3.215	0.200
年龄(岁)	59.65±10.54	62.42±11.17	61.19±11.03	1.640	0.196
临床症状				3.635	0.162
有	59(73.75)	116(82.27)	63(85.14)		
无	21(26.25)	25(17.73)	11(14.86)		
高危因素					
糖尿病	22	44	22	0.335	0.846
高血压	55	91	47	0.559	0.756
高血脂	52	83	44	0.867	0.648
吸烟	36	55	27	1.272	0.529

2.2 3 组 CCTA 参数比较 MB 患者 TAG、TAGs、MCA-COD 值随收缩期压迫程度增加而依次降低,且不同组间 TAG、TAGs、MCA-COD 值比较差异均有统计学意义(*P*<0.05),不同组间 MB 深度、MB 长度比较差异无统计学意义(*P*>0.05)。见表 2。

表 2 CCTA 参数比较 ($\bar{x} \pm s$)

Table 2 Comparison of CCTA parameters

组别	<i>n</i>	TAG(HU/10 mm)	TAGs(10 ⁻² /10 mm)	MCA-COD(10 ⁻²)	MB 深度(mm)	MB 长度(mm)
无压迫组	80	-12.43±2.83	-3.07±0.59	-7.73±1.91	4.81±1.18	13.09±3.13
轻度压迫组	141	-17.02±3.98 ^①	-4.56±1.05 ^①	-10.28±2.53 ^①	5.07±1.25	13.77±3.44
显著压迫组	74	-22.67±5.19 ^{①②}	-6.38±1.52 ^{①②}	-14.36±2.82 ^{①②}	5.19±1.33	14.14±3.49

注:与无压迫组比较,①*P*<0.05;与轻度压迫组比较,②*P*<0.05。

2.3 TAG 相关参数定量评估 MB 显著收缩压迫患者的价值分析 ROC 曲线结果显示,TAGs 和 MCA-COD 定量评估 MB 显著收缩压迫的 AUC 分别为 0.844、0.815(*P*<0.05),二者联合评估的 AUC 为 0.935(*P*<0.05),联合评估效能更高。见表 3 和图 1。

表 3 TAG 相关参数定量评估 MB 显著收缩压迫的价值分析及 ROC 分析
Table 3 Value and ROC analysis of TAG-related parameters on quantitative evaluation of MB significant systolic compression

指标	敏感度	特异度	AUC	95% CI	最佳截断值
TAGs	76.95	75.68	0.844	0.792~0.897	5.43 ng/mL
MCA-COD	81.02	68.92	0.815	0.757~0.873	11.72 μg/mL
联合评估	93.22	70.27	0.935	0.904~0.966	—

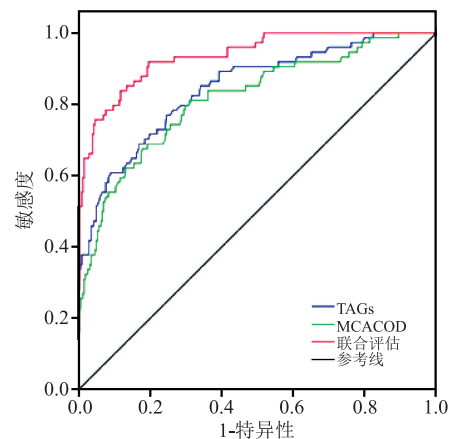


图 1 TAG 相关参数定量评估 MB 显著收缩压迫的 ROC 曲线
Figure 1 ROC curves of TAG-related parameters on quantitatively evaluating the significant MB systolic compression

2.4 典型病例 患者女,83岁,MB伴显著收缩压迫,VR图像示左前降支近段MB,收缩末期CPR示该病变,舒张期CPR示左前降支近段存在一处MB,该MB的深度和长度分别为4.7mm和13.7mm,见图2。患者男,62岁,MB伴无明显收缩压迫,VR图像示左前降支近段MB,收缩末期CPR示该病变,舒张期CPR示左前降支近段存在一处MB,该MB的深度和长度分别为5.2mm和14.3mm,见图3。

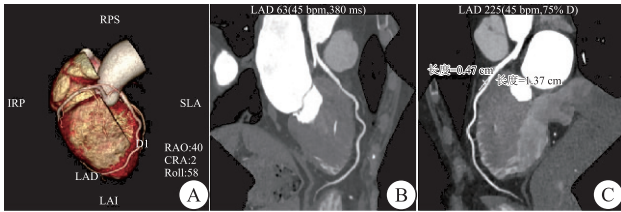


图2 显著收缩性压迫病例

Figures 2 The case of significant systolic compression

注:A. CCTA舒张末期VR图像;B. CCTA收缩末期CPR图像;C. CCTA舒张期CPR图像。

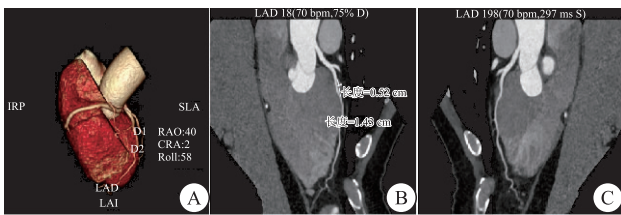


图3 轻度收缩压迫病例

Figures 3 The case of mild systolic compression

注:A. CCTA舒张末期VR图像;B. CCTA收缩末期CPR图像;C. CCTA舒张期CPR图像。

3 讨论

研究发现,MB对MCA管径的影响是动态变化的,而MB血流动力学除与心肌长度、深度等形态学特征有关外,与心肌收缩压迫程度亦密切相关^[15]。MCA的管腔压力主要于肌桥近端发生变化,是以在心肌桥入口处血流会出现不同程度的受阻,尤其收缩期时,若MB对MCA形成明显压迫会使MCA的管径急剧变窄,导致血流量明显减少,心肌灌注减低,且这种压迫效应还会随着压迫程度的增加延长持续时间,进而影响心肌灌注充盈,引发心肌缺血等一系列临床症状^[16-17]。因此,准确评估MB对MCA的收缩压迫程度极为关键。

CCTA图像可将MCA的管壁、管腔、围绕管壁的心肌及MB的位置、深度、长度等直观显示出来,已成为诊断MB的首选方法^[18]。但传统CCTA受辐射剂量、钙化斑块、收缩期图像清晰度不高等因素的影响,难以准确评估MB对MCA的压迫程度,且血流动力学方面的信息无法提供^[19]。已有研究证实,TAG值

在正常冠状动脉管腔内呈正向衰减,在狭窄节段内下降更快,且其下降斜率与距冠状动脉窦口的长度、管腔直径相关,可用于评估冠状动脉血流状况^[20]。另有研究表明,TAG值不受患者BMI、心率的影响,用于评估合并其他基础性疾病患者的冠状动脉血流中具有一定优势^[21]。本研究在CCTA基础上利用后处理技术进行重建测得TAG值,不需要额外扫描,因此可行性和重复性均较高。基于影响TAG值因素较多,如心动周期长短、扫描时间、扫描速度、图像采集时相差及对比剂(剂量、浓度、注射速度)等,故本研究引入TAGs以消除上述因素产生的不利影响^[22]。而TAG与TAGs反映了MB的压迫对整个LAD血流动力学的影响,为此本研究同时引入MCA-COD以反映MB的压迫对MCA血流动力学的改变^[23]。本研究结果显示,不同收缩期压迫程度患者间TAG、TAGs、MCA-COD值差异均显著,但不同组间MB深度、MB长度比较差异无统计学意义,提示TAG、TAGs、MCA-COD值与MB的收缩压迫程度明显相关,可作为定量评估MB收缩压迫程度的参考指标,而MB深度及长度与MB的收缩压迫程度无明显相关,这与张极平^[24]研究结果具有一致性。可能原因是MB的收缩压迫程度除受MB深度及长度影响外,还受桥段周围组织和桥相方向的影响,这些因素共同协同决定了MB的收缩压迫程度^[25]。

ROC曲线分析显示TAGs、MCA-COD值定量评估MB显著收缩压迫效能较高,且二者联合的评估效能高于单一指标,提示TAGs与MCA-COD联合诊断MB显著收缩压迫的效能较高。分析原因可能:①若MB未对MCA造成显著收缩期压迫,则压迫效应可能仅存于收缩期,不存在动态压迫,舒张期狭窄段血流阻力较小,对心肌灌注充盈的影响更小,而MB若显著收缩压迫MCA,血流受阻明显,压迫效应可持续至舒张中晚期,导致MCA内血流量急剧下降,促使TAG、TAGs、MCA-COD呈明显降低趋势^[26]。②MCA-COD值直接反映MCA血管腔近端及远端的密度变化,较TAGs而言,在定量评估MB显著收缩期压迫方面敏感性更高,因此二者联合能够进一步提高MB患者显著收缩压迫的准确率。本研究亦存在一些不足,如多数患者未做CAG检查,依据CCTA相关参数进行分组可能存在偏差;患者未做血流储备分数或心肌灌注检查,TAGs和MCA-COD与心肌缺血间的关系无法确定,本研究仅停留在了CCTA相关参数定量评估收缩期MB压迫程度方面;未涉及CCTA相关参数与MB患者临床预后的长期随访研究等。

4 结论

CCTA 可用于定量评估 MB 患者收缩压迫程度,且 TAGs、MCA-COD 联合评估 MB 显著性收缩压迫的效能较高,可为临床诊断提供更为精确的指导。

【参考文献】

- [1] NAM P, CHOI B G, CHOI S Y, *et al.* The impact of myocardial bridge on coronary artery spasm and long-term clinical outcomes in patients without significant atherosclerotic stenosis[J]. *Atherosclerosis*, 2018, 270(24): 8-12.
- [2] 刘东婷, 哈达, 温兆赢, 等. 心肌桥近端冠脉狭窄程度预测模型的建立及其临床应用价值[J]. *放射学实践*, 2022, 37(4): 443-448.
- [3] 王昊, 马瑶, 王泽穆, 等. 冠状动脉轻度狭窄病人心肌桥与冠状动脉内皮功能障碍的关系探讨[J]. *中西医结合心脑血管病杂志*, 2022, 20(4): 702-705.
- [4] 汪雁博, 郝国贞. 心肌桥对心脏功能影响的研究[J]. *中国介入心脏病学杂志*, 2021, 29(1): 44-47.
- [5] ZERBO S, LANZARONE A, RAIMONDI M, *et al.* Myocardial bridge pathology and preventable accidents during physical activity of healthy subjects: A case report and a literature review[J]. *Med Leg J*, 2020, 88(4): 209-214.
- [6] 张翠芳, 周华. 冠状动脉心肌桥的诊疗现状与研究进展[J]. *中国动脉硬化杂志*, 2018, 26(7): 744-748.
- [7] YAMAUCHI S, HAYASHIDA A, HIROHATA A, *et al.* Intraoperative coronary angiography and fractional flow reserve measurement with dobutamine infusion in supra-arterial myotomy for a myocardial bridge: a case report[J]. *Eur Heart J Case Rep*, 2021, 5(7): ytab268. doi: 10.1093/ehjcr/ytab268.
- [8] 周蕊, 李健, 郭庆乐, 等. 冠状动脉 CT 血管成像对心肌桥收缩期压迫程度的诊断价值[J]. *川北医学院学报*, 2022, 37(4): 490-493.
- [9] XIE Y, WANG X, XIE W, *et al.* Contrast opacification difference of mural artery and the transluminal attenuation gradient on coronary computed tomography angiography for detection of systolic compression of myocardial bridge[J]. *Surg Radiol Anat*, 2018, 40(7): 757-767.
- [10] 王录兵, 黄勇, 杨文海, 等. 冠状动脉 CTA 与冠状动脉造影诊断心肌桥-壁冠状动脉的对比研究[J]. *医学影像学杂志*, 2020, 30(9): 1603-1606.
- [11] 刘翔宇, 所世腾, 秦文彬, 等. 管腔内密度衰减梯度评估合并心肌桥前降支与冠状动脉粥样硬化关系的研究[J]. *中华放射学杂志*, 2019, 53(6): 453-458.
- [12] LI Y, YU M, ZHANG J, *et al.* Non-invasive imaging of myocardial bridge by coronary computed tomography angiography: the value of transluminal attenuation gradient to predict significant dynamic compression[J]. *Eur Radiol*, 2017, 27(5): 1971-1979.
- [13] 盛开, 陆靖, 张佳胤, 等. 冠状动脉 CT 血管造影测量管腔密度梯度预测心肌桥收缩期压迫程度[J]. *中国临床医学*, 2020, 27(4): 613-619.
- [14] 朱璐宁, 姚东英, 贾雷, 等. CT 冠状动脉成像评估心肌桥与冠状动脉粥样硬化的关系[J]. *现代医学*, 2019, 47(4): 385-388.
- [15] 张国雷, 石凤祥, 王雷, 等. 冠状动脉心肌桥血管的血流动力学变化研究[J]. *河北医药*, 2022, 44(5): 758-760.
- [16] 成水华, 倪炯, 刘君, 等. 基于人工智能技术的 FFR CT 评估左冠状动脉前降支纵深型心肌桥血流动力学变化[J]. *中华医学杂志*, 2021, 101(7): 464-469.
- [17] 龚黎慧, 王仲众, 苑俊, 等. 体外循环心脏术后预后影响因素分析及早期血流动力学监测意义[J]. *中国医师杂志*, 2019, 21(8): 1212-1213.
- [18] BURT J R, O'DELL M C, YACCOUB B, *et al.* Prevalence of Abnormal Coronary Findings on Coronary Computed Tomography Angiography Among Young Adults Presenting With Chest Pain[J]. *J Thorac Imaging*, 2021, 36(2): 116-121.
- [19] 韩丹, 杨正汉, 徐岩, 等. 冠状动脉 CT 造影的深度学习对冠心病的诊断价值[J]. *心肺血管病杂志*, 2022, 41(1): 77-83.
- [20] KOJIMA T, NAGAO M, YABUUCHI H, *et al.* New transluminal attenuation gradient derived from dynamic coronary CT angiography: diagnostic ability of ischemia detected by ¹³N-ammonia PET[J]. *Heart Vessels*, 2021, 36(4): 433-441.
- [21] HAE J K, SUNG M K, JIN-HO C, *et al.* Influence of scan technique on intracoronary transluminal attenuation gradient in coronary CT angiography using 128-slice dual source CT: multi-beat versus one-beat scan[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2017, 33(6): 937-946.
- [22] 谢伟, 谢元亮, 王翔, 等. 冠状动脉血管密度梯度参数对伴收缩期压迫的心肌桥的诊断价值[J]. *临床放射学杂志*, 2018, 37(7): 1107-1112.
- [23] 王运兰, 张蕾, 田志强. 低剂量冠状动脉 CT 血管造影评估冠脉管腔的临床价值[J]. *中国动脉硬化杂志*, 2020, 28(9): 803-808.
- [24] 张极平, 李丽, 王敏. 冠状动脉 CTA 管腔密度梯度参数预测心肌桥收缩压迫程度的价值[J]. *中国临床医学影像杂志*, 2020, 31(5): 338-342.
- [25] 杭靖宇, 李永光, 刘常远, 等. 心肌桥及其相关影响因素的最新研究进展[J]. *上海医学*, 2019, 42(6): 382-384.
- [26] STUIJFZAND W J, DANAD I, RAIJMAKERS P G, *et al.* Additional value of transluminal attenuation gradient in CT angiography to predict hemodynamic significance of coronary artery stenosis[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2014, 7(12): 374-386.

(收稿日期: 2022-09-27; 修回日期: 2023-10-18; 编辑: 黎仕娟)