

• 论著—研究报告 •

LAD 纵深型心肌桥形态与 CT-FFR 的关系研究*

陈萍¹ 罗琳² 陈强² 陈玉环³ 张今尧³ 籍庆余⁴

[摘要] **目的:**通过冠状动脉 CT 血管造影(coronary CT angiography,CCTA)检查探讨左冠状动脉前降支(left anterior descending coronary artery,LAD)纵深型心肌桥(myocardial bridging,MB)形态与 CT 血流储备分数(CT-FFR)的关系。**方法:**回顾性分析 2018 年 1 月—2022 年 4 月包头医学院第一附属医院影像科 323 例 LAD 纵深型 MB 患者的解剖学信息,并以 CT-FFR \leq 0.80 为心肌缺血的指标,将患者分为 CT-FFR 正常组(237 例)及 CT-FFR 异常组(86 例)。采用 *t* 检验分析比较 2 组各 MB 参数的差异,采用岭回归模型分析 CT-FFR 值的影响因素,通过 ROC 曲线分析差异有统计学意义的参数。**结果:**2 组 MB 入口处位置、出口处位置、长度、肌肉指数、收缩期压迫程度及壁冠状动脉(mural coronary artery,MCA)最狭窄处面积、入口处面积、出口处面积差异均有统计学意义($P<0.05$)。岭回归方程显示,MB 出口位置、长度及肌肉指数对 CT-FFR 值具有负向影响($P<0.05$),MCA 面积对 CT-FFR 值具有正向影响($P<0.05$),并且 MB 长度、出口位置、肌肉指数对 MB 心肌缺血均具有较高的诊断价值,三者的曲线下面积(AUC)分别为 0.85、0.80、0.79。**结论:**LAD 纵深型 MB 的位置离冠状窦越近、MCA 面积越窄,尤其是 MB 长度较长的患者,更容易出现心肌缺血的临床表现,应予以高度重视。

[关键词] 心肌桥;冠状动脉 CT 血管成像;心肌缺血;血流储备分数

DOI:10.13201/j.issn.1001-1439.2023.04.012

[中图分类号] R542 **[文献标志码]** A

Correlation study between morphology of deep myocardial bridge over LAD and CT-FFR

CHEN Ping¹ LUO Lin² CHEN Qiang² CHEN Yuhuan³ ZHANG Jinyao³ JI Qingyu⁴

(¹Baotou Medical College, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou, Inner Mongolia Autonomous Region,014040,China;²Department of Imaging, The First Affiliated Hospital of Baotou Medical College, Inner Mongolia University of Science and Technology;³Department of Clinical Research,Keya Medical Technology Co., Ltd;⁴Department of CT Room, The Second Affiliated Hospital of Baotou Medical College)

Corresponding author: LUO Lin, E-mail: byll117@sina.com

Abstract Objective: To investigate the correlation between the Morphology of deep myocardial bridges (MB) over the left anterior descending coronary artery (LAD) and the measurement of coronary fractional flow reserve derived from CT (CT-FFR) by coronary CT angiography (CCTA). **Methods:** The anatomical information of 323 patients with LAD deep MB in the First Affiliated Hospital of Baotou Medical College from January 2018 to April 2022 were retrospectively analyzed. With CT-FFR \leq 0.80 as the index for myocardial ischemia, the patients were divided into the normal CT-FFR group ($n=237$) and the abnormal CT-FFR group ($n=86$). MB parameters were analyzed and compared between the two groups using the *t* test. The influencing factors of CT-FFR values were analyzed by a multivariate linear regression model, and the parameters with statistically significant differences were analyzed with the ROC curve. **Results:** Statistically significant differences were found between the two groups in the entrance location, exit location, length, muscle index and systolic compression degree of MB, as well as the areas of the narrowest part, entrance and exit of mural coronary artery (MCA) ($P<0.05$). The ridge regression equation showed that the exit location, length and muscle index of MB had a negative effect on CT-FFR values ($P<0.05$), while the area of the MCA had a positive effect on CT-FFR values ($P<0.05$). Additionally, the length, exit location and muscle index of MB presented high diagnostic values for my-

*基金项目:深圳市科创委孔雀计划团队资助项目(No:KQTD2016112809330877)

¹内蒙古科技大学包头医学院(内蒙古包头,014040)

²内蒙古科技大学包头医学院第一附属医院医学影像科

³科亚医疗科技股份有限公司临床科技部

⁴内蒙古科技大学包头医学院第二附属医院 CT 室

通信作者:罗琳,E-mail:byll117@sina.com

ocardial ischemia, with the area under the curve (AUC) of 0.85, 0.80 and 0.79, respectively. **Conclusion:** The closer the position of LAD deep MB is to the coronary sinus, the narrower the MCA area is, and especially the MB patients with longer MB length are more likely to have clinical manifestations of myocardial ischemia, which should be paid more attention to.

Key words fractional flow reserve; myocardial bridging; coronary CT angiography; artificial intelligence

心肌桥(myocardial bridging, MB)指正常应走行于心外膜脂肪组织内的冠状动脉某一段异位于心肌纤维中,这段冠状动脉称为壁冠状动脉(mural coronary artery, MCA),覆盖在MCA上的心肌纤维称为壁冠状动脉-心肌桥(MCA-MB)。MB可见于任一冠状动脉分支,但多见于左冠状动脉前降支(left anterior descending coronary artery, LAD)。按照MCA-MB的厚度可分为表浅型MB(心肌厚度 ≤ 2 mm)和纵深型MB(心肌厚度 > 2 mm)^[1]。以往文献报道,表浅型MB患者因MCA-MB较薄,对MCA血流影响较小,一般无明显的临床症状;而部分纵深型MB患者易出现心肌缺血、心律失常甚至心源性猝死的临床表现^[2-3]。冠状动脉CT血管造影(coronary CT angiography, CCTA)目前是临床上最常用的诊断和筛查MB的方法^[4],可精确地诊断并测量MB位置、深度及长度等心肌桥形态信息。基于CCTA影像数据计算得出的模拟冠状动脉血流储备分数(fractional flow reserve, FFR),即CT-FFR值,已经证实其在冠状动脉狭窄功能性评价方面与有创的FFR检查具有较高的一致性^[5-8]。本研究通过对比323例LAD纵深型MB患者的CCTA影像资料,分析可能造成CT-FFR降低的危险因素,旨在探讨LAD纵深型MB形态与心肌缺血之间的关系。

1 对象与方法

1.1 对象

收集2018年1月—2022年4月在包头医学院第一附属医院影像科因不明原因胸痛、心绞痛行CCTA检查示LAD纵深型MB的患者,最终共纳入323例MB患者。纳入标准:①CCTA图像均无伪影可用于图像后处理及计算CT-FFR值;②LAD仅存在一处纵深型MB。排除标准:①合并其他冠状动脉疾病,如冠状动脉伴有斑块、冠状动脉起源或终止异常等;②合并其他心脏疾病,如心肌疾病、瓣膜病变等;③心脏手术后的患者,如行冠状动脉旁路移植术后、冠状动脉介入治疗术后患者。

以CT-FFR ≤ 0.8 作为心肌缺血的诊断标准^[9],将符合纳入标准的323例研究对象分为CT-FFR正常组(CT-FFR > 0.80)和CT-FFR异常组(CT-FFR ≤ 0.80)。具体流程如图1所示。

1.2 CCTA扫描方案

所有患者均采用256层CT扫描仪(Philips Brilliance iCT; 荷兰)并应用回顾性心电门控技术

行CCTA检查。经定位像确定扫描范围,扫描范围从气管分叉下1 cm至心脏最后一层出现后水平,通过设置降主动脉中的感兴趣区自动触发扫描,使用双筒高压注射器(Tennessee XD2003, Ulrich)注入370 mgI/mL碘帕醇(博莱科),流率设置为5.0 mL/s,造影剂用量按0.8 mL/kg体重计算,随后以流率为5.0 mL/s注入生理盐水冲刷管道。在R-R间期的30%~80%进行扫描,利用CT机最佳期相功能自动获取R-R间期中最佳收缩期(R-R间期的33%~46%)及最佳舒张期(R-R间期的66%~75%)图像,必要时进行适当心电编辑。以层厚0.5 mm,层间距0.25 mm进行图像重建。

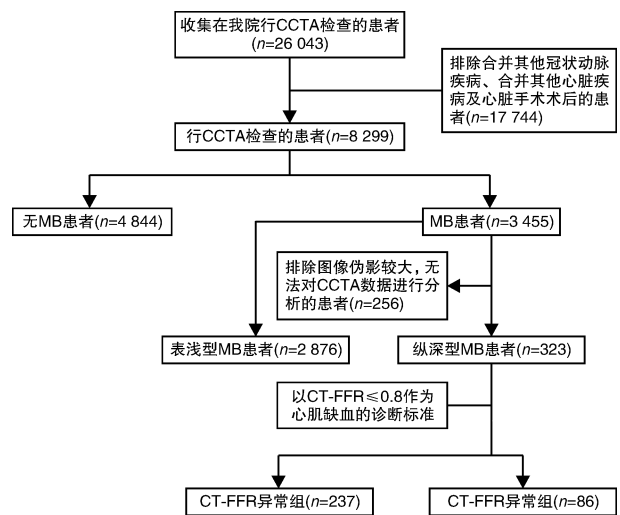


图1 流程图

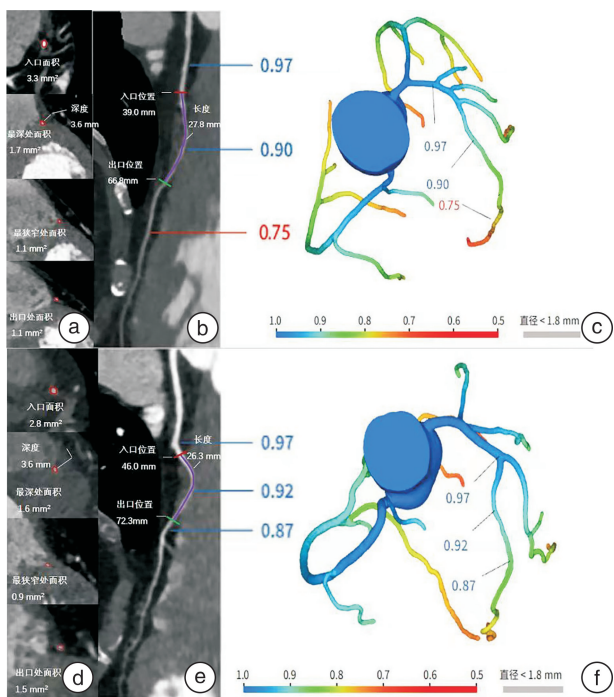
Figure 1 Flow chart

1.3 图像分析

使用飞利浦星云工作站(V4.5.4.50030)对所有患者的CCTA数据进行图像分析。需要测量的MB参数包括:MB位置(包括MB入口处、最深处及出口处位置)、MB长度、MB深度、MB肌肉指数、MCA收缩期压迫指数及MCA面积(包括MCA入口处、最深处、出口处及最狭窄处面积)。各MB参数由2名具阅片经验的影像科医师进行双盲测量,当2名放射科医师无法达成共识时,咨询第3位更有经验的影像科医师,做出最终决定(图2)。MB的位置和MB的长度在曲面重组图像上测量,MB的位置即LAD开口处至MB入口处、最深处及出口处的距离;MB长度=MB出口位置—MB入口位置。MB深度及MCA面积在横断面图

像上测量, MB 深度为 MCA-MB 的最大厚度; MCA 各处面积由星云工作站血管分析功能自动计算。MB 肌肉指数 = MB 长度 × MB 深度^[10]。MCA 收缩期压迫指数 = (舒张期 MCA 最宽处管径 - 收缩期 MCA 最窄处管径) / 舒张期 MCA 最宽处管径 × 100%^[11]。

将所有患者的收缩期及舒张期 CCTA 影像以 DICOM 格式导出并传输至科亚医疗的深脉分数核心实验室平台进行 CT-FFR 值测定,分别测量收缩期及舒张期患者 MB 出口处 1~2 cm 处的 CT-FFR 值。



a~c: 1 例 46 岁女性 LAD 纵深型 MB 患者; d~f: 1 例 71 岁男性 LAD 纵深型 MB 患者, MCA 走行于心肌纤维内。a、d: 心脏横断面图像, 示 MCA 各处面积及 MB 深度的测量值; b、e: 心脏曲面重组图像, 示 MB 位置及长度的测量值; c、f: CT-FFR VR 图, 示 MCA 近、中、远端 CT-FFR 值。

图 2 MB 位置、长度、深度、MCA 面积及 CT-FFR 值测量图

Figure 2 MB position, length, depth, MCA area and CT-FFR value measurement map

1.4 伦理学审查

本研究经包头医学院第一附属医院伦理委员会审批通过(No: 20220033), 所有受检者均自愿参加本研究并签署知情同意书。

1.5 统计学处理

应用 IBM SPSS 22.0 统计软件进行数据分析。计量资料首先进行 Kolmogorov-Smirnov 正态性分布检验, 符合正态性分布的计量资料以 $\bar{X} \pm$

S 表示, 组间比较采用 *t* 检验; 计数资料以例数或百分数表示, 比较采用 χ^2 检验。采用岭回归分析影响 CT-FFR 值的危险因素, 通过受试者工作特征(receiver operation characteristic, ROC) 曲线分析差异有统计学意义的参数, 并计算曲线下面积(area under curve, AUC) 作为评价参数诊断效能的指标, 当 $0.5 < AUC \leq 0.7$ 时认为诊断能力较低; 当 $0.7 < AUC \leq 0.9$ 时认为诊断能力中等; 当 $0.9 < AUC \leq 1.0$ 时认为诊断能力较高。所有的比较都是双尾的, 以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 患者的基线特点

本研究最终共纳入 LAD 纵深型 MB 患者 323 例, CT-FFR 正常组共 237 例, 其中男 135 例 (57.0%), 平均年龄 (56 ± 11) 岁; CT-FFR 异常组共 86 例, 其中男 51 例 (59.3%), 平均年龄 (54 ± 9) 岁; 2 组患者的年龄 ($t = -1.46, P = 0.148$) 及性别比例 ($\chi^2 < 0.001, P = 0.998$) 差异均无统计学意义。

2.2 影响患者 CT-FFR 值的单因素分析

CT-FFR 异常组的 MB 出口位置为较 CT-FFR 正常组距左冠状动脉开口处距离远, 差异有统计学意义 ($P < 0.01$); CT-FFR 异常组的 MB 长度明显长于 CT-FFR 正常组, 差异有统计学意义 ($P < 0.01$); 此外, CT-FFR 异常组的 MCA 最狭窄处面积和出口处面积均低于 CT-FFR 正常组, 差异有统计学意义 ($P < 0.01$)。CT-FFR 异常组 MB 肌肉指数明显高于 CT-FFR 正常组, 差异有统计学意义 ($P < 0.01$); CT-FFR 异常组 MB 入口位置、入口处面积均小于 CT-FFR 正常组, 差异有统计学意义 ($P < 0.01$)。CT-FFR 异常组 MB 入口位置、最深处面积均小于 CT-FFR 正常组, 差异有统计学意义 ($P < 0.05$); CT-FFR 异常组 MCA 收缩期压迫指数大于 CT-FFR 正常组, 差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。而 2 组 MB 最深处位置、深度及 MCA 入口处面积均差异无统计学意义 (均 $P > 0.05$)。见表 1。

2.3 影响患者 CT-FFR 值的岭回归分析

岭回归模型示, MCA 最狭窄处面积、最深处面积、入口处面积、出口处面积对 CT-FFR 值具有正向影响 ($P < 0.05$); MB 出口处位置、长度、肌肉指数对 CT-FFR 值具有负向影响 ($P < 0.05$); MB 入口位置、最深处位置、深度及 MCA 收缩期压迫指数对 CT-FFR 值无影响。见表 2。

2.4 MB 解剖学参数诊断心肌缺血效能的 ROC 曲线分析

ROC 曲线分析显示 MB 长度诊断 CT-FFR 异常的最佳阈值为 38.5 mm, 利用该阈值诊断 CT-FFR 异常的敏感度和特异度分别为 80.2%、79.3%, AUC 为 0.85 ($P < 0.01$)。MB 出口处位

置诊断CT-FFR异常的最佳阈值为83.5 mm,利用该阈值诊断CT-FFR异常的敏感度为81.4%,特异度为66.2%,AUC为0.80($P < 0.01$)。MB肌肉指数诊断CT-FFR异常的最佳阈值为117.5,

利用该阈值诊断CT-FFR异常的敏感度和特异度分别为81.4%、67.8%,AUC为0.79($P < 0.01$)。见图3。

表1 2组LAD纵深型MB患者CCTA解剖学参数比较

Table 1 Comparison of anatomical parameters of CCTA in two groups of patients with LAD deep MB $\bar{X} \pm S$

参数	CT-FFR正常组(237例)	CT-FFR异常组(86例)	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
MB入口位置/mm	47.8±10.1	44.8±8.9	-2.422	0.016
MB最深处位置/mm	58.9±11.0	58.2±12.0	-0.547	0.585
MB出口位置/mm	78.7±12.5	95.7±18.2	8.038	<0.001
MB长度/mm	30.8±11.1	49.8±16.4	10.001	<0.001
MB深度/mm	3.6±1.7	4.2±2.8	1.970	0.052
MB肌肉指数	115.4±79.8	231.8±317.6	3.361	0.001
MCA收缩期压迫指数/%	42.5±11.5	45.8±10.9	2.287	0.023
MCA最狭窄处面积/mm ²	1.8±0.7	1.4±0.5	-5.270	<0.001
MCA最深处面积/mm ²	2.5±1.1	2.2±1.3	-1.995	0.047
MCA入口处面积/mm ²	5.1±2.2	4.6±2.4	-1.555	0.121
MCA出口处面积/mm ²	2.4±0.9	2.0±0.7	-4.722	<0.001

表2 影响MB患者CT-FFR值的岭回归分析

Table 2 Ridge Regression analysis affecting CT-FFR value in MB patients

参数	非标准化系数		标准化系数	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
	<i>B</i>	标准误	β		
常数	0.870	0.010	—	86.751	<0.001
MB入口位置	0.000	0.000	0.028	1.753	0.081
MB最深处位置	0.000	0.000	0.001	0.034	0.973
MB出口处位置	-0.001	0.000	-0.187	-12.063	<0.001
MB长度	-0.001	0.000	-0.199	-13.181	<0.001
MB深度	0.000	0.000	0.009	0.557	0.578
MB肌肉指数	0.001	0.000	-0.081	-5.278	<0.001
MCA最狭窄处面积	0.009	0.001	0.126	7.966	<0.001
MCA最深处面积	0.003	0.001	0.067	3.740	<0.001
MCA入口处面积	0.002	0.000	0.093	5.882	<0.001
MCA出口处面积	0.006	0.001	0.100	5.473	<0.001
MCA收缩期压迫指数	0.000	0.000	-0.005	-0.299	0.765
<i>R</i> ²		0.503			
调整 <i>R</i> ²		0.485			
<i>F</i>	$F(11,310)=28.465, P < 0.001$				

3 讨论

CCTA可以精确测量MB解剖学参数,但对于MB是否引起了患者冠状动脉血流动力学的障碍或其严重程度无法准确评估,而MB的临床意义主要在于其是否造成了心肌缺血的发生。本研究所用CT-FFR分析技术的基本原理为通过直接学习血管的解剖学结构及血流功能,提取关键的特征参

数得到经过验证的训练模型,并应用到新的测量数据上,在保证准确性的同时能够快速得到整个血管树的FFR计算结果^[12]。其对冠状动脉功能性狭窄评价的准确性和可靠性已有多项研究被证实^[6,13-14]。周帆等^[11]首次证实CT-FFR在诊断MB特异性缺血时具有很高的诊断性能,其敏感度和特异度分别为96%和84%。本研究是将CT-

FFR 技术应用于 LAD 纵深型 MB 患者, 分析 LAD 纵深型 MB 解剖学参数与 $CT-FFR \leq 0.80$ 的关系, 从而为临床治疗 MB 提供理论参考。

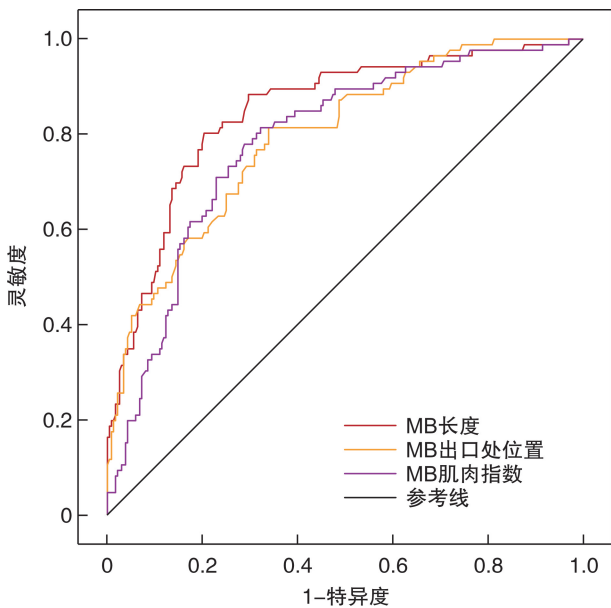


图 3 MB 解剖学参数诊断 CT-FFR 异常效能的 ROC 曲线

Figure 3 ROC curve of MB anatomical parameters for diagnosing CT-FFR abnormalities

本试验结果显示, CT-FFR 正常组与 CT-FFR 异常组年龄和性别差异无统计学意义 ($P > 0.05$), 故 2 组资料具有可比性。本研究发现, CT-FFR 异常组 MB 肌肉指数显著大于 CT-FFR 正常组, 表明 MB 长而深的患者心肌缺血发生率较高。对于 MCA 长度及深度与心肌缺血的相互关系, 既往学者的认识存在差异, 部分学者认为 MB 越深, 患者心肌缺血发生率越高, MCA 的长度与是否出现临床症状无明显关系^[15-16], 还有一些研究结果发现 MB 长度与深度均与心肌缺血的发生有密切关系^[11, 17]。本研究结果显示 MB 长度及 MB 肌肉指数是影响 CT-FFR 值的独立危险因素, 并通过 ROC 曲线发现 MB 的长度及 MB 肌肉指数对于诊断 CT-FFR 异常价值较高。本组病例中 LAD 纵深型 MB 患者约 74% CT-FFR 值未见异常, 并且 CT-FFR 正常组与异常组间 MB 深度无明显差异, 由此可表明 MB 长度相较于 MB 深度对患者血流动力学改变具有更重要的意义。与此同时, 本研究还发现, CT-FFR 异常组 MB 入口位置较正常组距左冠状动脉窦距离更近, 出口位置较正常组距左冠状动脉窦距离更远, 这从另一方面提示 MB 长度可能是导致患者血流动力学改变更为重要的因素, 这与成水华等^[18]和 Javadzadegan 等^[19]的研究结果一致。理论基础可能是 MCA 越长其相应供血范

围则越广泛, 对邻近分支血管产生的影响越大^[20-21], 并且 MB 入口位置越靠近冠状动脉窦, 其近端正常冠状动脉血管越短, 近端冠状动脉内前向性的血流和反流性的血流碰撞更明显, 更容易出现血流紊乱, 而 MB 出口位置距开口位置越远, 则会引起血流储备分数减低的冠状动脉节段越长, 因而出现心肌缺血的可能性会越大。

除此之外, 有研究证实, MB 在心肌收缩期压迫 MCA 导致血流受阻的效应可持续到舒张早中期^[22-23], 这种在收缩期和舒张早、中期同时限制血流灌注的异常血流动力学, 明显降低了冠状动脉的血流储备, 而当 MCA 在收缩期管腔面积压缩超过 50% 时, 心肌整体灌注就会降低得越明显, 以至于患者出现心肌缺血临床症状表现。在本研究中, 通过对 2 组患者 MCA 面积的比较, 发现 CT-FFR 异常组 MCA 面积均小于 CT-FFR 正常组, 并且 CT-FFR 异常组 MCA 收缩期压迫指数大多接近 50%, 说明 MCA 狭窄与患者出现心肌缺血有密切的关系, 这也解释了部分有临床症状的患者, CCTA 检查虽无明显粥样硬化与显著性管腔狭窄征象, 但却存在 MB, 其临床症状应与 MCA 的管腔狭窄有关。

本研究存在以下不足: 首先, 本研究为回顾性研究, 纳入的预测因子可能因为数据的缺失而被忽略, 这样容易带来研究对象的选择偏倚, 因此需要后续设计良好的高质量前瞻性试验以进一步提高结论的可靠程度。其次, 本研究仅针对 LAD 存在纵深型 MB 进行纳入和相关分析, 对于其他部位及类型 MB 与心肌缺血的相关性研究有待进一步探讨。最后, 本研究未对患者的临床结局进行随访, 为了更好地证实其预后价值, 有待进一步开展相关患者预后的研究。

综上所述, 通过 CCTA 获得的 MB 解剖学参数在评估 LAD 纵深型 MB 血流动力学变化方面具有较高的临床应用价值。多种解剖学特征的综合影响对 MB 心肌缺血的意义更大, LAD 纵深型 MB 的位置离冠状动脉窦越近、管腔越狭窄, 尤其是长度较长的 MB, 对血管的压迫越明显, 易于产生心肌缺血的临床表现, 应予以高度重视。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Tarantini G, Migliore F, Cademartiri F, et al. Left Anterior Descending Artery Myocardial Bridging: A Clinical Approach [J]. J Am Coll Cardiol, 2016, 68 (25): 2887-2899.
- [2] 王兰, 周子华, 郭瑄, 等. 114 例心肌桥患者焦虑抑郁状况及其相关危险因素分析 [J]. 临床心血管病杂志, 2018, 34(2): 162-165.
- [3] Zhao DH, Fan Q, Ning JX, et al. Myocardial bridge-related coronary heart disease: Independent influencing

- factors and their predicting value[J]. *World J Clin Cases*, 2019, 7(15): 1986-1995.
- [4] Kim YJ, Yong HS, Kim SM, et al. Korean guidelines for the appropriate use of cardiac CT[J]. *Korean J Radiol*, 2015, 16(2): 251-285.
- [5] Fairbairn TA, Nieman K, Akasaka T, et al. Real-world clinical utility and impact on clinical decision-making of coronary computed tomography angiography-derived fractional flow reserve: lessons from the ADVANCE Registry[J]. *Eur Heart J*, 2018, 39(41): 3701-3711.
- [6] 徐浩, 张治, 解学乾, 等. 冠脉生理功能评估软件(DEEPVESSEL FFR)与有创FFR在评估冠脉缺血中的对比研究[J]. *诊断学理论与实践*, 2021, 20(4): 384-390.
- [7] Wang ZQ, Zhou YJ, Zhao YX, et al. Diagnostic accuracy of a deep learning approach to calculate FFR from coronary CT angiography[J]. *J Geriatr Cardiol*, 2019, 16(1): 42-48.
- [8] Eftekhari A, Min J, Achenbach S, et al. Fractional flow reserve derived from coronary computed tomography angiography: diagnostic performance in hypertensive and diabetic patients[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2017, 18(12): 1351-1360.
- [9] Zhuang B, Wang S, Zhao S, et al. Computed tomography angiography-derived fractional flow reserve (CT-FFR) for the detection of myocardial ischemia with invasive fractional flow reserve as reference: systematic review and meta-analysis [J]. *Eur Radiol*, 2020, 30(2): 712-725.
- [10] Ishikawa Y, Akasaka Y, Suzuki K, et al. Anatomic properties of myocardial bridge predisposing to myocardial infarction[J]. *Circulation*, 2009, 120(5): 376-383.
- [11] 周帆, 闫静, 周长圣, 等. 基于冠状动脉CT血管成像的血流储备分数评估心肌桥血流动力学变化的研究[J]. *中华放射学杂志*, 2019, 53(4): 274-280.
- [12] Gao Z, Wang X, Sun S, et al. Learning physical properties in complex visual scenes: An intelligent machine for perceiving blood flow dynamics from static CT angiography imaging[J]. *Neural Netw*, 2020, 123: 82-93.
- [13] 张明多, 南楠, 兰宏志, 等. 基于人工智能优化与计算流体力学的无创血流储备分数对冠状动脉狭窄缺血的诊断价值[J]. *心肺血管病杂志*, 2022, 41(3): 243-247.
- [14] Liu X, Wang Y, Zhang H, et al. Evaluation of fractional flow reserve in patients with stable angina; can CT compete with angiography? [J]. *Eur Radiol*, 2019, 29(7): 3669-3677.
- [15] 褚千琨, 高德宏, 张铭金, 等. RevolutionCT在心肌桥-壁冠状动脉及左心室功能测定的临床应用价值[J]. *现代医用影像学*, 2022, 31(3): 402-407.
- [16] Nakanishi R, Rajani R, Ishikawa Y, et al. Myocardial bridging on coronary CTA: an innocent bystander or a culprit in myocardial infarction? [J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2012, 6(1): 3-13.
- [17] 闫玉洁, 袁俊强. 基于CCTA的血流储备分数对心肌桥心肌缺血的评估价值分析[J]. *实验与检验医学*, 2021, 39(3): 649-651.
- [18] 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.
- [19] Javadzadegan A, Moshfegh A, Mohammadi M, et al. Haemodynamic impacts of myocardial bridge length: A congenital heart disease[J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2019, 175: 25-33.
- [20] 王庭俊, 吴可贵. 病例 130: 64岁男性心电图: 异常Q波、ST-T改变[J]. *中华高血压杂志*, 2013, 21(3): 291-294.
- [21] 孙淑艳, 张娟. 64排螺旋CT与冠脉造影对心肌桥的对比研究[J]. *包头医学院学报*, 2013, 29(2): 47-49.
- [22] 杨漠源, 张敏秀, 贾圣琪, 等. 冠状动脉心肌桥合并近端狭窄病变的研究进展[J]. *中国介入心脏病学杂志*, 2019, 27(11): 649-652.
- [23] Sharzehee M, Chang Y, Song JP, et al. Hemodynamic effects of myocardial bridging in patients with hypertrophic cardiomyopathy[J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2019, 317(6): H1282-H1291.

(收稿日期: 2022-12-19)