

右冠状动脉起自左冠窦患者的CT解剖及CT-FFR特征与临床症状的相关性研究

毛亮, 王小强, 刘晓龙, 翟宁, 陈月芹

Correlation of Computed Tomography Angiography and Fractional Flow Reserve Features with Symptoms in Patients with Right Coronary Artery Originating from the Left Coronary Sinus

MAO Liang, WANG Xiaoqiang, LIU Xiaolong, ZHAI Ning, and CHEN Yueqin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2024.187>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

血流储备分数CT成像对冠状动脉旁路移植术后的影像学评价

CT Imaging Evaluation of Fractional Flow Reserve Score after Coronary Artery Bypass Grafting
CT理论与应用研究. 2021, 30(3): 361-369

基于CCTA的血流储备分数临床应用进展

Progress in the Clinical Application of Fractional Flow Reserve Based on Coronary CT Angiography
CT理论与应用研究. 2023, 32(2): 279-284

心绞痛患者斑块进展危险因素与冠状动脉CT血管成像指标的关系研究

Risk Factors of Plaque Progression in Patients with Angina Pectoris and Their Relationships with Coronary CT Angiography
CT理论与应用研究. 2023, 32(2): 217-222

基于CCTA的冠状动脉周围脂肪组织影像组学研究进展

Research Progress of Pericoronary Adipose Tissue Radiomics Based on Coronary Computed Tomography Angiography
CT理论与应用研究. 2024, 33(4): 531-538

CT冠状动脉造影应用于急性胸痛临床实践研究进展

Clinical Practice of CT Coronary Angiography in Acute Chest Pain: A Review
CT理论与应用研究. 2019, 28(6): 747-752

CT动脉增强分数与肝癌TACE治疗效果的相关性研究

Correlation between Arterial Enhancement Fraction on CT and Efficacy of Transcatheter Arterial Chemoembolization for Hepatocellular Carcinoma
CT理论与应用研究. 2023, 32(1): 67-73



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

毛亮, 王小强, 刘晓龙, 等. 右冠状动脉起自左冠窦患者的 CT 解剖及 CT-FFR 特征与临床症状的相关性研究[J]. CT 理论与应用研究 (中英文), 2025, 34(1): 17-22. DOI:10.15953/j.ctta.2024.187.

MAO L, WANG X Q, LIU X L, et al. Correlation of Computed Tomography Angiography and Fractional Flow Reserve Features with Symptoms in Patients with Right Coronary Artery Originating from the Left Coronary Sinus[J]. CT Theory and Applications, 2025, 34(1): 17-22. DOI:10.15953/j.ctta.2024.187. (in Chinese).

右冠状动脉起自左冠窦患者的 CT 解剖及 CT-FFR 特征与临床症状的相关性研究

毛亮, 王小强, 刘晓龙, 翟宁, 陈月芹[✉]

济宁医学院附属医院医学影像科, 山东 济宁 272000

摘要: 目的: 通过冠状动脉 CTA 及 CT 血流储备分数 (CT-FFR) 探讨右冠状动脉起自左冠窦 (AORL) 的解剖及血流动力学特征与临床症状的相关性。方法: 回顾性分析 2018 年 1 月至 2023 年 12 月期间在我院行 CCTA 检查检出 AORL 且走行于主动脉-肺动脉间或肺动脉下、无有意义粥样硬化狭窄的患者 151 例, 按有无临床症状分为有症状组 87 例, 无症状组 64 例。通过 CCTA 图像比较两组患者 RCA 的解剖学差异; 通过 CT-FFR 软件测量、比较两组患者 RCA 距开口 3cm 处的 CT-FFR 值。结果: 两组患者右冠状动脉开口形态、起始角、近段管腔狭窄率、狭窄段长度及与肺动脉的位置关系存在统计学差异。RCA 起始处夹角与有无临床症状呈中度相关性 ($r = 0.566$), RCA 开口形状、近段管腔狭窄率、狭窄段长度及与肺动脉的位置关系均与有无临床症状呈低度相关性。有症状组与无症状组 CT-FFR 分别为 (0.94 ± 0.02) 和 (0.97 ± 0.01), 差异有统计学意义, 且与有无临床症状呈中度相关性 ($r = 0.594$)。结论: 在 AORL 患者中, 右冠状动脉裂隙状开口、小的起始角、近段管腔狭窄、狭窄段较长及大动脉间走行是引起临床症状的 CCTA 解剖特征; 右冠状动脉 CT-FFR 改变与心血管症状发生相关, 但其在测量方法及临界值的确定仍有待研究。

关键词: CT 血管成像; 冠状动脉变异; 血流储备分数

DOI:10.15953/j.ctta.2024.187 中图分类号: R 814 文献标识码: A

Correlation of Computed Tomography Angiography and Fractional Flow Reserve Features with Symptoms in Patients with Right Coronary Artery Originating from the Left Coronary Sinus

MAO Liang, WANG Xiaoqiang, LIU Xiaolong, ZHAI Ning, CHEN Yueqin[✉]

Department of Radiology, Affiliated Hospital of Jining Medical University, Jining 272000, China

Abstract: Objective: This study aimed to explore the association between the anatomical and hemodynamic characteristics and the clinical symptoms in patients with the origin of the right coronary artery from the left coronary sinus (AORL) using coronary computed tomography angiography (CCTA) and CT fractional flow reserve (CT-FFR). Methods: A retrospective analysis was conducted on 151 patients with AORL detected by CCTA between January 2018 and December 2023 at our hospital. Patients were divided into the symptomatic ($n = 87$) and asymptomatic ($n = 64$) groups. CCTA images were used to compare anatomical differences of the RCA between both groups. CT-FFR values were measured and compared at 3 cm from the RCA ostium. Results: There were significant statistical differences between both groups regarding the RCA ostial morphology, origin angle, proximal lumen stenosis

收稿日期: 2024-08-27。

基金项目: 济宁市重点研发计划 (基于冠状动脉 CTA 及 CT-FFR 对冠状动脉先天变异患者发生不良心血管事件的预测研究 (2024YXNS061)); 济宁市重点研发计划 (多模态心脏磁共振对射血分数保留的心力衰竭诊断及预后评估价值的研究 (2022YXNS011)); 济宁市重点研发计划 (基于多模态 CMR 和生物标记物探究慢性心力衰竭患者预后不良的危险因素及预测模型的构建 (2023YXNS142))。

第一作者: 毛亮, 男, 主治医师, 主要从事 CT 及 MRI 诊断工作, E-mail: 467684395@qq.com。

通信作者: 陈月芹[✉], 女, 主任医师、研究生导师, 主要从事影像诊断及心血管影像的相关研究, E-mail: chen Yueqin010@163.com。

rate, length of the stenotic segment, and its relation to the pulmonary artery. The angle at the RCA ostium showed moderate correlation with clinical symptoms ($r = 0.566$), whereas the ostial shape, proximal lumen stenosis rate, length of the stenotic segment, and relation to the pulmonary artery showed low correlation with symptoms. CT-FFR values were (0.94 ± 0.02) and (0.97 ± 0.01) for the symptomatic and asymptomatic groups, respectively, with a significant difference and moderate correlation with clinical symptoms ($r = 0.594$). Conclusion: In patients with AORL, anatomical features, such as a slit-like RCA ostium, smaller origin angle, proximal lumen stenosis, long stenotic segment, and course between large arteries, are associated with clinical symptoms. Changes in CT-FFR are related to cardiovascular symptoms; however, further research is needed to determine measurement methods and critical values.

Keywords: computed tomography angiography; coronary artery variation; fractional flow reserve

冠状动脉先天变异相当少见,但形式多样,主要包括起源变异及走行变异等,其发生率约占人群的 1%^[1]。大多数冠状动脉先天变异患者无明显临床症状,但有些变异可潜在威胁生命。右冠状动脉起自左冠状窦 (origins of the right coronary artery from the left coronary sinus, AORL) 就属于恶性起源的一种,可引起心悸、胸痛、呼吸困难等症状甚至急性心肌梗死及猝死,也是青年人猝死的重要原因^[2]。

既往对于 AORL 的冠状动脉 CTA (coronary CT angiography, CCTA) 解剖学特征与临床症状的相关性仅见于小样本量的研究,且国内尚无与之相关的基于 CT 血流储备分数 (fractional flow reserve, CT-FFR) 的研究。

本文旨在通过 CCTA 及 CT-FFR 分析大样本量 AORL 患者的解剖及血流动力学特征,寻找引起临床症状的相关因素,探讨 CT-FFR 在 AORL 中应用的可行性。

1 资料与方法

1.1 临床资料

回顾性收集 2018 年 1 月至 2023 年 12 月期间在我院行冠状动脉 CTA 检查的 AORL 患者 151 例,包括疑似冠心病就诊 84 例,术前筛查冠状动脉病变者 70 例,健康体检者 7 例。

所有病例按照有无胸痛、心悸、胸闷及晕厥分为有症状组和无症状组。有症状组 87 例,年龄 27~81 岁,男性 45 例,女性 42 例;无症状组 64 例,年龄 31~86 岁,男性 34 例,女性 30 例。

纳入标准:右冠状动脉起自左冠窦、走行于主动脉后方(主-肺动脉间或肺动脉下走行)。排除标准:冠状动脉伴有斑块并管腔狭窄率大于 30%、心肌桥并管腔狭窄、冠状动脉终止异常、其他结构性心脏病及合并肺部功能性及器质性疾病者、CCTA 图像质量欠佳、已行冠状动脉介入治疗或冠状动脉旁路搭桥术后的患者。

本研究已通过医院伦理委员会的审查批准 (2022-02-C013)。

1.2 检查方法

所有患者均采用西门子的双源 CT 扫描仪 (SOMATOM Definition 及 SOMATOM Definition Flash), 自适应前瞻性心电门控技术扫描。心率在 75 次/min 以上的患者,检查前 45~60 min 口服倍他乐克 50 mg; 扫描前 5 min 所有受检者舌下含服硝酸甘油片以扩张冠状动脉。

CT 扫描参数: X 线管旋转时间 0.28~0.33 s/r, 准直器宽度 $64 \times 2 \times 0.6$ mm, 管电压 120 kV; 开启自动管电流调节 (CARE Dose 4D) 模式, 参考管电流 320 mA, 常规心脏扫描范围。

使用双筒高压注射器经肘静脉注射非离子对比剂碘普罗胺 (优维显, 含碘 370 mg/L, 拜耳先灵药业) 或碘克沙醇 (威视派克, 含碘 320 mg/L, 上海通用电气药业), 注射流率 5.0~5.5 mL/s; 采用自动跟踪技术检测升主动脉根部对比剂浓度, 触发阈值为 100 HU, 延时 7 s 自动触发扫描。

在 R-R 间期的 30%~80% 进行扫描, 利用最佳期相 (best phase) 功能自动获取最佳收缩期 (33%~46% R-R 间期) 及最佳舒张期 (66%~75% R-R 间期) 图像, 以 0.75 mm 的层厚进行图像重建。

1.3 图像后处理及测量分析

CCTA 图像传输至西门子 syngo.via 工作站进行后处理, 图像后处理技术包括多平面重组 (multiplanar reconstruction, MPR)、曲面重组 (curved planar reconstruction, CPR)、最大密度投影 (maximum intensity projection, MIP) 以及容积再现 (volume rendering, VR) 等。

用于 CT-FFR 计算及测量的原始图像上传到人工智能 CT-FFR 处理软件 (北京数坤科技股份有限公司), 选取舒张期右冠状动脉距离开口 3 cm 处进行测量^[3]。所有分析及测量分别由一名具有 6 年及 8 年心血管影像诊断经验的医师在不知道患者临床

症状的情况下共同进行。

解剖学特征测量, 分析参数包括: 舒张期 RCA 开口形状、起源位置、起始角、近段管腔狭窄率、起始段狭窄长度、与肺动脉瓣位置关系。其中开口形状分为圆形、椭圆形、裂隙状, 裂隙状开口为开口最大径超过短径线两倍以上^[4], 椭圆形介于圆形与裂隙状之间。

起源位置分为冠状窦内及冠状窦边缘。起始角在与主动脉环平行的平面测量, 定义为与冠状动脉近端走行平行的直线和与冠状动脉窦壁平行的直线的夹角^[5]。近段管腔狭窄率 = $(1 - \text{近段管腔狭窄处短径}/\text{临近正常管腔短径}) \times 100\%$, 狭窄长度通过在重建图像上肉眼观察有无狭窄并在 MPR 图像上测量长度, 以上两者测量均排除斑块所致管腔狭窄者。根据 RCA 是否位于肺动脉瓣水平上方, 分为主-肺动脉间型、肺动脉下型。

当两名医师意见不一致时邀请一位具有 15 年心血管影像诊断经验的医师讨论后达成一致。

1.4 统计学方法

应用 SPSS 27.0 软件包进行统计学分析。对所有计量资料进行 Shapiro-Wilk 正态性检验, 符合正态分布的计量资料以 $(\bar{x} \pm s)$ 表示, 两组间比较采用独立样本 t 检验; 不符合正态分布的计量资料以

$M(Q_1, Q_3)$ 表示, 两组间比较采用 Mann-Whitney U 检验。计数资料以例数和百分率 (%) 表示, 采用 χ^2 检验分析数据。

评价 CCTA 及 CT-FFR 特征与有无临床症状的相关性采用 Spearman 秩相关分析, $0.8 \leq |r| \leq 1.0$ 为高度相关, $0.5 \leq |r| < 0.8$ 为中度相关, $0.2 \leq |r| < 0.5$ 为低度相关, $|r| < 0.2$ 为极弱相关。

均以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组患者的一般资料与影像特征

有症状组患者表现为胸痛者 36 例、心悸者 27 例、胸闷者 19 例、晕厥者 6 例, 患者平均年龄 (57.36 ± 11.98) 岁, 其中男性 45 例; 无症状组平均年龄 (59.89 ± 11.88) 岁, 其中男性 34 例; 两组患者年龄及性别差异均无统计学意义 (表 1)。

两组 RCA 开口形状存在统计学差异, 其中有症状组裂隙状开口发生率 (27.6%) 明显多于无症状者 (7.8%)。两组间右冠状动脉在左冠窦的起源位置差异无统计学意义。两组中多数患者的 RCA 起始角小于 45° , 但有症状组患者 RCA 起始角较无症状组更小, 差异有统计学意义。有症状组近段管腔狭窄率大于无症状组, 管腔狭窄长度大于无症状组, 差异均有统计学意义。有症状组 RCA 多数

表 1 有症状组与无症状组患者一般资料及影像特征比较

Table 1 Comparison of general data and imaging features between the symptomatic and asymptomatic groups

项目	组别		统计检验	
	有症状组 ($n = 87$)	无症状组 ($n = 64$)	统计值	P
年龄/(岁, $\bar{x} \pm s$)	57.36 ± 11.98	59.89 ± 11.88	-1.289 ^a	0.199
性别/(例 (%))			0.029 ^b	0.865
男	45 (51.7)	34 (53.1)		
女	42 (48.3)	30 (46.9)		
开口位置/(例 (%))			0.074 ^b	0.786
冠状窦内	47 (54.0)	36 (56.2)		
冠状窦边缘	40 (46.0)	28 (43.8)		
开口形状/(例 (%))			18.680 ^b	< 0.001
圆形	7 (8.0)	20 (31.3)		
椭圆形	56 (64.4)	39 (60.9)		
裂隙状	24 (27.6)	5 (7.8)		
起始角/($^\circ$, $M(Q_1, Q_3)$)	25.03 (19.84, 31.70)	36.17 (31.31, 39.52)	-6.930 ^c	< 0.001
近段管腔狭窄率/(%, $M(Q_1, Q_3)$)	60.8 (47.5, 69.40)	41.5 (32.1, 50.80)	-4.958 ^c	< 0.001
起始段狭窄长度/(mm, $M(Q_1, Q_3)$)	7.54 (0.00, 10.25)	2.86 (0.00, 6.43)	-4.640 ^c	< 0.001
与肺动脉瓣关系/(例 (%))			32.138 ^b	< 0.001
主-肺动脉间型	61 (70.1)	15 (23.4)		
肺动脉下型	26 (29.9)	49 (76.6)		
CT-FFR/ ($\bar{x} \pm s$)	0.94 ± 0.02	0.97 ± 0.01	-8.432 ^c	< 0.001

注: a 表示统计量为 t 值, b 为 χ^2 , c 为 Z 值。

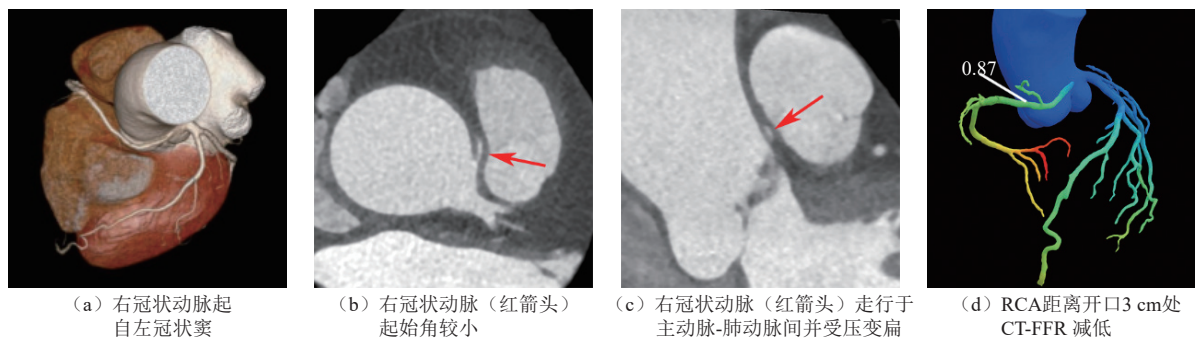


图 1 1例具有胸闷、心悸症状患者的 CCTA 及 CT-FFR 影像

Fig.1 CCTA and CT-FFR images of a patient with dyspnea and palpitations

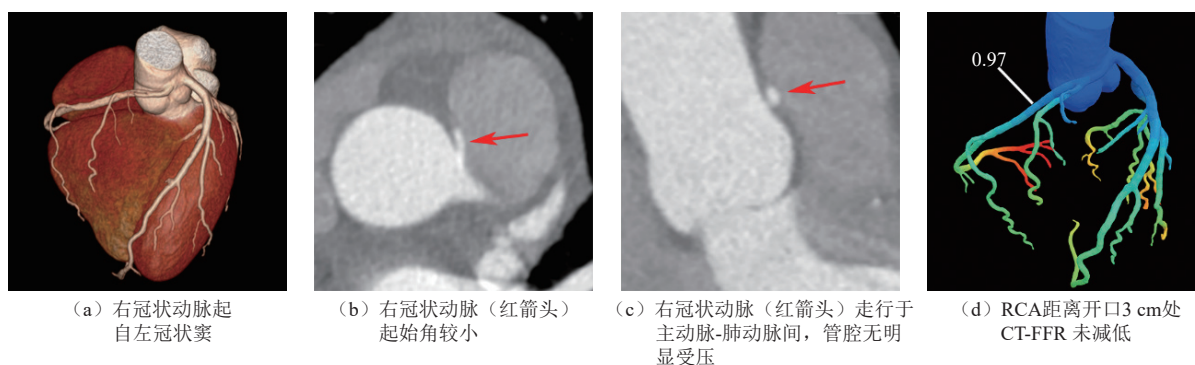


图 2 1例无症状患者的 CCTA 及 CT-FFR 影像

Fig.2 CCTA and CT-FFR images of an asymptomatic patient

走行于主动脉-肺动脉间 (70.1%), 无症状组 RCA 多走行于肺动脉下 (76.6%), 差异有统计学意义。两组间 RCA 距离开口 3cm 处的 CT-FFR 值存在差异, 有症状组 CT-FFR 值小于无症状组, 差异有统计学意义 (图 1 和图 2)。

2.2 影像特征与临床症状的相关性分析

RCA 起始处夹角及距离开口 3cm 处的 CT-FFR 值均与有无临床症状呈中度相关性, RCA 开口形状、近段管腔狭窄率、狭窄段长度及与肺动脉的位置关系均与有无临床症状呈低度相关性 (表 2)。

3 讨论

冠状动脉起源异常是少见的先天性血管畸形, 其病因尚不明确, 可能为胚胎时期冠状动脉异常发育或未能发育完全所致。AORL 是冠状动脉起源异常中相对常见的一种类型, 部分 AORL 可引起心肌缺血, 甚至引发急性心肌梗死或猝死^[6-7]。对该类型变异早期识别、准确评估, 对于选择合理的干预措施具有重要意义, 尤其是对有症状的中青年患者。

与传统有创性冠状动脉造影相比, CCTA 可以从任意角度显示冠状动脉的开口和走行, 无投射角度的限制, 无血管重叠的影响, 强大的图像后处

表 2 AORL 的影像特征与有无临床症状的相关性分析
Table 2 Correlation analysis of AORL imaging features and clinical symptoms

AORL 影像特征	有无临床症状	
	<i>r</i>	<i>P</i>
开口形状	-0.349	< 0.001
起始夹角	0.566	< 0.001
近段管腔狭窄率	0.435	< 0.001
狭窄段长度	-0.364	< 0.001
与肺动脉位置关系	-0.316	< 0.001
CT-FFR	0.594	< 0.001

理重建功能可以提供冠状动脉起源、走行、终止以及与周围组织结构的三维解剖关系等信息。因此, CCTA 对冠状动脉变异的诊断价值高于侵入性冠状动脉造影, 可作为先天性冠状动脉异常检测和分类的首选方法^[8]。

由于冠状动脉开口位于主动脉瓣附近, 收缩期主动脉瓣开放, 冠脉开口部分会被覆盖导致血流量减少, 同时心肌收缩会挤压心肌内穿支血管同样导致血流减少。舒张期主动脉瓣关闭, 冠脉开口会有更多血液进入冠状动脉, 因此冠状动脉供血及血流动力学改变主要取决于心脏舒张期。

本研究中对两组病例 CT 解剖特征观察及测量、CT-FFR 的测量均在舒张期进行。研究显示, 右冠状动脉裂隙状开口、小的起始角、近段管腔狭窄、狭窄段长度及大动脉间走行是引起临床症状的解剖特征, 与既往研究相似^[5]。同时, RCA 起始处夹角与有无临床症状呈中度相关性, RCA 开口形状、近段管腔狭窄率、狭窄段长度及与肺动脉的位置关系均与有无临床症状呈低度相关性。

国外学者在一组冠脉变异病例随访中发现右冠状动脉裂隙状开口及近段肺动脉-主动脉间走行患者发生心脏不良事件及经皮冠状动脉介入治疗的概率明显增加^[4]。本研究也证实了裂隙状开口、肺动脉-主动脉间型发生心肌缺血症状的相关性更高。当右冠状动脉走行于主动脉与肺动脉之间时, 由于血管搏动挤压使冠状动脉管腔狭窄、痉挛, 从而减少心肌灌注, 从而导致心肌梗死及恶性心律失常的发生^[9-10]。

急性起始角定义为起始角度小于 45°, 由于右冠状动脉开口于左冠窦, 右冠状动脉发出后必须紧贴主动脉向后走行才可以到达至右房室区, 这种解剖特征必然导致起始角较小。本研究中两组病例起始角大多数小于 45°, 然而比较两组起始角发现有症状组起始角明显小于无症状组, 这可能与开口角度越小, 血流直接冲击血管壁导致血流紊乱、压力衰减大有关。冠状动脉起始处走行于主动脉中膜内时, 称为壁内段走行, 其开口呈裂隙状并夹角极小, 更容易发生临床症状, 在本次研究样本中仅有症状组患者中发现 2 例。

本研究发现 RCA 在于冠窦处的开口位置在两组间无统计学差异, 与吴启源等^[11]研究结果一致, 冠状动脉高位开口是一种良性解剖变异, 不会导致心肌缺血。

CT-FFR 是基于 CCTA 影像数据模拟计算 FFR 的无创性技术, 可以反应病变功能性缺血信息, 其对冠状动脉缺血特异性的评估优于传统 CCTA^[12-13], 对指导临床治疗更有价值^[13]。本研究结果显示有症状组 CT-FFR 小于无症状组, 且 CT-FFR 值与有无临床症状呈中度相关性 ($r = 0.594$)。

对于斑块所致管腔狭窄的患者, 国内外学者通过研究将 CT-FFR ≤ 0.8 定为心肌缺血阳性指标^[14-15]。然而, 本研究中有症状组与无症状组 RCA 距离开口 3 cm 处 CT-FFR 分别为 (0.94 ± 0.02)、(0.97 ± 0.01), 所有患者 CT-FFR 均大于 0.8, 与 Ferrag 等^[3]采用 HeartFlow 公司 FFR 软件测量的结果不符。这

可能与我们采用的是人工智能 FFR 软件有关^[15], 前者是基于计算流体力学的全阶 CT-FFR, 以冠状动脉三维模型为基础, 采用 CFD、工程学等技术, 在 CT 影像数据上模拟心脏血流压力及血流速度, 求解 Navier-Stokes 方程得到; 后者是基于深度学习的 CT-FFR, 使用预先训练好的离线深度学习算法在线计算 CT-FFR, 两者的技术原理存在差异。同时对于左右冠异常起源病例, 软件有时无法自动识别开口位置, 需要手动修正, 这也可能导致了测量数据的偏差。因此, 在异常起源患者中的 CT-FFR 测量方法、参考值的选择仍需要进一步研究。

本研究局限性。① 本研究为单中心研究, 且排除了部分存在冠状动脉粥样硬化所致管腔狭窄的 AORL 患者, 结果可能存在偏倚, 需要大样本、多中心研究进行验证; ② 因目前技术限制, 本研究仅采用的基于人工智能的 CT-FFR, 未能与基于流体力学的 CT-FFR 或侵入性 FFR 进行对照。

综上所述, CCTA 能够清晰显示 AORL 的高危解剖特征, 裂隙状开口、壁内段走行、小的起始角、大动脉间走行的存在更容易发生心血管临床症状。CT-FFR 改变可能与心血管症状发生相关, 但其在 AORL 测量方法、参考值的选择仍有待进一步研究。

参考文献

- [1] KIM S Y, SEO J B, DO K H, et al. Coronary artery anomalies: Classification and ECG-gated multi-detector row CT findings with angiographic correlation[J]. *Radiographics*, 2006, 26(2): 317-334. DOI:10.1148/rg.262055068.
- [2] PANNU H K, FLOHR T G, CORL F M, et al. Current concepts in multi-detector row CT evaluation of the coronary arteries: Principles, techniques, and anatomy[J]. *Radiographics*, 2003, 23: S111-125. DOI:10.1148/rg.23si035514.
- [3] FERRAG W, SCALBERT F, ADJEDJ J, et al. Role of FFR-CT for the evaluation of patients with anomalous aortic origin of coronary artery[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2021, 14(5): 1074-1076. DOI:10.1016/j.jcmg.2020.10.003.
- [4] CHAOSUWANNAKIT N, MAKARAWATE P. Diagnosis and prognostic significance of anomalous origin of coronary artery from the opposite sinus of Valsalva assess by dual-source coronary computed tomography angiography[J]. *International Journal of Cardiology: Heart & Vasculature*, 2021, 32: 100723. DOI:10.1016/j.ijcha.2021.100723.
- [5] GRANI C, BUECHEL R R, KAUFMANN P A, et al. Multimodality imaging in individuals with anomalous

- coronary arteries[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2017, 10(4): 471-481. DOI:10.1016/j.jcmg.2017.02.004.
- [6] TOMANEK R, ANGELINI P. Embryology of coronary arteries and anatomy/pathophysiology of coronary anomalies: A comprehensive update[J]. *International Journal of Cardiology*, 2019, 281: 28-34. DOI:10.1016/j.ijcard.2018.11.135.
- [7] YESILYURT H, AKSU U, KALKAN K, et al. The prevalence of coronary artery anomalies with coronary computed tomography[J]. *Turkish Journal of Medical Sciences*, 2017, 47(1): 188-193. DOI:10.3906/sag-1602-87.
- [8] CHEEZUM M K, GHOSHHAJRA B, BITTENCOURT M S, et al. Anomalous origin of the coronary artery arising from the opposite sinus: Prevalence and outcomes in patients undergoing coronary CTA[J]. *European Heart Journal. Cardiovascular Imaging*, 2017, 18(2): 224-235. DOI:10.1093/ehjci/jev323.
- [9] 戴沁怡, 吕飙, 张兆琪. 多层螺旋 CT 血管成像诊断“恶性”冠状动脉畸形[J]. *心肺血管病杂志*, 2012, 31(1): 50-53, 67. DOI:10.3969/j.issn.1007-5062.2012.01.016.
- DAI Q Y, LV B, ZHANG Z Q. “Malignant” coronary artery anomalies detected by MDCT angiography[J]. *Journal of Cardiovascular and Pulmonary Diseases*, 2012, 31(1): 50-53, 67. DOI:10.3969/j.issn.1007-5062.2012.01.016. (in Chinese).
- [10] 张龙江, 卢光明, 黄伟, 等. 动脉间型右冠状动脉起自左冠状窦的双源 CT 动态评价研究[J]. *中华放射学杂志*, 2009, 43(9): 938-941. DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2009.09.011.
- ZHANG L J, LU G M, HUANG W, et al. Anomalous origin of the right coronary artery from the left coronary sinus of valsalva with an interarterial course: Dual-source CT evaluation[J]. *Chinese Journal of Radiology*, 2009, 43(9): 938-941. DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2009.09.011. (in Chinese).
- [11] 吴启源, 周华, 王伟, 等. 不同左冠状动脉开口对心肌血运的影响[J]. *心脏杂志*, 2021, 33(2): 182-185. DOI:10.12125/j.chj.202012029.
- WU Q Y, ZHOU H, WANG W, et al. Correlation between high opening of left coronary artery and distribution of left coronary artery plaque and myocardial ischemia caused by stenosis[J]. *Chinese Heart Journal*, 2021, 33(2): 182-185. DOI:10.12125/j.chj.202012029. (in Chinese).
- [12] 张闰秋, 张龙江. 冠状动脉 CT 血流储备分数研究新进展[J]. *中华内科杂志*, 2023, 62(11): 1364-1368. DOI:10.3760/cma.j.cn112138-20221130-00895.
- ZHANG R Q, ZHANG L J. The progress of CT derived fractional flow reserve[J]. *Chinese Journal of Internal Medicine*, 2023, 62(11): 1364-1368. DOI:10.3760/cma.j.cn112138-20221130-00895. (in Chinese).
- [13] di JIANG M, ZHANG X L, LIU H, et al. The effect of coronary calcification on diagnostic performance of machine learning-based CT-FFR: A Chinese multicenter study[J]. *European Radiology*, 2021, 31(3): 1482-1493. DOI:10.1007/s00330-020-07261-2.
- [14] FOY A J, DHRUVA S S, PETERSON B, et al. Coronary computed tomography angiography vs. functional stress testing for patients with suspected coronary artery disease: A systematic review and meta-analysis[J]. *JAMA Internal Medicine*, 2017, 177(11): 1623-1631. DOI:10.1001/jamainternmed.2017.4772.
- [15] 中华医学会放射学分会心胸学组, 中国医师协会放射医师分会心血管学组, 北京医学会放射学分会心血管学组. CT 血流储备分数操作规范及临床应用中国专家共识[J]. *中华放射学杂志*, 2023, 57(7): 711-722. DOI:10.3760/cma.j.cn112149-20221215-01005.