

基于 CCTA 的血管周围脂肪衰减指数 对冠状动脉慢性全闭塞病变再通的预测价值

杨宝珠¹, 黄书苑¹, 于鑫鑫¹, 邓艳², 韩鹏熙³, 刘晓龙⁴, 王锡明¹

(1. 山东第一医科大学附属省立医院影像科, 山东 济南 250021; 2. 山东大学齐鲁医院放射科, 山东 济南 250012; 3. 山东第一医科大学附属第一医院放射科, 山东 济南 250014; 4. 济宁医学院附属医院影像科, 山东 济宁 272029)

摘要:目的 探究基于冠状动脉 CT 血管成像(coronary computed tomography angiography, CCTA)的冠状动脉周围脂肪衰减指数(fat attenuation index, FAI)对冠状动脉慢性全闭塞病变(chronic total occlusion, CTO)再通的预测价值。方法 回顾性分析 2012 年 11 月至 2023 年 6 月期间行 CCTA 检查并接受经皮冠状动脉介入(percutaneous coronary intervention, PCI)治疗的冠状动脉完全闭塞患者($n=204$)的临床资料,根据手术结果分为成功组($n=144$)与失败组($n=60$)。记录并分析两组患者的临床资料,闭塞段血管 FAI, CTO 病变的 CCTA 形态特征,包括病变部位[右冠状动脉(right coronary artery, RCA)、左前降支(left anterior descending artery, LAD)、左回旋支(left circumflex artery, LCX)]、病变长度、病变 CT 值、病变钙化斑块的体积、病变入口处的残端形态、病变弯曲角度是否 $>45^\circ$ 、病变是否为负性重构,并进行两组间比较。通过多因素 Logistic 回归分析筛选影响 CTO 病变再通的独立因素,并分别建立传统形态学特征模型及联合形态学特征和 FAI 的联合模型。通过受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线评价各模型的预测性能。结果 两组间闭塞段 FAI [-82.33 ± 10.61] HU vs. [-71.70 ± 10.91] HU, $P < 0.001$]、闭塞段 CT 值 [$69.85 (55.95, 86.25)$] HU vs. [$58.25 (47.00, 72.83)$] HU, $P < 0.001$]、闭塞段血管的钙化体积 [$20.92 (2.25, 52.80)$] mm^3 vs. [$5.69 (0.00, 25.75)$] mm^3 , $P < 0.001$]、闭塞段长度 [$23.60 (13.90, 34.50)$] mm vs. [$14.65 (9.43, 19.60)$] mm, $P < 0.001$] 等差异均有统计学意义;其中,闭塞段长度 >23.05 mm、闭塞段 FAI <-77.50 HU、闭塞段 CT 值 >58.15 HU 及闭塞血管负性重构是 CTO 病变再通失败的独立预测因素,将以上三种形态学特征因素建立传统形态学特征模型,传统形态学特征模型联合闭塞段 FAI 建立联合模型。联合模型的预测价值优于传统形态学特征模型的预测价值, AUC 分别为 0.857、0.787, $P < 0.001$ 。结论 FAI 可以作为预测冠状动脉慢性全闭塞病变 PCI 手术结果的一个新的预测指标;在传统的影像学特征基础上,FAI 能为 CTO 患者手术结果的预测提供新的增量价值。

关键词: 冠状动脉 CT 血管成像; 冠状动脉周围脂肪; 脂肪衰减指数; 慢性全闭塞病变; 经皮冠状动脉介入

中图分类号: R543

文献标志码: A

Predictive value of perivascular fat attenuation index based on CCTA for revascularization in chronic total occlusion of coronary artery

YANG Baozhu¹, HUANG Shuyuan¹, YU Xinxin¹, DENG Yan², HAN Pengxi³,
LIU Xiaolong⁴, WANG Ximing¹

(1. Department of Radiology, Shandong Provincial Hospital Affiliated to Shandong First Medical University, Jinan 250021, Shandong, China; 2. Department of Radiology, Qilu Hospital of Shandong University, Jinan 250012, Shandong, China; 3. Department of Radiology, The First Affiliated Hospital of Shandong First Medical University, Jinan 250014, Shandong, China; 4. Department of Medical Imaging, Affiliated Hospital of Jining Medical University, Jining 272029, Shandong, China)

Abstract: Objective To evaluate the predictive value of the perivascular fat attenuation index (FAI) based on coronary computed tomography angiography (CCTA) for revascularization in chronic total occlusion (CTO) of coronary artery. **Methods** A total of 204 patients with coronary artery total occlusion and treated with percutaneous coronary intervention (PCI) between November 2012 and June 2023 were retrospectively analyzed and divided into the successful group ($n=144$) and the unsuccessful group ($n=60$) according to the outcome of the procedure. The general clinical data, FAI of the occluded segment, and the morphological characteristics of CCTA of CTO lesions, including lesion site [right coronary artery (RCA), left anterior descending artery (LAD), left circumflex artery (LCX)], lesion length, lesion CT value, the volume of calcified plaques in the lesion, the stump morphology of the lesion entrance, whether the angle of curvature of the lesion was $>45^\circ$, and whether the lesion was negatively remodeled, were analyzed and compared between the two groups. Independent factors affecting the revascularization of CTO lesion were screened by binary Logistic regression analysis, and a conventional model of morphological characteristics and a combined model of morphological characteristics and FAI were established. The predictive performance of each model was evaluated by the receiver operating characteristic (ROC) curve. **Results** The differences in FAI [(-82.33 ± 10.61) HU vs. (-71.70 ± 10.91) HU, $P < 0.001$], CT value [$69.85(55.95, 86.25)$ HU vs. $58.25(47.00, 72.83)$ HU, $P < 0.001$], calcified volume [$20.92(2.25, 52.80)$ mm³ vs. $5.69(0.00, 25.75)$ mm³, $P < 0.001$], and length [$23.60(13.90, 34.50)$ mm vs. $14.65(9.43, 19.60)$ mm, $P < 0.001$] of the occluded segment were all statistically significant. The occluded segment length >23.05 mm, FAI of the occluded segment <-77.50 HU, CT value of the occluded segment >58.15 HU, and negative remodeling of the occluded vessel were identified as independent predictors of failure of CTO lesion revascularization. A conventional morphological characteristics model was established by combining the three morphological characteristics factors, and another model was established by combining the conventional morphological characteristics model with FAI. The combined model demonstrated superior predictive performance for the outcome of revascularization compared to the conventional morphological characteristics model, with AUC being 0.857 and 0.787, respectively, $P < 0.001$. **Conclusion** The FAI may serve as a novel predictor of the outcomes of PCI surgery for CTO of the coronary artery. Based on the conventional morphological characteristics, FAI provides a novel approach to predicting the surgical outcomes of CTO patients. **Key words:** Coronary computed tomography angiography; Pericoronary adipose tissue; Fat attenuation index; Chronic total occlusion; Percutaneous coronary intervention

冠状动脉慢性全闭塞病变(chronic total occlusion, CTO)是指冠状动脉完全闭塞,并且心肌梗死溶栓试验(thrombolysis in myocardial infarction, TIMI)血流0级持续时间至少3个月的病变^[1]。尽管经皮冠状动脉介入(percutaneous coronary intervention, PCI)治疗技术发展迅速,但由于CTO病变的解剖复杂、手术失败率高、术后并发症多且较易再次闭塞,其仍被认为是目前PCI领域中的“最后堡垒”^[2]。术前通过无创影像学来评估CTO PCI再通的成功率,对于避免患者行额外的有创治疗、改善患者的预后具有重要价值^[3-4]。但是,既往的影像学评估大多基于一些传统形态学特征,如闭塞长度、闭塞段入口形态、钙化等^[5-9]。

冠状动脉周围脂肪组织(pericoronary adipose tissue, PCAT)在冠状动脉斑块和血管炎症的发生发展中起着重要作用^[10-11]。既往研究表明,PCAT可以识别易损斑块及预测斑块进展,并预测不良心血管事件^[12-13]。PCAT的定量评估可以通过一种基于CT的无创影像学指标即血管周围脂肪衰减指数(fat attenuation index, FAI)实现。FAI可以对冠状

动脉炎症进行量化评估,当冠状动脉发生炎症时,相应病变段FAI会升高^[14]。CTO病变周围的炎症反应以及斑块成分会因闭塞时间的长短而不同^[15]。CTO PCI是否再通或与病变周围的炎症浸润和斑块的稳定性及成分相关,但目前FAI与传统影像学特征结合用于CTO病变是否再通的预测价值尚不清楚。因此,本研究在传统形态学的基础上引入闭塞段FAI和闭塞段CT值,旨在评价其是否能为CTO PCI再通的预测提供新的增量价值,从而更加精准地预测PCI治疗的难易程度,确定可能获益于PCI的CTO患者人群,优化CTO PCI治疗策略,提高手术成功率。

1 资料与方法

1.1 资料

回顾性分析2012年11月至2023年6月于山东第一医科大学附属省立医院、山东大学齐鲁医院、山东第一医科大学第一附属医院、济宁医学院附属医院行CCTA检查并接受PCI治疗的冠状动脉完

全闭塞的患者 204 例,其中 PCI 成功的为成功组 ($n=144$),PCI 失败的为失败组 ($n=60$)。诊断标准:冠状动脉造影证实冠脉动脉管腔完全闭塞(狭窄程度 100%),远端 TIMI 血流 0 级且持续时间至少 3 个月。纳入标准:①经冠状动脉造影证实存在 CTO 病变;②接受 CCTA 检查后 1 个月内尝试进行 PCI 手术。排除标准:①存在冠状动脉完全闭塞但 3 个月内出现急性心肌梗死的患者;②有冠状动脉搭桥手术史;③支架内闭塞;④CCTA 图像伪影重、质量差。本研究经山东第一医科大学附属省立医院伦理委员会批准[省医伦批第(SWYX:NO. 2024-355)],患者知情同意被豁免。

1.2 方法

1.2.1 CCTA 检查

检查设备为 Siemens Somatom Force 双源 CT、Somatom Defi 双源 CT、GE Revolution CT 等,扫描前所有患者均进行屏气训练并在舌下喷硝酸甘油(山东京卫制药有限公司)。扫描参数如下:管电压 100~120 kV,自动调控技术调控管电流。图像重建层厚:0.75 mm,层间距 0.5 mm,卷积核 Bv40。以 3.5~5.5 mL/s 流率注射非离子型碘海醇对比剂(350 mgI/mL, 30.0~55.0 mL)(北京北陆药业股份有限公司)。使用对比剂示踪技术,在达到主动脉根部触发阈值 100 HU 后,延迟 5 s 后开始扫描,心电门控技术的选择(前瞻性或回顾性心电门控)由患者的心率和呼吸情况决定。扫描完成后所有图像传至后处理工作站进行图像分析。

1.2.2 CCTA 形态学参数评估

在 Syngo Via 后处理工作站上进行 CCTA 形态学参数评估,分析以下特点:病变部位[右冠状动脉(right coronary artery, RCA)、左前降支(left anterior descending artery, LAD)、左回旋支(left circumflex artery, LCX)],病变长度,病变 CT 值,病变钙化斑块的体积,病变入口处的残端形态(钝形/尖形),病变弯曲角度是否 $>45^\circ$,病变是否为负性重构。病变 CT 值即分别测量病变段的三个感兴趣区的 CT 值,并取平均值;病变负性重构指闭塞血管直径及相邻正常血管直径的比值 <1 ^[16]。所有测量均由两名具有 5 年以上心血管影像学诊断经验的影像科医师评估,在未被告知患者临床信息及以往检查结果的情况下,采用盲法评估,并独立完成 CTO 病变的诊断及分析,若意见不一致,商议后决定最终结果。

1.2.3 FAI 测量

利用数坤 FAI 测量系统(数坤科技,中国北京)进行闭塞段血管 FAI 测量,见图 1。血管周围 FAI 的径向测量范围为血管外壁向外扩张的直径^[13]。纵向测量范围为闭塞段的长度。根据 CTO 病变的近端和远端自定义纵向测量范围的起点和终点,设置 PCAT 密度范围为 $-190\sim-30$ HU^[17],通过软件计算闭塞段血管周围的 FAI 值。所有测量均由两名具有 5 年以上心血管影像学诊断经验的影像科医师评估。在未被告知患者临床信息及以往检查结果的情况下,采用盲法评估,并独立完成 FAI 的测量,若意见不一致,商议后决定最终结果。

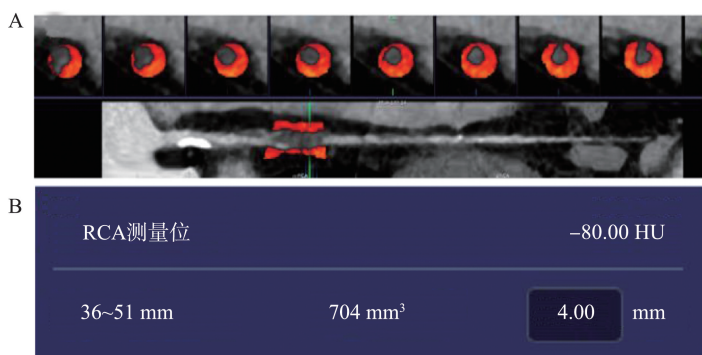


图 1 FAI 测量示意图

A: 被测血管的轴位及曲面重组图像; B: 测得闭塞段血管 FAI 值为 -80.00 HU。

Figure 1 FAI measurement diagram

A: Transverse section and multiplanar reconstruction of the measured vessel; B: FAI value of occluded segment vessel was measured as -80.00 HU.

1.3 统计学处理

采用 SPSS 27.0 统计软件。对数据进行正态性检验,对于符合正态分布的计量资料,采用 $\bar{x} \pm s$

的形式描述,并使用独立样本 t 检验比较两组间的差异;不符合正态分布的计数资料,则采用 M (P_{25}, P_{75}) 描述,采用 Mann-Whitney U 检验比较

两组间的差异。计数资料采用例数和百分比表示,组间比较采用 χ^2 检验。将具有统计学意义的因素纳入二元 Logistic 回归分析,分析影响 CTO 病变 PCI 是否再通的独立预测因子。采用受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线计算血管闭塞长度、闭塞段 FAI、闭塞段血管 CT 值在 CTO 患者成功组和失败组之间的临界值,并绘制单一指标及传统形态学特征模型和联合模型的 ROC。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义(双尾)。

表1 成功组和失败组患者临床基线资料结果比较/ n (%), $M(P_{25}, P_{75})$

Table 1 Comparison of clinical baseline data between the successful group and unsuccessful group/ n (%), $M(P_{25}, P_{75})$

测量指标	失败组($n=60$)	成功组($n=144$)	χ^2/Z	P
男性	51(85.00)	110(76.39)	1.888	0.169
年龄/岁	60(55,69)	64(54,69)	-0.568	0.570
高血压	43(71.67)	96(66.67)	0.488	0.485
糖尿病	22(36.67)	54(37.50)	0.013	0.911
高血脂	18(30.00)	41(28.47)	0.048	0.826
吸烟史	35(58.33)	60(41.67)	4.728	0.030
既往心肌梗死	13(21.67)	34(23.61)	0.090	0.764
既往 CTO 病变 PCI 失败	5(8.33)	9(6.25)	0.054	0.816
BMI	25.00(23.63,27.70)	24.60(23.10,27.70)	-1.721	0.085
LDL-C/(mmol/L)	2.14(1.76,2.70)	2.34(1.96,2.93)	-1.238	0.216
HDL-C/(mmol/L)	1.12(1.05,1.35)	1.09(0.97,1.34)	-0.793	0.428
TG/(mmol/L)	1.51(1.07,1.84)	1.23(0.96,1.90)	-1.116	0.265
TC/(mmol/L)	3.64(3.19,4.27)	3.61(3.21,4.22)	-0.324	0.746
LVEF/%	60.0(60.0,61.50)	60.0(58.0,62.0)	-0.386	0.699
HbA1c/(mmol/L)	6.20(5.90,6.68)	6.10(5.70,6.70)	-0.007	0.995

2.2 两组 CCTA 参数及 FAI 统计结果比较

失败组闭塞段 FAI 明显低于成功组,而闭塞段 CT 值、闭塞段血管的钙化体积、闭塞段长度、闭塞血管负性重构的患者比例等均明显高于成功组,差

2 结果

2.1 两组临床资料统计结果比较

失败组中有吸烟史的患者比例明显高于成功组,差异有统计学意义($P=0.030$)。而两组的性别、年龄、高血压、糖尿病、高血脂、既往心肌梗死、既往 CTO 病变 PCI 失败、BMI 等特征差异均无统计学意义(P 均 >0.05)。见表 1。

异有统计学意义(P 均 <0.05)。两组患者的 CTO 位置、入口钝性残端差异无统计学意义(P 均 >0.05)。见表 2、图 2~3。

表2 成功组和失败组 CCTA 参数及 FAI 统计结果比较/ n (%), $M(P_{25}, P_{75})$, $\bar{x}\pm s$

Table 2 Comparison of CCTA characteristics and FAI data between the successful group and unsuccessful group/ n (%), $M(P_{25}, P_{75})$, $\bar{x}\pm s$

测量指标	失败组($n=60$)	成功组($n=144$)	χ^2/Z	P
CTO 位置			4.823	0.090
RCA	34(56.67)	62(43.06)		
LAD	20(33.33)	51(35.42)		
LCX	6(10.00)	31(21.53)		
闭塞段 FAI/HU	-82.33 \pm 10.61	-71.70 \pm 10.91	-6.393	<0.001
闭塞段 CT 值/HU	69.85(55.95,86.25)	58.25(47.00,72.83)	-3.482	<0.001
钙化体积/ mm^3	20.92(2.25,52.80)	5.69(0.00,25.75)	-3.298	<0.001
闭塞段长度/mm	23.60(13.90,34.50)	14.65(9.43,19.60)	-4.022	<0.001
弯曲 $>45^\circ$	14(23.33)	16(11.11)	5.044	0.025
闭塞血管负性重构	22(36.67)	30(20.83)	5.590	0.018
钝性残端	32(53.33)	65(45.14)	1.140	0.286

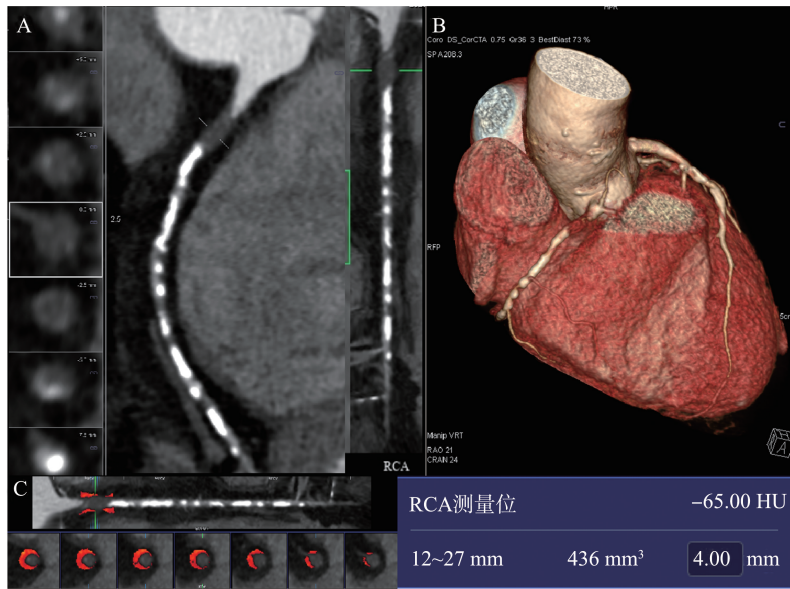


图2 成功组男性患者,73岁,CCTA示CTO位置在RCA近端

A: 所测血管的轴位及曲面重组图; B: 所测血管容积再现图; C: 测得闭塞段FAI为-65.00 HU。

Figure 2 CCTA indicated that the CTO position was near the RCA for a 73-year-old male patient in the successful group

A: Transverse section and multiplanar reconstruction of the vessel; B: Volume rendering of the vessel; C: The FAI of the occluded segment vessel was measured as -65.00 HU.

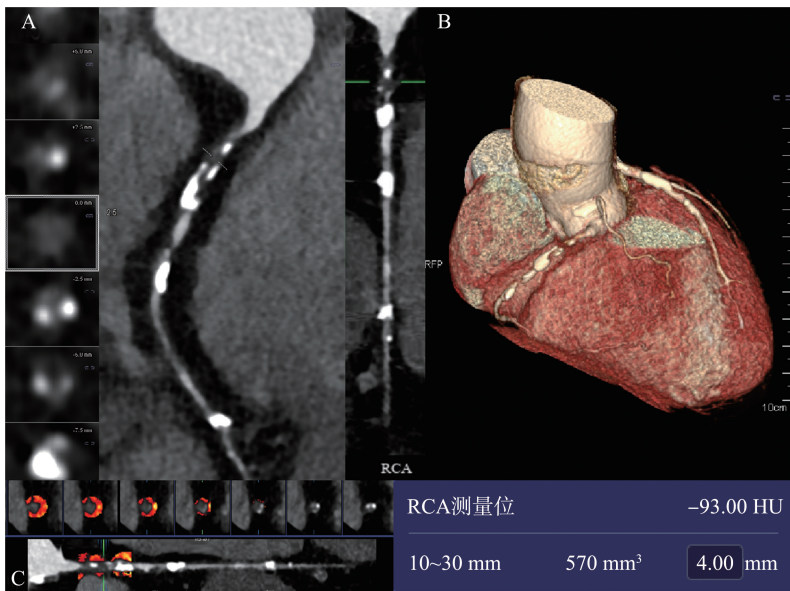


图3 失败组男性患者,71岁,CCTA示CTO位置在RCA近端

A: 所测血管的轴位及曲面重组图; B: 所测血管容积再现图; C: 测得闭塞段FAI为-93.00 HU。

Figure 3 CCTA indicated that the CTO position was near the RCA for a 71-year-old male patient in the unsuccessful group

A: Transverse section and multiplanar reconstruction of the vessel; B: Volume rendering of the vessel; C: The FAI of the occluded segment vessel was measured as -93.00 HU.

2.3 两种预测模型的建立及评价

将上述所有单变量分析中差异有统计学意义的参数纳入二元多因素 Logistic 回归分析。结果显示,闭塞段长度($OR = 1.055, 95\% CI: 1.022 \sim 1.089, P < 0.001$)、闭塞段 FAI($OR = 0.912, 95\% CI: 0.879 \sim 0.946, P < 0.001$)、闭塞段 CT 值($OR = 1.034, 95\% CI: 1.014 \sim 1.054, P < 0.001$)、负性重构($OR = 2.551, 95\% CI: 1.090 \sim 5.971, P = 0.031$)为 CTO PCI

治疗是否再通的独立预测因子。见表3。

表3 多因素 Logistic 回归分析
Table 3 Multivariate Logistic regression analyses

影响因素	OR	95% CI	P
闭塞段长度	1.055	1.022~1.089	<0.001
闭塞段 FAI	0.912	0.879~0.946	<0.001
闭塞段 CT 值	1.034	1.014~1.054	<0.001
负性重构	2.551	1.090~5.971	0.031

将表 3 多因素分析中有统计学意义的参数(闭塞段长度、闭塞段血管 FAI、闭塞段 CT 值以及负性重构)纳入预测模型。传统形态学特征模型为闭塞段长度、闭塞段 CT 值及负性重构,联合模型为传统形态学模型联合闭塞段血管 FAI。ROC 曲线分析显示,联合模型的预测效能优于传统形态学特征模型的预测效能,其预测 CTO 介入结果的 AUC 分别为 0.857、0.787 ($P < 0.001$),灵敏度分别为 81.7%、73.3%,特异度分别为 76.4%、75.7%,见图 4。ROC 分析结果显示,闭塞长度的最佳临界值为 23.05 mm,闭塞段 FAI 的临界值为 -77.50 HU,闭塞段血管 CT 值的最佳临界值是 58.15 HU,见图 5。

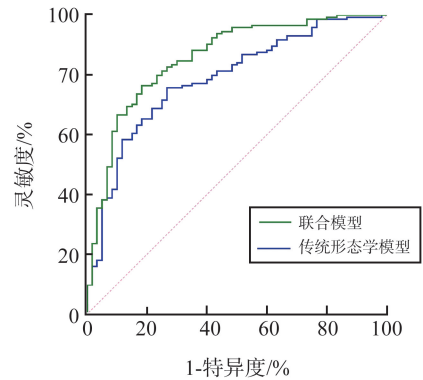


图 4 两种模型预测 CTO 介入结果的 ROC 曲线图
Figure 4 ROC curves of the two models for predicting the outcome of CTO intervention

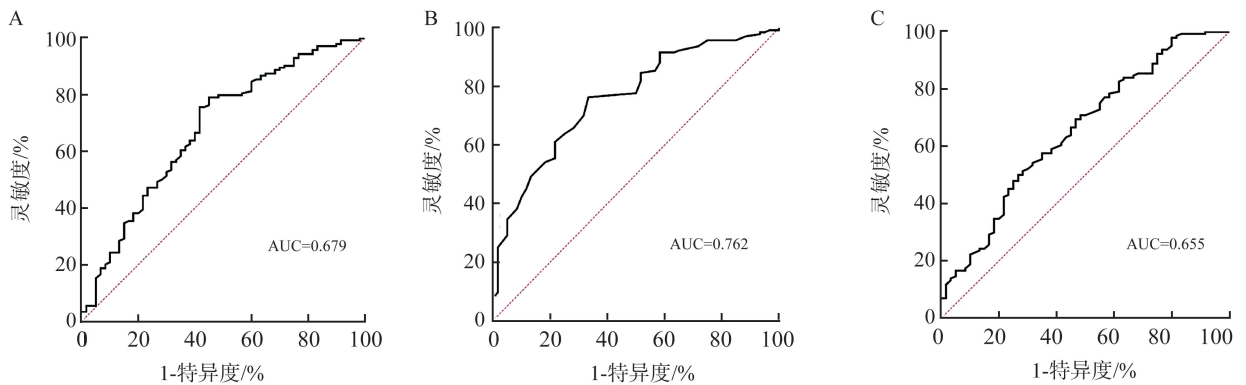


图 5 ROC 分析闭塞长度(A)、闭塞段 FAI(B)及闭塞段血管 CT 值(C)的最佳截断值
Figure 5 Best cut-off values of occlusion length (A), FAI (B) and CT value (C) by ROC analysis

3 讨论

CTO 病变解剖结构复杂,PCI 操作难度大,手术失败率高,是 PCI 领域中最难攻克的壁垒^[2]。术前利用无创影像学对 CTO PCI 再通的成功率进行精准评估对于减少患者接受不必要的有创治疗、优化治疗策略以及改善患者预后具有至关重要的作用^[3-4]。本研究通过分析 CCTA 传统形态学特征和闭塞段 FAI,发现闭塞段长度 >23.05 mm、闭塞段 FAI <-77.50 HU、闭塞段 CT 值 >58.15 HU 及闭塞血管负性重构是 CTO 病变再通失败的独立预测因素,联合模型的预测效能优于传统形态学特征模型的预测效能,其预测 CTO 介入结果的 AUC 分别为 0.857、0.787。闭塞段 FAI 预测 CTO 患者 PCI 手术是否再通的预测价值更高,能为 CTO 患者手术结果的预测提供新的增量价值。

既往研究表明,影响 CTO 是否再通的传统影像学特征包括闭塞段长度、闭塞段入口形态、闭塞段弯曲、严重钙化以及负性重构等^[6-9]。J-CTO 评分系统^[18]及 CL 评分系统^[19]中均以闭塞血管长度

≥ 20 mm 作为 CTO PCI 开通失败的独立危险因素。本研究中通过 ROC 曲线得出,闭塞血管长度的临界值是 23.05 mm,这可能与病例对象不同、各个研究存在异质性,介入方法和介入设备的不断更新和发展有关。本研究发现,闭塞血管负性重构是 CTO PCI 开通失败的独立危险因素,与 Luo 等^[16]研究结果一致,考虑原因为:负性重构发生在 CTO 病变的晚期,当闭塞血管出现负性重构,通常说明闭塞血管的时间较长,此时管腔富含致密的胶原蛋白或钙化,血管腔坚硬,使导丝难以通过。本研究首次将闭塞段 CT 值引入 CTO 病变是否再通的预测中,测量了 CTO 病变非钙化斑块处的 CT 值,结果显示,闭塞段 CT 值是 CTO 病变是否再通的独立预测因子,失败组的闭塞段 CT 值显著高于成功组,原因考虑为:CT 值可区分斑块的性质,CT 值 131~350 HU 为纤维斑块,CT 值 31~130 HU 为纤维脂质斑块,而 CT 值 $-30 \sim 30$ HU 为坏死核心^[20]。病理研究证实,较早期的 CTO 病变以坏死核心为主,这使得导丝易于通过,对应其 CT 值也较低;而长病程 CTO 病变以纤维斑块和钙化成分为主^[15],其 CT 值相对较高,增加了导丝通过病变的难度。Wang 等^[21]研究得

出,高密度斑块(纤维成分加钙化成分)体积 $\geq 19.9 \text{ mm}^3$ 是导丝穿越闭塞病变的独立预测因子。如果闭塞的血管严重钙化,导丝常难以通过,需要选择较硬的导丝进行 PCI 开通。本研究对闭塞血管钙化的评估采用定量指标,测量了两组患者闭塞段血管钙化斑块的体积,结果显示,失败组患者钙化斑块的体积高于成功组,差异有统计学意义,但多因素 Logistics 回归分析显示,其并不是 CTO 患者 PCI 手术失败的独立危险因素,这可能与本研究中闭塞段出现钙化的样本量较少有关。大多数研究^[5-6,18-19]证明,闭塞段入口形态是影响 CTO PCI 手术成功的独立预测因素,入口形态为钝性不利于导丝着力,但是本研究中两组患者的入口形态相比较,差异并不显著,可能是因为术者提前明确了闭塞段入口的形态学特征,对钝性残端入口的患者选择了 PCI 之外的其他治疗方式。

既往对 PCAT 的研究主要围绕斑块的发生发展,PCAT 不仅可以反映冠状动脉炎症,而且与斑块稳定性和斑块成分有关。Sugiyama 等^[14]的研究表明,高的 PCAT 衰减可能反映了更高水平的血管炎症水平,即 FAI 值越高,表明炎症水平越高,且其较 C 反应蛋白水平的预测性能高。Sagris 等^[22]的 Meta 分析结果显示,不稳定斑块周围的 FAI 高于稳定斑块周围。本研究将 FAI 引入对 CTO 病变是否再通的预测中,通过比较成功组与失败组之间闭塞病变 FAI 的差异,得出 PCI 手术失败组的闭塞段血管 FAI 值明显低于成功组,闭塞段 FAI 值 $< -77.50 \text{ HU}$ 为 CTO PCI 治疗失败的独立预测因子,这与 Xi 等^[23]的研究得出的截断值相似,且联合模型的预测性能优于传统形态学模型的预测效果。既往研究表明,PCAT 可以与邻近血管壁相互作用^[24]。生理状态下,PCAT 释放舒张血管和抗氧化的细胞因子,与炎症因子保持平衡,保护血管;当血管受损或 PCAT 代谢紊乱时,PCAT 释放的炎性细胞因子增加,通过旁分泌作用,促进斑块形成和血管炎症的发生。同时,炎症血管壁也可以影响 PCAT,其释放的炎性因子抑制 PCAT 脂肪细胞分化,增加微血管通透性,导致炎症血管周围 PCAT 成分变化,水/脂比例上升^[17,25]。如上所述,PCAT 的炎性改变作用于血管壁,会加剧冠状动脉斑块的进展并降低其稳定性。FAI 作为定量评估 PCAT 的无创影像学指标,不仅可以评估冠状动脉炎症,还能识别易损斑块^[12]。病理研究表明,较早期的 CTO 病变含脂质核心、坏死、巨噬细胞和疏松纤维组织较多,所以导丝通过闭塞段较容易,此时血管壁炎症水平较高,通过旁分泌机

制抑制了 PCAT 的合成,因此 PCAT 密度较高,病变段 FAI 值高;而病程较久的 CTO 病变闭塞的管腔含有较多致密的胶原蛋白、多种钙沉积,此时斑块较稳定;而且钙化成分不是动脉粥样硬化斑块的主要炎性成分,因此炎症水平低,所以对应 FAI 值较低,同时钙化成分导致其较硬,且微通道较少,所以导丝难以通过^[15]。

本研究的局限性:①本研究为回顾性研究,同时未对 PCI 术者经验进行评估,可能会影响手术的成功率。②本研究的病例来自多个中心,可能会受到不同扫描设备、扫描参数的影响,导致测量的结果出现偏倚。③本研究未统计两组患者的临床生化指标和降脂、抗炎药物使用情况,这可能会对冠状动脉周围脂肪组织产生影响,从而影响 FAI 值的测量。未来应进一步进行前瞻性、大样本量研究,并把用药情况纳入变量分析。

综上所述,闭塞段血管 FAI 可以作为 CCTA 形态学参数的补充,更好地预测 CTO 患者 PCI 手术的结局,并为临床治疗提供决策依据,从而使 CTO 患者的 PCI 具有更大的临床获益。

参考文献:

- [1] Brilakis ES, Mashayekhi K, Tsuchikane E, et al. Guiding principles for chronic total occlusion percutaneous coronary intervention[J]. *Circulation*, 2019, 140(5): 420-433.
- [2] Stone GW. Percutaneous coronary intervention of chronic total occlusions: conquering the final frontier[J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2018, 11(14): 1336-1339.
- [3] Yassin F, Khan J, Mozid A, et al. The utility of CT coronary angiography in chronic total occlusion percutaneous coronary intervention[J]. *Eur Cardiol*, 2023, 18: e48. doi:10.15420/ecr.2022.61.
- [4] 田晋帆,邢浩然,张丽君,等.经皮冠状动脉介入治疗冠状动脉慢性完全闭塞病变面临的思考与挑战[J]. *中国循环杂志*, 2023, 38(10): 1093-1097. TIAN Jinfan, XING Haoran, ZHANG Lijun, et al. Critical thinking and challenges of percutaneous coronary intervention for chronic total occlusive lesions of the coronary arteries[J]. *Chinese Circulation Journal*, 2023, 38(10): 1093-1097.
- [5] Yu CW, Lee HJ, Suh J, et al. Coronary computed tomography angiography predicts guidewire crossing and: Korean multicenter CTO CT registry score as a tool for assessing difficulty in chronic total occlusion percutaneous coronary intervention[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2017, 10(4): e005800. doi:10.1161/CIRCIMAGING.116.005800.
- [6] Szijgyarto Z, Rampat R, Werner GS, et al. Derivation

- and validation of a chronic total coronary occlusion intervention procedural success score from the 20, 000-patient EuroCTO registry: the EuroCTO (CASTLE) score [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2019, 12(4): 335-342.
- [7] Fujino A, Otsuji S, Hasegawa K, et al. Accuracy of J-CTO score derived From Computed tomography versus angiography to predict successful percutaneous coronary intervention [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2018, 11(2 Pt 1): 209-217.
- [8] Opolski MP, Achenbach S, Schubbäck A, et al. Coronary computed tomographic prediction rule for time-efficient guidewire crossing through chronic total occlusion: insights from the CT-RECTOR multicenter registry (Computed Tomography Registry of Chronic Total Occlusion Revascularization) [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2015, 8(2): 257-267.
- [9] 梁士楚, 白彦琳, 张静, 等. 成功开通冠状动脉慢性完全闭塞病变的冠状动脉造影影像学影响因素的 Meta 分析 [J]. *中国循证医学杂志*, 2023, 23(8): 908-915.
LIANG Shichu, BAI Yanlin, ZHANG Jing, et al. The angiographic predictors of successful chronic total occlusion percutaneous coronary intervention: a meta-analysis [J]. *Chinese Journal of Evidence-Based Medicine*, 2023, 23(8): 908-915.
- [10] Napoli G, Pergola V, Basile P, et al. Epicardial and pericoronary adipose tissue, coronary inflammation, and acute coronary syndromes [J]. *J Clin Med*, 2023, 12(23): 7212. doi:10.3390/jcm12237212.
- [11] 于亚妮, 刘昱圻, 陈韵岱. 血管周围脂肪组织及血管炎症在冠心病中的研究进展 [J]. *中国心血管杂志*, 2021, 26(3): 294-298.
YU Yani, LIU Yuqi, CHEN Yundai. Research progress of perivascular adipose tissue and vascular inflammation in coronary heart disease [J]. *Chinese Journal of Cardiovascular Medicine*, 2021, 26(3): 294-298.
- [12] Abdelrahman KM, Chen MY, Dey AK, et al. Coronary computed tomography angiography from clinical uses to emerging technologies: JACC state-of-the-art review [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2020, 76(10): 1226-1243.
- [13] 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.
- [14] Sugiyama T, Kanaji Y, Hoshino M, et al. Determinants of pericoronary adipose tissue attenuation on computed tomography angiography in coronary artery disease [J]. *J Am Heart Assoc*, 2020, 9(15): e016202. doi:10.1161/JAHA.120.016202.
- [15] Tran P, Phan H, Shah SR, et al. Applied pathology for interventions of coronary chronic total occlusion [J]. *Curr Cardiol Rev*, 2015, 11(4): 273-276.
- [16] Luo C, Huang MP, Li JL, et al. Predictors of interventional success of antegrade PCI for CTO [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2015, 8(7): 804-813.
- [17] Antonopoulos AS, Sanna F, Sabharwal N, et al. Detecting human coronary inflammation by imaging perivascular fat [J]. *Sci Transl Med*, 2017, 9(398): e2658. doi:10.1126/scitranslmed.aal2658.
- [18] Morino Y, Abe M, Morimoto T, et al. Predicting successful guidewire crossing through chronic total occlusion of native coronary lesions within 30 minutes: the J-CTO (Multicenter CTO Registry in Japan) score as a difficulty grading and time assessment tool [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2011, 4(2): 213-221.
- [19] Alessandrino G, Chevalier B, Lefèvre T, et al. A clinical and angiographic scoring system to predict the probability of successful first-attempt percutaneous coronary intervention in patients with total chronic coronary occlusion [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2015, 8(12): 1540-1548.
- [20] 高扬, 吕滨. 冠状动脉 CT 血管成像最新临床应用推荐及诊断规范 [J]. *中华放射学杂志*, 2022, 56(10): 1160-1164.
GAO Yang, LYU Bin. The latest clinical application recommendation and diagnostic criteria of coronary CT angiography [J]. *Chinese Journal of Radiology*, 2022, 56(10): 1160-1164.
- [21] Wang R, He Y, Xing HR, et al. Inclusion of quantitative high-density plaque in coronary computed tomographic score system to predict the time of guidewire crossing chronic total occlusion [J]. *Eur Radiol*, 2022, 32(7): 4565-4573.
- [22] Sagris M, Antonopoulos AS, Simantiris S, et al. Pericoronary fat attenuation index—a new imaging biomarker and its diagnostic and prognostic utility: a systematic review and meta-analysis [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2022, 23(12): e526-e536.
- [23] Xi Y, Huang L, Hao JH, et al. Predictive performance of the perivascular fat attenuation index for interventional antegrade percutaneous coronary intervention for chronic total occlusion [J]. *Eur Radiol*, 2023, 33(5): 3041-3051.
- [24] Akoumianakis I, Antoniadis C. The interplay between adipose tissue and the cardiovascular system: is fat always bad? [J]. *Cardiovasc Res*, 2017, 113(9): 999-1008.
- [25] Goeller M, Achenbach S, Marwan M, et al. Epicardial adipose tissue density and volume are related to subclinical atherosclerosis, inflammation and major adverse cardiac events in asymptomatic subjects [J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2018, 12(1): 67-73.