

# 柔性减影冠状动脉CT血管成像 诊断冠状动脉狭窄的效能<sup>▲</sup>

杨艳云 李 传\* 陈燕清

(广西医学科学院暨广西壮族自治区人民医院放射科,广西南宁市 530021)

**【摘要】目的** 探讨柔性减影冠状动脉CT血管成像(Sub-CCTA)诊断冠状动脉狭窄的效能。**方法** 选取40例疑似冠心病患者(356段冠状动脉)作为研究对象,所有患者均接受数字减影血管造影(DSA)、冠状动脉CT血管成像(CCTA)检查,并进行Sub-CCTA图像处理。以DSA为“金标准”,评估CCTA、Sub-CCTA对冠状动脉狭窄的诊断效能,诊断的一致性采用Kappa检验。**结果** CCTA、Sub-CCTA和DSA对冠状动脉狭窄检出率的比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ ),但CCTA、Sub-CCTA对轻度狭窄检出率高于DSA,对重度狭窄检出率低于DSA( $P<0.05$ )。以DSA检查结果为“金标准”,CCTA诊断冠状动脉狭窄与DSA诊断结果的一致性尚可( $Kappa=0.468$ ),Sub-CCTA诊断冠状动脉狭窄与DSA诊断结果的一致性好( $Kappa=0.706$ )。356段冠状动脉中,CCTA共检出伴斑块节段204段。CCTA、Sub-CCTA对存在斑块的冠状动脉狭窄检出率差异有统计学意义( $P<0.05$ )。其中,对于存在钙化斑块、混合斑块的冠状动脉节段,CCTA狭窄检出率高于Sub-CCTA( $P<0.05$ );对于非钙化斑块的冠状动脉节段,CCTA、Sub-CCTA狭窄检出率差异无统计学意义( $P>0.05$ )。以DSA检查结果为“金标准”,CCTA诊断斑块冠状动脉狭窄与DSA诊断结果的一致性较差( $Kappa=0.223$ ),Sub-CCTA诊断斑块冠状动脉狭窄与DSA诊断结果的一致性尚可( $Kappa=0.618$ )。**结论** CCTA与Sub-CCTA对冠状动脉狭窄的检出率与DSA相当,CCTA诊断冠状动脉狭窄与DSA诊断结果一致性尚可,Sub-CCTA诊断冠状动脉狭窄与DSA诊断结果一致性好。当冠状动脉存在斑块时,Sub-CCTA诊断冠状动脉狭窄的效能优于CCTA。

**【关键词】** 冠状动脉狭窄;冠状动脉CT血管成像;柔性减影技术;数字减影血管造影;冠状动脉斑块

**【文章编号】** 1673-6575(2026)02-0178-06

DOI:10.11864/j.issn.1673.2026.02.07

## Diagnostic efficacy of subtraction-coronary computed tomographic angiography for coronary artery stenosis

YANG Yanyun, LI Chuan, CHEN Yanqing

(Department of Radiology, Guangxi Academy of Medical Sciences & People's Hospital of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530021, Guangxi, China)

**【Abstract】Objective** To evaluate the diagnostic efficacy of subtraction-coronary computed tomographic angiography (Sub-CCTA) for coronary artery stenosis. **Methods** A total of 40 patients with suspected coronary heart disease (356 coronary artery segments) were enrolled as study subjects. All patients underwent digital subtraction angiography (DSA) and coronary computed tomographic angiography (CCTA), followed by Sub-CCTA image processing. Taking DSA as the reference standard, the diagnostic efficacy of CCTA and Sub-CCTA for coronary artery stenosis was evaluated. And the

<sup>▲</sup>基金项目:广西壮族自治区卫生健康委员会自筹经费科研课题(编号:Z-A202220176)

\*通信作者

diagnostic consistency was assessed using the *Kappa* test. **Results** There was no statistically significant difference in the detection rate of coronary artery stenosis among CCTA, Sub-CCTA and DSA ( $P>0.05$ ). However, CCTA and Sub-CCTA showed a higher detection rate for mild stenosis but a lower detection rate for severe stenosis than DSA ( $P<0.05$ ). Using DSA as the reference standard, CCTA showed moderate agreement with DSA in diagnosing coronary artery stenosis ( $Kappa=0.468$ ), while Sub-CCTA showed good agreement ( $Kappa=0.706$ ). Of the 356 coronary artery segments, 204 segments with plaques were detected by CCTA. There was a statistically significant difference in the detection rate of coronary artery stenosis with plaques between CCTA and Sub-CCTA ( $P<0.05$ ). Among them, the stenosis detection rate of CCTA was higher than that of Sub-CCTA in coronary artery segments with calcified plaques and mixed plaques ( $P<0.05$ ), whereas no statistically significant difference was found between CCTA and Sub-CCTA in coronary artery segments with non-calcified plaques ( $P>0.05$ ). Using DSA as the reference standard, CCTA showed poor agreement with DSA in diagnosing coronary artery stenosis with plaques ( $Kappa=0.223$ ), whereas Sub-CCTA showed moderate agreement ( $Kappa=0.618$ ). **Conclusion** The detection rates of coronary artery stenosis by CCTA and Sub-CCTA were comparable to those by DSA. CCTA showed moderate agreement with DSA in diagnosing coronary artery stenosis, whereas Sub-CCTA showed good agreement. In the presence of coronary artery plaques, Sub-CCTA demonstrated superior diagnostic efficacy for coronary artery stenosis compared with CCTA.

**【Key words】** Coronary artery stenosis, Coronary computed tomographic angiography, Flexible subtraction technique, Digital subtraction angiography, Coronary artery plaque

冠状动脉粥样硬化性心脏病(以下简称冠心病)是全球发病率与病死率最高的心血管疾病之一,我国2022年冠心病患病率为758/10万,且呈年轻化趋势,严重威胁居民生命健康<sup>[1]</sup>。数字减影血管造影(digital subtraction angiography, DSA)可动态显示冠状动脉血流动力学特征与解剖细节,是冠心病诊断的“金标准”和制定治疗方案的主要依据。然而,DSA为有创操作,存在一定并发症风险,且检查成本较高,难以作为高危人群常规筛查及随访评估的手段<sup>[2]</sup>。随着冠状动脉CT血管成像(coronary computed tomographic angiography, CCTA)技术的更新迭代与优化,其在冠状动脉狭窄判定及斑块性质评估方面已展现出较高的灵敏度与准确性,现已成为可疑冠心病患者的首选影像学检查手段,是冠心病“防-诊-治-康”全链条管理的重要工具<sup>[3]</sup>。然而冠状动脉钙化斑块、检查时心脏搏动及呼吸运动等因素产生的伪影,仍会影响CCTA评估冠状动脉狭窄的准确性<sup>[4]</sup>。因此,如何进一步提高冠状动脉的影像诊断效能,已成为当前心血管影像学领域的研究热点。CT图像柔性减影技术处理可去除线性硬化伪影、提高图像质量,已广泛用于肺动脉、门静脉及头颈动脉等

大血管狭窄程度的评估<sup>[5]</sup>。已有研究显示,将柔性减影技术应用于CCTA,在冠状动脉狭窄诊断中也显示出良好的应用前景<sup>[6]</sup>。基于此,本研究以DSA为“金标准”,探讨CCTA、柔性减影CCTA(subtraction-CCTA, Sub-CCTA)技术诊断冠状动脉狭窄的效能,分析冠状动脉斑块与狭窄的关系,旨在为临床提供无创、精准且高效的冠状动脉狭窄诊断方法。

## 1 资料与方法

1.1 一般资料 选取2024年5—11月在我院行CCTA和DSA检查的疑似冠心病患者作为研究对象。纳入标准:(1)年龄 $>18$ 岁;(2)存在胸痛、胸闷等疑似冠心病症状且未接受系统治疗者;(3)CCTA平扫至少可见1节段冠状动脉血管狭窄,且1个月内行DSA检查确诊为冠心病者;(4)CCTA、DSA检查图像完整,符合诊断要求<sup>[2]</sup>;(5)无意识障碍或精神障碍性疾病;(6)患者对本研究知情并签订知情同意书。排除标准:(1)CCTA和DSA检查后接受规范治疗者;(2)碘对比剂过敏者;(3)植入心脏起搏器或心脏瓣膜者;(4)合并青光眼、低血压、心律失常(如心房颤动等)或心率 $\geq 100$ 次/min、肝肾功能不全、妊娠或哺乳期者;

(5)无法配合扫描和/或屏气指令的患者。参照美国冠状动脉 CT 血管造影协会的冠状动脉树分段法<sup>[4]</sup>,本研究仅纳入直径 $\geq 1.5$  mm的冠状动脉节段。根据纳入、排除标准,最终纳入40例患者,年龄 $(59.5\pm 12.3)$ 岁,男31例、女9例,体重指数 $(25.1\pm 3.0)$ kg/m<sup>2</sup>,每例患者检查冠状动脉16段,共计640段,其中356段符合本研究要求。

## 1.2 方法

1.2.1 CCTA相关检查及Sub-CCTA处理技术 (1)CCTA检查。采用佳能 Aquilion ONE GENESIS 320排CT扫描。检查前告知患者检查程序及注意事项,心电监护下进行呼吸训练。检查前5 min让患者舌下含服硝酸甘油(厂家:山东信谊制药有限公司,国药准字H37021445)0.5 mg,右肘行静脉穿刺后以5 mL/s的速率先行碘普罗胺注射液[厂家:拜耳医药保健有限公司,国药准字HJ20171330,规格:37 g(I)/瓶100 mL]50 mL、再注射生理盐水30 mL。采用团注跟踪技术监测,当胸主动脉内碘对比剂浓度达预设阈值300 HU时自动触发扫描,延迟时间设置为14 s。扫描参数:管电压100 kV,采用自动管电流调制,准直器宽度160 mm,层厚0.5 mm,旋转时间0.275 s/圈,患者分两次屏气依次完成常规平扫和增强CCTA扫描<sup>[6]</sup>。扫描范围自气管隆突下1 cm至心底下缘1.5 cm。根据患者心率和呼吸运动状况,采用前瞻性心电门控螺旋扫描模式,自动重建冠状动脉增强CCTA、最佳舒张期、最佳收缩期及最佳图像。

(2)Sub-CCTA技术。选取一组图像质量最佳的增强扫描图像及其对应像素的平扫图像,传输至佳能CT原厂后处理工作站,通过柔性减影软件模块进行图像配准及减影处理,以去除增强CCTA图像中钙化斑块所致的射线硬化伪影、部分容积效应或空间分辨率不足所致的“开花状”伪影及血管重构过程中的运动伪影,获得优质的Sub-CCTA后处理图像<sup>[6]</sup>。

(3)图像分析及诊断。将CCTA、Sub-CCTA图像数据经影像归档与通信系统,上传至数坤科技股份有限公司冠状动脉CCTA人工智能辅助诊断系统(Coronary Doc,软件版本号:6.11.0428),由该系统完成自动化图像重建、血管树标记与分割。系统生成包括最大密度投影、多平面重组、曲面重组、容积再现等多种后处理图像,对冠状动脉走行、管腔直径、

管壁形态及斑块性质进行全面分析,评估并描述各冠状动脉节段狭窄程度及其临床意义,诊断报告经医师复核后出具。

1.2.2 DSA检查 采用西门子 Artis zee III ceiling 或飞利浦 Azurion 5M20 数字减影血管造影系统进行检查,常规采集左冠状动脉6个体位、右冠状动脉3个体位的图像。根据检查过程中的实际情况酌情增加其他投照体位,最终选取病变显示最清晰的图像进行分析诊断。

1.3 冠状动脉狭窄程度的评定 DSA、CCTA、Sub-CCTA 评估冠状动脉狭窄程度均采用目测直径法<sup>[3]</sup>,若同一血管存在多处狭窄,则以狭窄最严重的部位作为该血管的最终评判依据。冠状动脉血管狭窄程度分级标准:无狭窄、无斑块为冠状动脉血管正常;冠状动脉狭窄25%~49%为轻度狭窄;冠状动脉狭窄50%~69%为中度狭窄;冠状动脉狭窄 $\geq 70\%$ 为重度狭窄。参考相关文献标准将冠状动脉斑块性质分为非钙化斑块、钙化斑块及混合斑块<sup>[7]</sup>,进一步分析不同斑块类型对冠状动脉狭窄检出率的影响。所有图像由2名具有10年及以上心血管影像学工作经验的医师采用盲法独立判读复核,判读结果不一致时,由1名具有15年以上心血管影像学工作经验的医师参与协商,达成统一判读意见。

1.4 统计学方法 采用SPSS 23.0软件进行统计学分析。计量资料以均数 $\pm$ 标准差( $\bar{x}\pm s$ )表示;计数资料以例数( $n$ )和百分比( $\%$ )表示,组间比较采用 $\chi^2$ 检验。以 $P<0.05$ 为差异具有统计学意义。以DSA为“金标准”,评估CCTA、Sub-CCTA诊断冠状动脉狭窄的效能,诊断的一致性采用Kappa检验,Kappa $\geq 0.75$ 表示一致性优良,Kappa为0.65~0.74表示一致性好,Kappa为0.40~0.64表示一致性尚可,Kappa $< 0.4$ 表示一致性较差。

## 2 结果

2.1 CCTA、Sub-CCTA与DSA对冠状动脉狭窄检出率的比较 CCTA、Sub-CCTA和DSA对冠状动脉狭窄检出率的比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ ),但3种方法的轻度狭窄检出率和重度狭窄检出率差异具有统计学意义( $P<0.05$ ),CCTA、Sub-CCTA对轻度狭窄检出率高于DSA,对重度狭窄检出率低于DSA( $P<0.05$ ),见表1。

表1 CCTA、Sub-CCTA与DSA对冠状动脉狭窄检出率的比较 [n(%),段]

检查方法	n	正常	狭窄程度		
			轻度	中度	重度
CCTA	356	151(42.42)	103(28.93)*	51(14.33)	51(14.33)*
Sub-CCTA	356	166(46.63)	82(23.03)*	52(14.61)	56(15.73)*
DSA	356	158(44.38)	53(14.89)	53(14.89)	92(25.84)
$\chi^2$ 值		1.282	20.447	0.045	18.540
P值		0.527	<0.001	0.978	<0.001

注:与DSA比较,\* $P<0.05$ 。

2.2 CCTA、Sub-CCTA与DSA诊断冠状动脉狭窄一致性的比较 以DSA检查结果为“金标准”,评价CCTA、Sub-CCTA对冠状动脉狭窄的诊断价值。其中,CCTA诊断冠状动脉狭窄的灵敏度为78.28%,特异度为68.35%,准确率为73.88%,阳性预测值为75.61%,阴性预测值为71.52%,与DSA诊断结果的一致性尚可( $Kappa=0.468$ );Sub-CCTA诊断的灵敏度为84.85%,特异度为86.08%,准确率为85.39%,阳性预测值为88.42%,阴性预测值为81.93%,与DSA诊断结果的一致性较好( $Kappa=0.706$ ),见表2。

表2 CCTA、Sub-CCTA与DSA诊断冠状动脉狭窄一致性的比较 (n,段)

DSA	CCTA			Sub-CCTA		
	狭窄	正常	合计	狭窄	正常	合计
狭窄	155	43	198	168	30	198
正常	50	108	158	22	136	158
合计	205	151	356	190	166	356

2.3 CCTA、Sub-CCTA与DSA对存在不同类型斑块的冠状动脉狭窄检出率的比较 在纳入的356段冠状动脉中,CCTA共检出伴斑块节段204段。其中,钙化斑块45段,非钙化斑块56段,混合斑块103段,上述斑块均分布在不同节段的血管中,无同一节段内存在多类型斑块的重叠情况。以DSA检查结果为“金标准”,存在斑块的冠状动脉节段狭窄检出率为76.47%(156/204)。CCTA狭窄检出率为95.59%(195/204),Sub-CCTA狭窄检出率为83.82%(171/204),两者比较差异有统计学意义( $\chi^2=30.248, P<0.001$ )。其中,对于存在钙化斑块、混合斑块的冠状动脉节段,CCTA狭窄检出率高于Sub-CCTA( $P<0.05$ );对于非钙化斑块的冠状动脉节段,CCTA、Sub-CCTA狭窄检出率差异无统计学意义( $P>0.05$ ),见表3。

表3 CCTA、Sub-CCTA对存在不同类型斑块的冠状动脉狭窄检出率的比较 [n(%),段]

检查方法	钙化斑块 (n=45)	非钙化斑块 (n=56)	混合斑块 (n=103)
CCTA	43(95.56)	55(98.21)	97(94.17)
Sub-CCTA	35(77.78)	53(94.64)	83(80.58)
$\chi^2$ 值	5.236	0.259	8.627
P值	0.022	0.611	0.003

2.4 CCTA、Sub-CCTA与DSA诊断斑块冠状动脉狭窄一致性的比较 以DSA检查结果为“金标准”,评价CCTA、Sub-CCTA对斑块冠状动脉狭窄的诊断价值。其中,CCTA诊断斑块冠状动脉狭窄的灵敏度为99.36%,特异度为16.67%,准确率为79.90%,阳性预测值为79.49%,阴性预测值为88.89%,与DSA诊断结果的一致性较差( $Kappa=0.223$ )。Sub-CCTA诊断斑块冠状动脉狭窄的灵敏度为96.79%,特异度为58.33%,准确率为87.75%,阳性预测值为88.30%,阴性预测值为84.85%,与DSA诊断结果的一致性尚可( $Kappa=0.618$ ),见表4。

表4 CCTA、Sub-CCTA与DSA诊断斑块冠状动脉狭窄一致性的比较 (n,段)

DSA	CCTA			Sub-CCTA		
	狭窄	正常	合计	狭窄	正常	合计
狭窄	155	1	156	151	5	156
正常	40	8	48	20	28	48
合计	195	9	204	171	33	204

### 3 讨论

冠心病的主要病理改变是冠状动脉粥样硬化、伴斑块形成并导致管腔狭窄。DSA可动态显示冠状动脉血流动力学特征与解剖细节,目前仍是诊断冠心病的“金标准”<sup>[2]</sup>。但DSA需经动脉穿刺置入导管,

存在穿刺点出血、血管痉挛、血管夹层、造影剂肾病等并发症风险,且检查费用较高,对机体产生一定的辐射,难以作为高危人群常规筛查及随访评估的手段。随着技术更新迭代及人工智能的辅助应用,CCTA已能精准评估冠状动脉先天发育异常、管腔狭窄程度和斑块特征,实现冠状动脉疾病解剖和生理功能的同步评价,可有效避免非必要的侵入性冠状动脉造影检查<sup>[8]</sup>。目前,CCTA凭借无创、快速、安全、可重复、低成本等优势,成为冠心病筛查、诊断及治疗后复查评估的首选检查手段。本研究结果显示,CCTA和DSA对冠状动脉狭窄检出率的比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ ),提示CCTA在冠状动脉狭窄检出率方面有较好的临床价值。但一致性分析结果显示,CCTA在诊断冠状动脉狭窄方面与DSA诊断结果的一致性尚可( $Kappa=0.468$ ),提示CCTA评价冠状动脉狭窄尚有不足,原因可能与机体各种因素产生的伪影有关,如心脏收缩与舒张、肺部吸气深度与屏气程度,均可能导致CCTA图像出现错位,产生“伪影”或血管边缘模糊<sup>[9-11]</sup>。对于植入冠状动脉支架的患者,支架本身会产生射线硬化束伪影,导致管腔显示模糊,影响CCTA对狭窄程度的准确评判和康复评价<sup>[12]</sup>。另有研究发现,钙化斑块所致的晕染效应及硬化伪影会遮挡管腔,导致CCTA检查无法准确判断管腔是否狭窄,进而降低其诊断效能<sup>[7]</sup>。吕贤坤等<sup>[13]</sup>的研究也发现,随钙化负荷增加,CCTA的敏感度增加、特异度降低,导致图像视觉诊断准确度下降。有学者认为,冠心病的主要病理改变是冠状动脉粥样硬化,粥样斑块不断聚集并堵塞管腔,进而影响心肌血液供应,而斑块体积、斑块负荷量及最小管腔面积是影响CCTA评估冠状动脉狭窄的主要因素<sup>[14]</sup>,因此,如何提高CCTA对冠状动脉狭窄的评估效能是目前临床亟需解决的问题。

柔性减影技术是近年来新兴的突破性技术,通过计算机辅助柔性配准技术,对平扫与增强扫描的各期相之间进行配准,可实现解剖结构的精准对齐,纠正心脏搏动和呼吸运动引起的图像局部形变,去除斑块及周围组织的伪影,消除血管周围组织的干扰,最终获得仅显示充盈对比剂的冠状动脉管腔的纯净图像(减影图像)。该技术成像效果可与血管造影相媲美,能显著提高CCTA对冠心病,尤其是中重度钙化患者诊断的特异性和阳性预测值<sup>[15]</sup>。基于

此,本研究在CCTA的基础上对图像进行柔性减影技术处理,以优化诊断效能。

本研究结果显示,对于存在斑块的冠状动脉节段,CCTA、Sub-CCTA狭窄检出率差异有统计学意义( $P<0.05$ );对于存在钙化斑块、混合斑块的冠状动脉节段,CCTA狭窄检出率高于Sub-CCTA( $P<0.05$ ),且一致性检验结果显示,对于存在斑块的冠状动脉节段,CCTA诊断狭窄的结果与DSA诊断结果的一致性较差( $Kappa=0.223$ );而Sub-CCTA诊断狭窄的结果与DSA诊断结果的一致性尚可( $Kappa=0.618$ )。提示CCTA对斑块冠状动脉狭窄的诊断可能存在较高的假阳性。柔性减影技术通过精准匹配原始容积数据、实时增强减影处理,能有效消除斑块、运动等伪影干扰,获得更纯净的血管影像,从而提高狭窄诊断的精准度,其在评估冠状动脉狭窄方面基本满足临床要求,这与Kamo等<sup>[16]</sup>研究结果相似。

姚宇环等<sup>[17]</sup>认为,进行Sub-CCTA成像时采用一次屏气完成平扫和增强扫描,获得的图像配准度好,无配准伪影,可提高CCTA柔性减影的成功率。但单次屏气扫描时长约需13 s,对于高龄患者、合并慢性阻塞性肺疾病等其他基础疾病的患者,难以维持13 s以上单次屏气,给平扫、增强扫描操作带来一定难度。王俊人等<sup>[18]</sup>研究发现,Sub-CCTA检查中,单次与两次屏气法在评估严重钙化冠状动脉节段狭窄程度方面效能相当,但前者图像质量更佳。笔者团队临床实践发现,在进行Sub-CCTA检查时,两次屏气扫描的患者接受度更高,因此本研究采取两次屏气法进行平扫、增强扫描,结果显示图像质量良好,提示两次屏气扫描可提高患者依从性,保障检查顺利进行,从而提高检查的成功率。但值得注意的是,在患者屏气不佳时,Sub-CCTA图像可能会出现严重运动伪影,在阅片时应注意甄别<sup>[5]</sup>。临床上可通过呼吸训练、缩短扫描周期及心理指导等优化策略,改善患者的配合程度,提高检查成功率。

综上所述,CCTA与Sub-CCTA对冠状动脉狭窄的检出率与DSA相当,CCTA诊断冠状动脉狭窄与DSA诊断结果一致性尚可,Sub-CCTA诊断冠状动脉狭窄与DSA诊断结果一致性好。当冠状动脉存在斑块时,CCTA诊断冠状动脉狭窄与DSA诊断结果一致性较差,而Sub-CCTA诊断一致性尚可。但本研究存在一定局限性,如样本量较小,且未纳入植入冠状动

脉支架的患者,因此Sub-CCTA诊断冠状动脉狭窄的效能仍需扩大样本量,纳入不同的相关患者,进一步深入研究探讨。

### 参 考 文 献

- [1] 国家心血管病中心,中国心血管健康与疾病报告编写组. 中国心血管健康与疾病报告 2024 概要[J]. 中国循环杂志,2025,40(6):521-559.
- [2] 中华医学会影像技术分会,中国医师协会医学技师专业委员会,中国医药教育协会医学影像技术专业委员会.DSA 检查技术临床应用专家共识[J]. 中华放射学杂志,2024,58(10):995-1005.
- [3] 中国医师协会放射医师分会. 冠心病CT检查和诊断中国专家共识[J]. 中华放射学杂志,2024,58(2):135-149.
- [4] Cury RC, Leipsic J, Abbara S, et al. CAD-RADS™ 2.0-2022 coronary artery disease-reporting and data system: an expert consensus document of the society of cardiovascular computed tomography (SCCT), the American college of cardiology (ACC), the American college of radiology (ACR), and the North America society of cardiovascular imaging (NASCI)[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2022, 16(6): 536-557.
- [5] 张敏,赖志满,谢定祥,等. 柔性减影CE-Boost技术在主动脉CT血管成像中的初步应用[J]. 影像诊断与介入放射学,2025,34(1):23-28.
- [6] 任诗雨. 柔性减影技术在钙化冠状动脉狭窄中的应用研究[D]. 十堰:湖北医药学院,2024.
- [7] 许丽雪,李芳,罗南,等. 钙化斑块对冠状动脉CTA诊断准确性的影响[J]. 中国医学影像学杂志,2020,28(10):741-745.
- [8] 肖源,谭广毅,王琦.AI技术用于冠脉CTA对冠状动脉病变的诊断价值分析[J]. 中国CT和MRI杂志,2025,23(12):79-81.
- [9] 安备,张卓璐,刘卓,等. 新一代冠状动脉运动追踪冻结技术用于改善不同心率患者冠状动脉CT血管成像质量[J]. 中国介入影像与治疗学,2025,22(2):131-135.
- [10] 王甜,刘铁军,曹治婷,等. 不同屏气方式对冠状动脉CT血管成像辐射剂量和图像质量的影响[J]. 中国介入影像与治疗学,2021,18(11):663-667.
- [11] 杨威威,梁奕,凡娜,等. 自由呼吸状态下行320排冠状动脉CT血管成像检查的可行性[J]. 广西医学,2020,42(4):421-424.
- [12] 赵琳琳,杨如武,杨宏志,等. 冠状动脉支架植入术后患者320排减影冠状动脉CT血管造影图像质量的影响因素[J]. 中国介入影像与治疗学,2023,20(3):157-160.
- [13] 吕贤坤,赵宏伟,吕宗晨,等. CT冠状动脉成像中钙化斑块特征对血管狭窄诊断结果的影响[J]. 医学临床研究,2024,41(6):893-895,899.
- [14] 张瑞荣,马思,牛媛媛,等. 基于冠状动脉CT血管成像的斑块定量分析联合钙化积分在评价临界病变缺血性狭窄的应用价值[J]. 中国CT和MRI杂志,2025,23(8):91-94.
- [15] Qiao JH, Li S, Yang HZ, et al. Subtraction improves the accuracy of coronary CT angiography in patients with severe calcifications in identifying moderate and severe stenosis: a multicenter study[J]. Acad Radiol, 2023, 30(12): 2801-2810.
- [16] Kamo Y, Fujimoto S, Nozaki YO, et al. Incremental diagnostic value of CT fractional flow reserve using subtraction method in patients with severe calcification: a pilot study[J]. J Clin Med, 2021, 10(19): 4398.
- [17] 姚宇环,黄文华,黄超,等. 基于小剂量测试法单次屏气行冠状动脉减影技术的优势研究[J]. 临床放射学杂志,2020,39(3):586-591.
- [18] 王俊人,孙玉,李晓岗,等. 对比单次屏气与两次屏气法减影冠状动脉CT血管造影评估严重钙化冠状动脉狭窄[J]. 中国医学影像技术,2022,38(7):1081-1085.

(收稿日期:2025-12-07 修回日期:2026-02-20)