

• 临床研究 •

冠状动脉CT血管造影的三维重建图像在非体外循环冠状动脉旁路移植术术前规划中的应用

段书朋, 余 万, 耿 乐, 陈爱东, 魏 磊*

南京医科大学第一附属医院心脏大血管外科, 江苏 南京 210029

[摘要] 目的: 评价冠状动脉CT血管造影(coronary CT angiography, CCTA)及其三维重建图像对非体外循环冠状动脉旁路移植术(off-pump coronary artery bypass grafting, OPCABG)术前规划的临床效果。方法: 回顾性分析南京医科大学第一附属医院心脏大血管外科2021年1月—2023年3月行OPCABG的158例患者的临床资料, 其中113例常规采用冠状动脉造影(coronary angiography, CAG)指导OPCABG(常规组), 45例在CAG的基础上完善CCTA检查及三维图像重建辅助OPCABG(3D组), 对两项影像学检查结果进行综合分析并指导手术。观察指标包括手术时间、术中失血量、术后呼吸机使用时间、术后监护时间和住院时间、术后房颤、急性肾损伤、二次气管插管、脑梗死或心血管不良事件等并发症, 以及术后1年心脏超声和CCTA随访结果。结果: 两组术后呼吸机使用时间、术后监护时间和住院时间、术后1年CCTA及心脏超声随访结果差异无统计学意义($P > 0.05$)。但3D组手术时间(250.7 ± 41.4)min与常规组手术时间(271.0 ± 57.2)min比较, 差异有统计学意义($P < 0.05$), 3D组术中失血量少于常规组($P < 0.05$)。结论: 与常规采用CAG指导OPCABG相比, 增加CCTA检查可以缩短手术时间, 减少术中出血量, 获得更好的手术效果。

[关键词] 冠状动脉CT血管成像; 三维重建; 循环冠状动脉旁路移植术

[中图分类号] R654.2; R816.2

[文献标志码] A

[文章编号] 1007-4368(2025)06-863-06

doi: 10.7655/NYDXBNSN250034

The application of three-dimensional reconstruction images of coronary CT angiography in preoperative planning of off-pump coronary artery bypass grafting

DUAN Shupeng, YU Wan, GENG Le, CHEN Aidong, WEI Lei*

Department of Cardiovascular Surgery, the First Affiliated Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210029, China

[Abstract] **Objective:** To evaluate the clinical effect of three-dimensional (3D) reconstruction images of coronary CT angiography (CCTA) in preoperative planning of off-pump coronary artery bypass grafting (OPCABG). **Methods:** The clinical data of 158 patients who underwent OPCABG from January 2021 to March 2023 in the department of cardiovascular surgery of the First Affiliated Hospital of Nanjing Medical University were retrospectively analyzed. Among them, 113 patients underwent OPCABG guided by coronary angiography (CAG) (conventional group). On the basis of CAG, CCTA and 3D reconstruction of images were completed in 45 cases to assist OPCABG (3D group), and the operation was guided by comprehensive analysis of the results of the two imaging examinations. The outcome measures included operation time, intraoperative blood loss, ventilator usage time, postoperative monitoring period and hospital stay, postoperative atrial fibrillation, acute kidney injury, secondary tracheal intubation, cerebral infarction, cardiovascular adverse events and other complications, and 1 year postoperative cardiac ultrasound and CCTA follow-up results. **Results:** There was no significant difference between the two groups in the ventilator usage time, the postoperative monitoring period, the time of hospital stay, and the results of CCTA and cardiac ultrasound follow-up 1 year after surgery ($P > 0.05$). However, the operation time of the 3D group was (250.7 ± 41.4) min and the conventional group was (271.0 ± 57.2) min, and the differences between the two groups were statistically significant ($P < 0.05$). Moreover, the amount of blood loss during the 3D group was less than that of the conventional group

[基金项目] 江苏省科技厅重点研发项目(BE2023081)

*通信作者(Corresponding author), E-mail: weileijs@163.com (ORCID: 0000-0002-6493-4035)

($P < 0.05$). **Conclusion:** Compared with conventional CAG guided OPCABG, the addition of CCTA can shorten the operation time, reduce the amount of intraoperative blood loss, and obtain better surgical results.

[Key words] coronary CT angiography; three-dimensional reconstruction; coronary artery bypass grafting

[J Nanjing Med Univ, 2025, 45(06): 863-868]

冠状动脉旁路移植术 (coronary artery bypass grafting, CABG) 是冠状动脉粥样硬化性心脏病 (简称冠心病) 的主要治疗方式之一, 尤其对于严重左主干病变及多支病变患者, CABG 是首选治疗方式^[1]。术中快速且精准地判断冠状动脉搭桥位点对成功手术至关重要, 尤其是非体外循环冠状动脉旁路移植术 (off-pump coronary artery bypass grafting, OPCABG)。目前搭桥术前对冠状动脉的评估首选冠状动脉造影 (coronary angiography, CAG), 冠状动脉 CT 血管造影 (coronary CT angiography, CCTA) 及其三维图像重建也可用于 CABG 的术前规划^[2]。然而搭桥术前并未常规开展 CCTA 检查。本研究回顾性分析南京医科大学第一附属医院心脏大血管外科 2021 年 1 月—2023 年 3 月在 OPCABG 术前完善 CCTA 检查及三维图像重建的临床资料, 现报道如下。

1 对象和方法

1.1 对象

回顾性分析南京医科大学第一附属医院心脏大血管外科 2021 年 1 月—2023 年 3 月行 OPCABG 的 158 例患者的临床资料, 根据是否在 CAG 基础上增加 CCTA 检查并构建三维重建图像指导手术分为 3D 组和常规组。入组标准: ①由 CAG 确诊冠心病多支病变择期行 OPCABG; ②病历资料完整。排除标准: ①急诊手术; ②合并其他手术; ③合并心房颤动; ④体外循环手术; ⑤二次心脏手术。本研究经医院伦理委员会审查同意 (伦理批号: 2024-SR-197), 所有患者及家属都签署知情同意书。

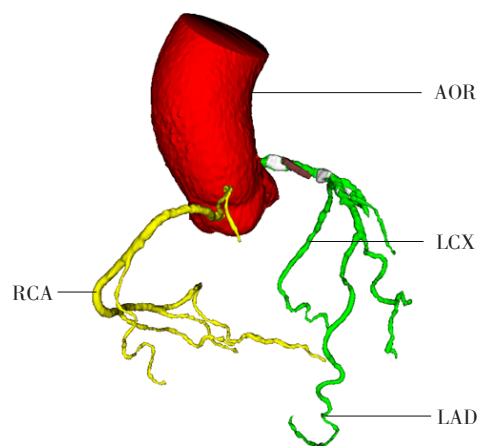
1.2 方法

1.2.1 冠状动脉评估

冠状动脉影像的获取: 常规组仅完善 CAG 检查, 根据 CAG 结果分析冠状动脉的解剖结构及狭窄程度, 判断搭桥靶点。

3D 组术前完善 CAG 检查及 CCTA 检查。扫描采集的数据导入医学诊断图像处理软件, 进行冠状动脉三维重建, 冠状动脉提取范围包括一部分升主动脉和全部冠状动脉, 生成医学图像无头文件

(medical imaging headerless, MHA) 格式的分割模型, 再将分割模型进行计算, 三维重建处理, 自动生成与患者冠状动脉等比例的三维模型 (图 1)。将三维重建的 CCTA 结果与 CAG 结果进行比对, 综合分析确定搭桥靶点。



LCX: left circumflex artery; LAD: left anterior descending coronary artery; RCA: right coronary artery; AOR: aorta.

图 1 冠状动脉 CT 血管成像 3D 重建图像

Figure 1 Three-dimensional reconstruction of coronary CT angiography

1.2.2 手术方案

全身麻醉后气管插管机械通气, 胸骨正中切口纵劈胸骨, 采用不接触法获取左侧乳内动脉及大隐静脉备桥血管, 心脏稳定器固定左前降支后与左侧乳内动脉吻合。使用侧壁钳将大隐静脉与主动脉吻合, 根据主动脉 3D 重建结果及术中评估, 若主动脉钙化严重则使用易扣器, 使用心脏稳定器固定左侧回旋支和右冠状动脉后将大隐静脉与之序贯吻合。检查各吻合口无出血后逐层止血关胸。

1.2.3 观察指标

术前指标: 心脏超声结果、心肌标志物包括肌红蛋白 (myoglobin, MYO)、肌酸激酶同工酶 (creatine kinase isoenzyme MB, CK-MB)、肌钙蛋白 T (cardiac troponin T, cTnT)、肌钙蛋白 I (cardiac troponin I, cTnI) 及 B 型尿钠肽 (brain natriuretic peptide,

BNP), 以及血肌酐(creatinine, Cr)、尿素氮(urea nitrogen, BUN)。手术相关指标: 手术时长、术中失血量、术后心肌标志物、桥血管数量、呼吸机使用时间、术后监护时间、住院时间。术后并发症: 再次手术、植入主动脉内球囊反搏(intra-aortic balloon pump, IABP)装置、二次气管插管、急性肾功能不全、术后心肌梗死、脑梗死、术后急性心血管事件。随访指标: 1年后的心脏超声指标及CCTA结果, 随访桥血管是否闭塞, 若序贯吻合3根血管, 第1根闭塞视为3根桥血管闭塞, 第2根桥血管闭塞视为2根桥血管闭塞, 第3根桥血管闭塞视为1根桥血管闭塞。

1.3 统计学方法

运用SPSS 27.0软件进行统计学分析, 正态分布的计量资料采用均数±标准差($\bar{x} \pm s$)描述, 组间比较运用t检验, 非正态分布的计量资料用中位数(四分位数)[$M(P_{25}, P_{75})$]表示, 组间比较使用Mann-Whitney U

检验。计数资料用例数(百分率)[$n(\%)$]表示, 组间比较采用卡方检验, 不满足卡方检验条件时, 采用Fisher确切概率法。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 患者的术前资料

严格按照入组标准收集患者, 3D组45例, 常规组113例, 两组患者的术前一般情况及术前指标差异无统计学意义($P > 0.05$, 表1)。一般情况包括性别、年龄、体重指数(body mass index, BMI)、冠心病的危险因素(高血压、高脂血症、糖尿病、吸烟史、饮酒史); 术前指标包括MYO、CK-MB、cTnT、cTnI、BNP、Cr、BUN以及术前是否有IABP支持。

2.2 两组患者手术相关资料比较

和常规组相比, 3D组的手术时间更短($P=0.032$), 术中出血量更少($P=0.022$)。其他手术相关

表1 两组患者术前资料比较

Table 1 Comparison of preoperative data of patients between two groups

Variable	3D group(n=45)	Conventional group(n=113)	$\chi^2/Z/t$	P
Male[n(%)]	34(75.6)	82(72.6)	0.147	0.701
Age(years, $\bar{x} \pm s$)	64.53 ± 7.16	62.42 ± 9.32	1.370	0.173
BMI(kg/m ² , $\bar{x} \pm s$)	25.80 ± 3.05	24.90 ± 3.75	-1.437	0.153
Hypertension[n(%)]	36(80.0)	76(67.3)	2.532	0.112
Hyperlipidemia[n(%)]	4(8.9)	21(18.6)	2.271	0.132
Diabetes[n(%)]	19(42.2)	49(43.4)	0.017	0.896
Smoking history[n(%)]	20(44.4)	58(51.3)	0.610	0.435
Drinking history[n(%)]	14(31.1)	48(42.5)	1.744	0.187
MYO[ng/mL, $M(P_{25}, P_{75})$]	26.5(15.0, 34.2)	23.4(15.0, 39.2)	-0.213	0.831
CK-MB[ng/mL, $M(P_{25}, P_{75})$]	1.5(0.9, 2.2)	1.8(0.9, 2.7)	-1.110	0.267
cTnT[ng/mL, $M(P_{25}, P_{75})$]	14.0(8.9, 44.5)	11.8(8.9, 19.9)	-1.204	0.229
cTnI[n(%)]	4(8.8)	23(20.4)	2.986	0.084
BNP[pg/mL, $M(P_{25}, P_{75})$]	278.0(126.3, 542.7)	379.6(107.8, 546.9)	-0.566	0.571
Cr[μ mol/L, $M(P_{25}, P_{75})$]	73.5(59.8, 80.1)	62.9(58.4, 85.8)	-0.775	0.438
BUN[mmol/L, $M(P_{25}, P_{75})$]	5.9(5.0, 8.1)	5.8(4.6, 6.8)	-1.389	0.165
IABP support[n(%)]	1(2.2)	3(2.7)	0.000	1.000

指标包括移植物的数目、机械通气时间、术后监护时间、住院时间、术后心肌标志物, 两组之间差异并无统计学意义($P > 0.05$, 表2)。

2.3 两组患者术后并发症比较

两组患者在术后并发症方面差异无统计学意义($P > 0.05$, 表3)。3D组1例IABP支持, 为术前出现血流动力学不稳; 1例术后出现急性肾功能不全, 予以血液透析支持治疗后肾功能恢复正常; 3D组未出现术后二次气管插管、脑梗死或心血管不良事件。

常规组4例IABP支持, 其中有3例为术前出现的血流动力学不稳定, 1例为术后出现急性左心衰, 予以IABP支持, 3d后顺利撤除IABP装置。术后二次插管1例, 患者拔除气管插管后再次出现脉氧下降, 再次气管插管, 二次插管4d后患者顺利拔除气管插管。术后出现脑梗死1例, 患者表现为一侧肢体肌力下降, 予以抗凝、抗血小板、强化降脂、营养脑神经等药物治疗后好转并顺利出院。无术后急性肾功能不全。两组患者均无术后急性心肌梗死及二

表2 两组患者手术资料比较

Table 2 Comparison of surgical data of patients between two groups

Variable	3D group(n=45)	Conventional group(n=113)	$\chi^2/Z/t$	P
Operation time(min, $\bar{x} \pm s$)	250.7 \pm 41.4	271.0 \pm 57.2	2.163	0.032
Number of grafts(n, $\bar{x} \pm s$)	3.6 \pm 0.7	3.7 \pm 0.7	0.916	0.361
Ventilation time[h, $M(P_{25}, P_{75})$]	19.0(14.5, 45.5)	21.0(15.5, 41.5)	-0.422	0.673
ICU stay[d, $M(P_{25}, P_{75})$]	3.0(2.0, 5.0)	2.0(1.0, 5.5)	-0.538	0.590
Hospital stay(d, $\bar{x} \pm s$)	18.5 \pm 6.4	18.8 \pm 7.7	0.238	0.307
Bleeding volume[mL, $M(P_{25}, P_{75})$]	600.0(500.0, 800.0)	600.0(500.0, 1 000.0)	-2.291	0.022
MYO[ng/mL, $M(P_{25}, P_{75})$]	188.5(116.5, 284.5)	129.9(88.0, 197.5)	-1.403	0.161
cTnT[ng/mL, $M(P_{25}, P_{75})$]	97.9(45.3, 144.5)	150.0(74.6, 194.3)	-1.579	0.114
CK-MB[ng/mL, $M(P_{25}, P_{75})$]	3.7(3.1, 5.2)	6.0(2.7, 12.1)	-1.549	0.121
cTnl[n(%)]	10(22.2)	35(31.0)	1.210	0.271

次手术。

2.4 两组患者术后随访

患者术前及术后1年随访的心脏超声结果在两组间差异无统计学意义($P > 0.05$, 表4)。3D组1年后的CCTA随访中,共搭桥147根,其中18根桥血管闭塞,通畅率为88%,常规组共搭桥381根,其中36根闭塞,通畅率为91%。两组术后1年的桥血管通畅率差异无统计学意义($\chi^2=0.903, P=0.342$)。

3 讨论

自50多年前首次开展CABG以来,冠状动脉的

血运重建已成为冠心病的标准治疗,尤其是左主干病变和多支血管病变^[3]。CABG分为体外循环冠状动脉旁路移植术(on-pump coronary artery bypass grafting, ONCABG)和OPCABG,这两种技术都有各自的优缺点,其中OPCABG避免了体外循环损伤,对患者心脏的损伤更轻并且术后恢复更快,但是需要手术医生拥有丰富的经验^[4-5]。然而冠状动脉解剖复杂,血管表面往往有心脏脂肪覆盖,导致术中对于冠状动脉走行及搭桥靶点的判断困难^[6]。在OPCABG中过多过久地搬动心脏去寻找搭桥位点会造成患者血压下降,尤其是对心功能不全的患者,甚至有

表3 两组患者术后并发症比较

Table 3 Comparison of postoperative complications of patients between two groups

Variable	3D group(n=45)	Conventional group(n=113)	P
Postoperative IABP support	1(2.2)	4(3.5)	0.559
Reoperation	0(0)	0(0)	-
Reintubation	0(0)	1(0.9)	0.715
Postoperative acute kidney injury	1(2.2)	0(0)	0.285
Postoperative cardiac events	0(0)	1(0.9)	0.715
Postoperative acute myocardial infarction	0(0)	0(0)	-
Postoperative cerebral infarction	0(0)	1(0.9)	0.715

表4 两组患者心脏超声比较

Table 4 Comparison of echocardiographic index of patients between two groups

Variable	Time point	3D group(n=45)	Conventional group(n=113)	Z	P
LVEF(%)	Pre-operation	63.7(61.6, 64.8)	62.4(61.0, 64.7)	-1.306	0.191
	1-year follow up	62.7(61.4, 64.0)	62.1(60.0, 64.0)	-0.933	0.351
LVDd(mm)	Pre-operation	48.0(45.0, 51.5)	48.0(45.0, 51.0)	-0.568	0.570
	1-year follow up	49.0(44.5, 51.0)	48.0(45.0, 50.0)	-0.201	0.841
LVDs(mm)	Pre-operation	31.0(30.0, 35.0)	31.0(30.0, 34.0)	-0.140	0.889
	1-year follow up	32.0(29.5, 33.0)	32.0(30.0, 34.0)	-0.046	0.963

LVEF: left ventricular ejection fraction; LVDd: left ventricular end-diastolic diameter; LVDs: left ventricular-systolic diameter.

可能紧急中转为ONCABG,造成心肌损伤,影响预后。因此,在进行OPCABG之前充分了解患者的冠状动脉解剖及病变部位,对手术的成功开展十分重要。CAG是CABG术前评估冠状动脉的金标准,可以明确冠状动脉狭窄的部位以确定需绕过哪些病变血管^[7]。CAG也有局限性,无法显示阻塞血管远端以及钙化情况,并且它是一种有创检查^[8]。CCTA是一种替代CAG的稳定可靠的无创成像方法,可以显示钙化斑块情况,并且可以显示闭塞血管远端的通畅程度,其缺点是对冠状动脉狭窄判断的准确度不如CAG^[9-10]。在进行CABG手术前并不会常规完善CCTA检查,本研究旨在评估CCTA的三维重建图像加入CABG术前规划的必要性和安全性。

有研究指出,CCTA单独指导低风险的CABG手术是安全的,并对复杂冠心病的治疗决策具有潜在可行性以及可接受的安全性^[11-12]。本研究发现,同时运用CCTA的三维重建结果和CAG来指导CABG,可以缩短手术时间,减少术中出血量。根据CCTA重建所得的三维图像可以更加直观地观察患者的冠状动脉,从而在手术中快速精准地定位靶血管,减少了术中对心脏的过多搬动,从而减少对心脏的损伤。在CCTA图像中,钙化斑块可能会影响对冠状动脉狭窄程度的判断^[13-14]。但是钙化斑块的识别对于手术是有意义的,可以减少术中对搭桥位点的判断错误,从而尽量避免对冠状动脉的额外损伤。在1年的近期随访当中,两组患者桥血管通畅率差异没有统计学意义,可能和随访时间较短有关,采用CCTA的三维重建指导OPCABG是否会增加桥血管远期通畅率还有待进一步随访。

值得注意的是,CCTA检查时需要控制患者心率,并且需要配合屏气,对于既往放过冠状动脉支架的患者,检查结果可能并不满意^[15]。并不是所有冠心病患者都需要在已经接受CAG的基础上完善CCTA检查,对于冠状动脉解剖简单,靶血管定位已经明确的患者,增加CCTA会增加治疗成本及辐射剂量。人工智能辅助分析技术和多模态影像融合技术可以增加CT的准确性^[16-17],随着CT技术以及图像处理技术的进步,未来CCTA可能成为CABG术前评估的首要方法^[18-20]。

综上所述,为了术前更好地评估冠状动脉的解剖特点,从而在术中快速精准地寻找搭桥靶点,对于冠状动脉解剖形态复杂、靶血管定位可能困难的患者,可以在术前完善CAG检查的基础上,增加

CCTA及其三维图像重建,从而更精准地选择患者的搭桥靶点,减少手术中的心肌损伤。

利益冲突声明:

所有作者均声明不存在利益冲突。

Conflict of Interests:

The authors have no conflict of interests to declare.

作者贡献声明:

段书朋负责论文设计、数据收集、数据分析、论文撰写;余万负责数据收集、数据分析;耿乐、陈爱东负责文章整理、结构设计,研究方法的指导。魏磊负责文章整体构思与设计,提供资源,对研究过程监督和指导,论文的审阅与修订。

Author's Contributions:

DUAN Shupeng was responsible for paper design, data collection, data analysis and paper writing; YU Wan was responsible for data collection and data analysis; GENG Le and CHEN Aidong were responsible for article arrangement, structural design and guidance of research methods. WEI Lei was responsible for the overall conception and design of the paper, providing resources, supervising and guiding the research process, reviewing and revising the paper.

[参考文献]

- [1] LAWTON J S, TAMIS-HOLLAND J E, BANGALORE S, et al. 2021 ACC/AHA/SCAI guideline for coronary artery revascularization: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on clinical practice guidelines [J]. *Circulation*, 2022, 145(3): e18-e114
- [2] MILLER C L, KOCHER M, KOWEEK L H, et al. Use of computed tomography (CT) for preoperative planning in patients undergoing coronary artery bypass grafting (CABG)[J]. *J Card Surg*, 2022, 37(12): 4150-4157
- [3] DIMELING G, BAKAEEN L, KHATRI J, et al. CABG: when, why, and how?[J]. *Cleve Clin J Med*, 2021, 88(5): 295-303
- [4] RANTANEN M, YOUSIF R, KALLIOINEN M, et al. Retrospective observational analysis of a coronary artery bypass grafting surgery patient cohort: off-pump versus on-pump[J]. *Ann Med Surg(Lond)*, 2022, 84: 104812
- [5] KOWALEWSKI M, PAWLISZAK W, MALVINDI P G, et al. Off-pump coronary artery bypass grafting improves short-term outcomes in high-risk patients compared with on-pump coronary artery bypass grafting: meta-analysis[J]. *Thorac Cardiovasc Surg*, 2016, 151(1): 60-77
- [6] 季宇萌,秦会园,陆小虎,等. 心外膜脂肪体积与冠状动脉血管病变严重程度评估及预后的相关性研究[J]. *南京医科大学学报(自然科学版)*, 2023, 43(8): 1108-1114
JI Y M, QIN H Y, LU X H, et al. Correlation of severity assessment of coronary vascular lesions, patient prognosis

- and epicardial adipose tissue volume with coronary heart disease [J]. *Journal of Nanjing Medical University (Nature Sciences)*, 2023, 43(8): 1108–1114
- [7] ALEXANDER J H, SMITH P K. Coronary-artery bypass grafting[J]. *N Engl J Med*, 2016, 374(20): 1954–1964
- [8] 薛源, 孟浩宇, 王连生. 定量血流分数在光学相干断层成像评估冠状动脉临界病变中的诊断价值[J]. *南京医科大学学报(自然科学版)*, 2021, 41(4): 540–544
- XUE Y, MENG H Y, WANG L S. Diagnostic value of quantitative flow ratio in intermediate coronary lesions assessed by optical coherence tomography [J]. *Journal of nanjing Medical University (Nature Sciences)*, 2021, 41(4): 540–544
- [9] NGAM P I, ONG C C, CHAI P, et al. Computed tomography coronary angiography - past, present and future [J]. *Singapore Med J*, 2020, 61(3): 109–115
- [10] KAGEYAMA S, SERRUYS P W, KOTOKU N, et al. Coronary computed tomography angiography-based SYNTAX score for comprehensive assessment of advanced coronary artery disease[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2024, 18(2): 120–136
- [11] SERRUYS P W, KAGEYAMA S, POMPILIO G, et al. Coronary bypass surgery guided by computed tomography in a low-risk population [J]. *Eur Heart J*, 2024, 45(20): 1804–1815
- [12] KAWASHIMA H, POMPILIO G, ANDREINI D, et al. Safety and feasibility evaluation of planning and execution of surgical revascularisation solely based on coronary CTA and FFR_{CT} in patients with complex coronary artery disease: study protocol of the FASTTRACK CABG study [J]. *BMJ Open*, 2020, 10(12): e038152
- [13] MAXIM B A, VAN-ROSENDAEL A R, MA X Y, et al. Comparative differences in the atherosclerotic disease burden between the epicardial coronary arteries: quantitative plaque analysis on coronary computed tomography angiography [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2021, 22(3): 322–330
- [14] JANE C J, SHEN L H, NGUYEN J, et al. Accuracy and limitation of plaque detection by coronary CTA: a section-to-section comparison with optical coherence tomography [J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 11845
- [15] PACK J D, XU M F, WANG G, et al. Cardiac CT blooming artifacts: clinical significance, root causes and potential solutions [J]. *Vis Comput Ind Biomed Art*, 2022, 5(1): 29
- [16] 唐蛰雨, 李绍钦, 贾中芝. 基于CT图像的深度学习在主动脉夹层中的应用进展[J]. *南京医科大学学报(自然科学版)*, 2024, 44(8): 1174–1178
- TANG Z Y, LI S Q, JIA Z Z. The application progress of deep learning based on CT images in aortic dissection [J]. *Journal of Nanjing Medical University (Nature Sciences)*, 2024, 44(8): 1174–1178
- [17] RUEL M, GUPTA S, PONNAMBALAM M, et al. Less invasive and hybrid surgical/interventional coronary disease management: the future is now [J]. *Can J Cardiol*, 2024, 40(2): 290–299
- [18] SERRUYS P W, HARA H, GARG S, et al. Coronary computed tomographic angiography for complete assessment of coronary artery disease: JACC state-of-the-art review [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2021, 78(7): 713–736
- [19] SI-MOHAMED S A, BOCCALINI S, LACOMBE H, et al. Coronary CT angiography with photon-counting CT: first-in-human results [J]. *Radiology*, 2022, 303(2): 303–313
- [20] MAUROVICH-HORVAT P, BOSSERDT M, KOFOED K F, et al. CT or invasive coronary angiography in stable chest pain [J]. *New Engl J Med*, 2022, 386(17): 1591–1602

[收稿日期] 2025-01-08

(本文编辑: 陈汐敏)