·论著·

# 艾司洛尔对冠状动脉旁路移植术后患者冠状动脉 CT 血管成像中 Double-Flash 扫描模式应用率的影响

何柏[1] 刘子暖[2] 单冬凯[2] 王玺[2] 王蔚然[1] 赵再仙[1] 宋金玉[1] 汪奇[2]
(1. 中国人民解放军总医院第一医学中心心血管内科,北京 100853; 2. 中国人民解放军总医院心血管病医学部,北京 100048)

**【摘要】目的** 评估艾司洛尔控制心率对冠状动脉旁路移植术(CABG)术后冠状动脉 CT 血管成像(CCTA)中 Double-Flash 扫描模式临床应用率的影响。**方法** 研究对象为 83 例因 CABG 术后复查行 CCTA 扫描的患者,通过简单随机分配至自然心率组(A 组)、心率控制组(B 组)。B 组中,对检查前心率>65 次/min 者静脉应用艾司洛尔 5 mg 控制心率。扫描方案依据心率选择:≤65 次/min 时采用 Double-Flash 扫描模式,>65 次/min 时应用回顾性心电门控扫描模式。统计两组中 Double-Flash 扫描模式的使用频次、辐射剂量及 B 组中因艾司洛尔导致的不良反应,对所有图像质量进行诊断。**结果** A 组中 40.91%(18/44)患者应用 Double-Flash 扫描模式,显著低于 B 组 94.87%(37/39)($P$=0.02)。有效剂量(ED)和 CT 容积剂量指数(CTDIvol)A 组均显著高于 B 组[ED(17.51±0.73)mSv vs (2.88±0.64)mSv,$P$<0.001;CTDIvol(37.51±8.73)mGy vs (4.72±0.83)mGy,$P$<0.001]。B 组中未观察到艾司洛尔导致的不良药物反应。A、B 组中图像质量分布情况相仿($P$ 均>0.05)。**结论** 在 CCTA 扫描过程中对心率控制不佳者静脉应用艾司洛尔能够安全、有效地提高 Double-Flash 扫描模式的应用率,并显著降低辐射暴露,为 CABG 术后患者的无创影像学评估提供了优化、安全且高效的扫描方案。

**【关键词】** 体层摄影术;X 射线计算机;Double-Flash;冠状动脉旁路移植术;艾司洛尔
**【DOI】**10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2026.06.011

# The Impact of Esmolol on the Application of Double-Flash Scan Mode in Coronary Artery Bypass Grafting of Post-Coronary Artery Bypass Graft Patients

HE Bai[1], LIU Zinuan[2], SHAN Dongkai[2], WANG Xi[2], WANG Weiran[1], ZHAO Zaixian[1], SONG Jinyu[1], WANG Qi[2]
(1. *Department of Cardiology, The First Medical Center, Chinese PLA Hospital, Beijing* 100853, *China*; 2. *Senior Department of Cardiology, Chinese PLA Hospital, Beijing* 100048, *China*)

**【Abstract】Objective** To evaluate the impact of esmolol-induced heart rate control on the clinical utilization rate of the Double-Flash scanning mode during coronary artery computed tomography angiography (CCTA) in patients after coronary artery bypass grafting (CABG). **Methods** A total of 83 post-CABG patients undergoing CCTA for follow-up were enrolled and randomly assigned to the natural heart rate group (Group A) or the heart rate control group (Group B) using simple randomization. In Group B, patients with a pre-scan heart rate > 65 beats/min received an intravenous bolus of 5 mg esmolol to control heart rate. The scan protocol was determined by heart rate: the Double-Flash mode was used for heart rates ≤65 beats/min, whereas retrospective ECG-gated scanning was applied for heart rates >65 beats/min. The frequency of Double-Flash mode usage, radiation dose, and any adverse events related to esmolol in Group B were recorded. Image quality was assessed for all participants. **Results** The Double-Flash mode was applied in 40.91% (18/44) of patients in Group A, significantly lower than 94.87% (37/39) in Group B ($P$=0.02). Both the effective dose (ED) and volume CT dose index (CTDIvol) were significantly higher in Group A compared with Group B[ED(17.51±0.73)mSv vs (2.88±0.64)mSv, $P$<0.001; CTDIvol(37.5±8.73)mGy vs (4.72±0.83)mGy, $P$<0.001]. No adverse reactions related to esmolol administration were observed in Group B. Image quality distribution was comparable between the two groups (all $P$>0.05). **Conclusion** Intravenous administration of esmolol in patients with suboptimal heart rate control during CCTA can safely and effectively increase the application rate of the Double-Flash scanning mode, while significantly reducing radiation exposure. This provides an optimized, safe, and efficient scan protocol for noninvasive imaging evaluation in post-CABG patients.

**【Keywords】** Tomography; X-ray computed; Double-Flash; Coronary artery bypass grafting; Esmolol

**基金项目:**国家自然科学基金四大慢病重大专项(2024ZD0521704)
**通信作者:**汪奇,E-mail:doctorwq301@163.com

冠状动脉旁路移植术(coronary artery bypass grafting, CABG)作为解决复杂冠状动脉粥样硬化性心脏病的有效治疗手段,已在临床广泛开展[1-3]。然而,有研究[4-5]表明 CABG 术后仍有部分患者存在桥血管再狭窄的潜在风险,导致不良心血管事件。因此,术后评估桥血管的通畅性尤为重要。冠状动脉 CT 血管成像(coronary artery computed tomography angiography, CCTA)因其无创、高效等特点,已成为 CABG 术后首选的影像学随访工具[6-7]。然而,CABG 术后患者普遍高龄化,往往合并心率快、心律不齐,直接导致 CCTA 中运动伪影的出现,极大降低图像质量,尤其是对细小冠状动脉、桥血管及吻合口的评估可能造成误诊或漏诊。

近 50 年,多层螺旋 CT 发展迅速[8],其中,前瞻性心电门控扫描模式,特别是 Double-Flash 扫描模式已成为首选技术[6,9]。该模式基于两套 X 射线球管及对应探测器的双源 CT 系统,以超高转速在一次心动周期内完成螺旋扫描,扫描时间通常<1 s,成功"冻结"心脏,以获得高质量图像。Double-Flash 扫描模式的核心技术优势在于扫描速度极快、有效曝光时间极短、有效辐射剂量可以低至 1 mSv 以下,远低于传统 CCTA(通常 5~15 mSv),显著降低了对比剂用量和对患者屏气的要求。然而,对于 CABG 术后患者,Double-Flash 扫描模式仍然面临特殊挑战:尽管 Double-Flash 技术本身能耐受高心率,但由于桥血管(尤其是静脉桥)随心跳位移显著,为了获得无运动伪影的诊断图像,临床实践中迫切需要将心率控制在一个较低且稳定的水平;然而,此类患者常因基础心功能差、长期服用 β 受体阻滞剂等因素,导致药物控制心率的效果不佳且风险增加,常因心率及心律控制不佳导致被迫使用回顾性心电门控扫描模式,大幅增加了辐射剂量。因此,如何通过安全、有效地控制 CABG 术后患者心率及心律情况,实现前瞻性心电门控扫描模式的应用,获取低辐射、准确的评价影像成为一个亟待解决的临床问题。

艾司洛尔作为一种超短效、高选择性的 $\beta_1$ 受体阻滞剂,起效快且半衰期短,可快速、安全地降低患者心率,并减少心率波动[10-11],适用于 CCTA 这种需要短时、精准控制心率的临床应用场景,为心率处于临界值或伴有轻度心功能不全的患者提供更高的可控性和容错空间。基于此,本研究旨在探索 CABG 术后心率不佳者通过静脉应用艾司洛尔,是否能增加 Double-Flash 扫描模式的使用,以显著降低辐射剂量且不降低图像质量。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象

连续收集 2023 年 11 月—2025 年 3 月因 CABG 术后复查在中国人民解放军总医院接受 CCTA 检查的患者共计 83 例。入选标准[6]:(1)年龄>18 岁;(2)体重指数(body mass index, BMI)<30 kg/m$^2$(此标准主要基于降低高 BMI 所致射线衰减和噪声对图像质量影响的考虑)。排除标准:重度肝肾功能不全(包括估算的肾小球滤过率<30 mL·min$^{-1}$·1.73 m$^{-2}$ 的肾功能不全或 Child-Pugh 分级为 C 级的肝功能不全)、临床生命体征不稳定(包括严重心功能不全、心源性休克、急性心肌梗死等)、处于或疑似处于妊娠期、无法配合屏气或扫描指令、严重碘对比剂过敏。符合标准的患者被简单随机分为两组:A 组(自然心率组)44 例、B 组(心率控制组)39 例。B 组中对心率>65 次/min 者给予静脉推注艾司洛尔(爱络,齐鲁制药有限公司,2 mL∶0.2 g)。所有患者均于 CCTA 扫描前签署检查知情同意书。

### 1.2 检查方法

采用西门子第二代双源 CT(Somatom Definition Flash, Siemens Medical Solutions, Forchheim, Germany)完成图像采集。扫描参数:探测器准直宽度 64.0×0.6 mm,旋转时间 0.28 s,螺距 3.4,管电压根据患者 BMI 调节,范围 100~120 kV。扫描前,所有患者均接受屏气训练。对比剂选用非离子型碘对比剂碘普罗胺(370 mgI/mL)或碘帕醇(370 mgI/mL)。根据《冠状动脉 CT 血管成像扫描与报告书写专家共识》标准[12],结合既往扫描经验,将目标心率设定为 65 次/min。扫描前,对 B 组中心率>65 次/min 的患者,以生理盐水稀释 5 mg 艾司洛尔(该固定剂量基于预试验结果及既往研究[13]确定,以保证放射检查的安全性及有效性),经静脉单次推注。对 A、B 两组中心率≤65 次/min 者应用 Double-Flash 扫描模式,>65 次/min 者应用回顾性心电门控扫描模式。扫描范围均为主动脉弓上 1~2 cm 至心脏膈面下 2 cm。

回顾性心电门控扫描模式:感兴趣区域设定为主动脉根部,采用团注追踪法以 100 HU 为阈值,延迟 6 s 自动触发扫描。经肘静脉以 5 mL/s 流率先后团注对比剂 60~90 mL、生理盐水 50 mL。扫描方向自头向足。

Double-Flash 扫描模式:感兴趣区域设定为主动脉根部,循环时间以团注试验法测定,经肘静脉以 5 mL/s 流率先后团注对比剂 15 mL、生理盐水 20 mL,记录对比剂到达主动脉根部的峰值时间,在此基础上延迟 3~4 s 作为扫描延迟时间。采用前瞻性心电触发

大螺距扫描技术进行双期采集：第一期自头向足扫描，触发点为 RR 间期 60%；第二期自足向头扫描，触发点为 RR 间期 30%。对比剂注射总量为 50~70 mL，生理盐水注射总量为 50 mL，均以 5 mL/s 的相同流率先后进行注射。

辐射剂量评估包括：总剂量长度乘积（dose length product，DLP）、CT 容积剂量指数（volume CT dose index，CTDIvol）、有效剂量（effective dose，ED）。其中 ED 计算公式为：ED（mSv）= DLP（mGy·cm）×0.014。

### 1.3 图像重建及后处理

图像后处理在西门子专用工作站（Syngo. via VB10B，Siemens Healthcare，Forchheim，Germany）上进行。原始数据以 0.75 mm 层厚、B26 卷积核进行重建，以获取最佳舒张期与最佳收缩期序列用于后续诊断评估。由两位具有 5 年以上工作经验并接受过标准 CCTA 培训的心内科医师采用盲法（对扫描方案不知情）独立完成所有图像质量评估及诊断，若诊断意见存在分歧，则通过共同协商达成一致。根据既往研究[14]，对图像质量进行评价及分级，标准如下：1 分（优秀）即血管结构完整、边缘光滑清晰且无伪影，适合用于诊断；2 分（良好）即血管边缘清楚，可见轻度伪影，仍具有诊断价值；3 分（一般）即血管显示尚可，但边缘不锐利，伪影较明显，结合轴位图像有一定诊断参考价值；4 分（差）即血管边界不连续、伪影严重，无法辨识结构，无法进行诊断。信噪比（signal-to-noise ratio，SNR）的计算方法是将左、右冠状动脉的平均 CT 衰减值除以图像噪声。对比度噪声比（contrast-to-noise ratio，CNR）则定义为近端冠状动脉 CT 衰减值与左心室壁平均密度之差，再除以图像噪声[15]。

### 1.4 统计学分析

采用 SPSS 22.0（IBM，USA）软件进行数据分析。计量资料的正态性检验使用 Shapiro-Wilk 检验进行评估。其中，符合正态分布的计量资料以均数±标准差（$\bar{x}\pm s$）表示，选用独立样本 $t$ 检验进行差异性分析；偏态分布的计量资料以中位数（四分位数间距）表示，选用 Mann-Whitney $U$ 检验。计数资料以 $n$（%）表示，选用 $\chi^2$ 检验。统计学显著性水平设定为 $P<0.05$。观察者内及观察者间图像诊断的一致性采用组内相关系数（intra-class correlation coefficient，ICC）进行评价。ICC 值通过 PASS 软件（版本 21.0.3）的“组内相关性检验”模块计算。参照常规标准，ICC≥0.90 为极好，0.75≤ICC<0.90 为良好，0.50≤ICC<0.75 为一般，ICC<0.50 为较差。

为保证研究对象的随机性，采用简单随机法对样本进行选取，为每一研究对象分配唯一编号，利用计算机生成的随机数序列，将参与者的编号对应到不同的研究组中，确保随机分配过程保持盲法，研究者对分配情况不产生偏倚。

## 2 结果

### 2.1 一般临床资料

A、B 两组共计 83 例患者纳入统计分析，组间患者一般临床资料比较如表 1 所示。A 组男性占比 59.09%，平均年龄（66.72±12.11）岁，CABG 术后时间（13.41±7.54）年；B 组男性占比 58.97%，平均年龄（62.84±11.72）岁，CABG 术后时间（11.62±12.47）年，组间差异无统计学意义（$P$ 均>0.05）。在心血管危险因素方面，A、B 组间也未表现出显著差异性（$P$ 均>0.05）。虽然两组患者在检查的初始心率方面表现相近[（78.32±10.11）次/min vs（74.36±8.26）次/min，$P=0.16$]，但对 B 组心率控制不佳者进行艾司洛尔控制后，其扫描心率显著低于 A 组[（60.37±3.82）次/min vs（72.33±12.21）次/min，$P=0.02$]。

**表 1 患者一般临床资料**

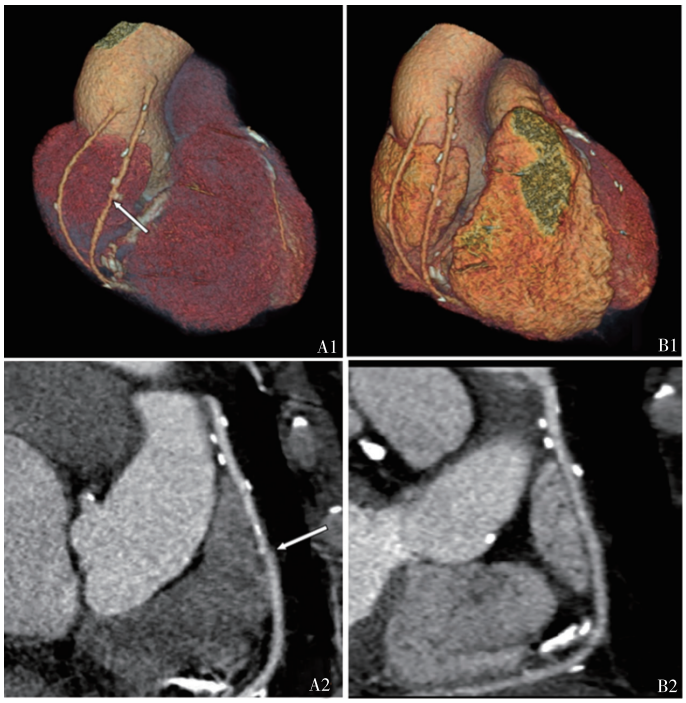
| 项目 | A 组（$n=44$） | B 组（$n=39$） | $P$ |
|---|---|---|---|
| 男性/[$n$（%）] | 26（59.09） | 23（58.97） | 0.21 |
| 年龄/岁 | 66.72±12.11 | 62.84±11.72 | 0.44 |
| BMI/（kg·m$^{-2}$） | 26.32±5.41 | 24.86±4.47 | 0.19 |
| CABG 术后时间/年 | 13.41±7.54 | 11.62±12.47 | 0.18 |
| 心血管危险因素 | | | |
| 高血压/[$n$（%）] | 21（47.73） | 23（58.97） | 0.46 |
| 糖尿病/[$n$（%）] | 19（43.18） | 24（61.54） | 0.37 |
| 高脂血症/[$n$（%）] | 24（54.55） | 17（43.59） | 0.59 |
| 吸烟史/[$n$（%）] | 23（52.27） | 19（48.72） | 0.37 |
| 冠心病家族史/[$n$（%）] | 17（38.64） | 11（28.21） | 0.43 |
| 检查心率情况 | | | |
| 初始心率/（次·min$^{-1}$） | 78.32±10.11 | 74.36±8.26 | 0.16 |
| 扫描心率/（次·min$^{-1}$） | 72.33±12.21 | 60.37±3.82 | 0.02 |

### 2.2　扫描模式应用情况

两组患者 CCTA 扫描模式应用情况如表 2 所示，Double-Flash 扫描模式示例如图 1 所示。A 组扫描模式应用情况无显著差异（Double-Flash vs 回顾性心电门控：40.91% vs 43.59%，$P=0.09$），B 组经艾司洛尔控制心率后，Double-Flash 扫描模式应用率明显高于回顾性心电门控扫描模式（94.87% vs 5.13%，$P<0.01$）。组间比较显示，B 组 Double-Flash 扫描模式应用率明显高于 A 组（94.87% vs 40.91%，$P=0.02$），而回顾性心电门控扫描模式应用率明显低于 A 组（5.13% vs 43.59%，$P=0.01$）。

**表 2　两组患者 CCTA 中不同扫描模式使用率**

| 组别 | Double-Flash | 回顾性心电门控 | *P* |
|---|---|---|---|
| A 组（$n=44$） | 18（40.91%） | 26（43.59%） | 0.09 |
| B 组（$n=39$） | 37（94.87%） | 2（5.13%） | <0.01 |
| *P* | 0.02 | 0.01 | |




注：第一次扫描后重建容积再现图像（A1）与多平面重组图像（A2）显示静脉桥血管中段充盈不佳，受金属夹伪影（箭头所示）评估受限；第二次扫描后重建容积再现图像（B1）与多平面重组图像（B2）显示静脉桥血管中段图像充盈清晰、无伪影。

**图 1　Double-Flash 扫描模式示例图**

### 2.3　不良事件发生情况

对扫描前后 B 组患者因静脉应用艾司洛尔产生的不良事件情况进行观察，未见明显支气管痉挛、心脏传导阻滞及血压过低现象发生。用药后 B 组患者血压未见明显降低（*P* 均>0.05），而心率有明显下降［用药前 vs 用药后：（74.36±8.26）次/min vs （60.37±3.82）次/min，$P=0.02$］，见表 3。

**表 3　B 组患者艾司洛尔用药前后心率及血压变化情况**

| 时间 | 心率/（次·min$^{-1}$） | 收缩压/mmHg | 舒张压/mmHg |
|---|---|---|---|
| 用药前 | 74.36±8.26 | 133.43±15.51 | 77.61±11.58 |
| 用药后 | 60.37±3.82 | 130.86±19.78 | 72.47±16.07 |
| *P* | 0.02 | 0.14 | 0.17 |

注：1 mmHg=0.133 3 kPa。

### 2.4　CCTA 图像质量评分

经诊断，A、B 组中大部分图像质量评分为 1~2 分，分别占比 88.64%、84.62%。各评分级组间差异均无统计学意义（*P* 均>0.05）（表 4）。A 组与 B 组的 SNR 分别为 12.45±3.21 和 13.02±2.98（$P=0.41$）；CNR 分别为 15.67±4.13 和 16.28±3.85（$P=0.51$）。在图像诊断中，观察者间一致性可达 0.987，观察者内一致性可达 0.991。

**表 4 两组图像质量评分**

| 组别 | 1 分 | 2 分 | 3 分 | 4 分 | SNR | CNR |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A 组($n$=44) | 28(63.64%) | 11(25.00%) | 3(6.82%) | 2(4.55%) | 12.45±3.21 | 15.67±4.13 |
| B 组($n$=39) | 24(61.54%) | 9(23.08%) | 4(10.26%) | 2(5.13%) | 13.02±2.98 | 16.28±3.85 |
| $P$ | 0.17 | 0.23 | 0.14 | 0.24 | 0.41 | 0.51 |

### 2.5 辐射剂量

两组辐射剂量如表 5 所示。B 组中辐射剂量明显低于 A 组[ED(2.88±0.64 ) mSv vs (17.51±0.73) mSv, $P$<0.001; CTDIvol (4.72±0.83) mGy vs (37.51±8.73) mGy, $P$<0.001]。

**表 5 两组辐射剂量比较**

| 组别 | ED/mSv | CTDIvol/mGy |
|---|---|---|
| A 组 | 17.51±0.73 | 37.51±8.73 |
| B 组 | 2.88±0.64 | 4.72±0.83 |
| $P$ | <0.001 | <0.001 |

## 3 讨论

本研究通过评估静脉应用艾司洛尔对 CABG 术后患者行 CCTA 时 Double-Flash 扫描模式应用率的影响,发现艾司洛尔可安全、有效地提高 Double-Flash 扫描模式的应用率,并显著减少辐射暴露,为 CABG 术后患者无创影像学评估提供了一种优化、安全且高效的扫描方案。

多项研究[11,13,16]表明,艾司洛尔作为一种超短效 $\beta_1$ 受体阻滞剂,能够快速有效地控制心率,从而提高 CCTA 图像质量并减少辐射暴露。Degertekin 等[16]对静脉注射艾司洛尔在 64 排 CCTA 前控制心率的安全性及有效性进行评价,发现艾司洛尔[平均剂量(158±55) mg]能显著降低平均心率[从(80±11) 次/min 降至(63±7) 次/min],65%的患者成功将心率控制在 65 次/min 以下。Wang 等[13]首次系统评估了疑似冠心病患者静脉应用艾司洛尔在 CCTA 前瞻性心电门控高螺距螺旋采集中的应用,证实了艾司洛尔安全有效地降低心率且辐射剂量极低[(2.28±0.02) mSv],为艾司洛尔在低剂量 CCTA 扫描中的常规应用提供了有力证据。Maurovich-Horvat 等[11]则对超短效的静脉艾司洛尔与标准治疗药物静脉美托洛尔在控制 CCTA 检查心率方面的有效性与安全性进行了直接比较,结果发现艾司洛尔在达成目标心率(≤65 次/min)方面非劣于美托洛尔,甚至显示出更优的效力(患者达标率:89% vs 78%)。相比之下,本研究进一步聚焦于 CABG 术后这一特殊人群,往往心率更快且心律不齐,评价桥血管对图像质量要求更高,因此心率控制的挑战更大,研究结果进一步强化了艾司洛尔的应用价值,表明其不仅是实现低辐射剂量的工具,更是确保对 CABG 术后患者这一高危群体进行高质量、低风险无创影像评估的关键保障。

在 CABG 术后患者中,Double-Flash 扫描模式是低辐射暴露且获取高质量图像的有力保障。与传统的 CT 扫描模式(如回顾性心电门控)相比,Flash 模式能够显著降低辐射剂量,同时在检测微小钙化和减少假阴性方面表现优异[17]。此外,高螺距双源 CT 扫描技术也被证明可以在保证影像质量的同时,显著降低辐射剂量[18]。其次,Double-Flash 扫描模式在 CABG 术后影像评估中较高的诊断准确性也已被证实。在使用高螺距双源 CT 进行 CABG 术后评估时,其诊断准确性与传统的侵入性冠状动脉造影相当[19]。与我们的研究结果一致,均支持 Double-Flash 扫描模式在 CABG 术后患者中的应用价值。而 Double-Flash 扫描模式的应用还可以扩展到其他心血管疾病的诊断和评估中。例如,在心脏移植患者的随访中,双源 CT 的应用能够在降低辐射剂量的同时,保持良好的影像质量[20];结合迭代重建算法的 BMI 适应性协议也能够进一步减少辐射暴露,同时提高影像质量[21];对冠心病患者,在双源 CT 结合双能量心肌灌注成像的诊断中也显示出较高的敏感性和特异性[22]。

本研究存在部分局限性。作为单中心研究,样本量偏小,可能限制统计效能并引入选择偏倚,未能对不同类型的桥血管进行亚组分析。且研究采用固定的艾司洛尔给药方案,未来研究可进一步优化,探索个体化控制心率的最佳给药方案及时机。因此,未来仍需开展多中心、大样本随机对照研究以验证本研究结论,并建立 CABG 术后患者低剂量 CCTA 检查的标准化临床路径。

本研究通过评估静脉应用艾司洛尔对 CABG 术后患者 CCTA 检查中 Double-Flash 扫描模式应用率的影响,发现艾司洛尔作为一种超短效 $\beta_1$ 受体阻滞剂,能迅速控制心率,使更多高心率患者满足 Double-Flash 扫描的严格要求,从而将这一超低剂量技术的应用从理想场景拓展至临床常规。最终,在不牺牲图像诊断质量的前提下,成功实现了辐射剂量的最小化。本研究证实了艾司洛尔在 CABG 术后患者 CCTA 检查中作为预处理药物的有效性,为实现个体化、低剂量的冠状动脉成像提供了重要的临床依据。

## 参 考 文 献


[1] Gulati M, Levy PD, Mukherjee D, et al. 2021 AHA/ACC/ASE/CHEST/SAEM/SCCT/SCMR guideline for the evaluation and diagnosis of chest pain: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on clinical practice guidelines[J]. Circulation, 2021, 144(22): e368-e454.

[2] Persson J, Yan J, Angerås O, et al. PCI or CABG for left main coronary artery disease: the SWEDEHEART registry[J]. Eur Heart J, 2023, 44(30): 2833-2842.

[3] Walton AJ, Pineda AM, Rogers L, et al. Review of minimally invasive coronary artery bypass grafting[J]. Eur J Cardiothorac Surg, 2025, 67(5): ezaf160.

[4] Sandner S, Redfors B, An KR, et al. Coronary artery bypass graft failure in women: incidence and clinical implications[J]. J Am Coll Cardiol, 2024, 84(2): 182-191.

[5] Alboom M, Browne A, Sheth T, et al. Conduit selection and early graft failure in coronary artery bypass surgery: a post hoc analysis of the Cardiovascular Outcomes for People Using Anticoagulation Strategies (COMPASS) coronary artery bypass grafting study[J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2022, 165(3): 1080-1089. e1.

[6] 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.

[7] Mantaj P, Hirofuji A, Dell'Aquila M, et al. Meta-analysis of coronary bypass graft patency assessment with invasive vs computed tomographic angiography[J]. Ann Thorac Surg, 2025, 120(6): 1016-1027.

[8] 张龙江, 卢光明. CT 发展 50 年: 技术变革推动医学进步[J]. 中华放射学杂志, 2024, 58(11): 1343-1347.

[9] Achenbach S, Marwan M, Ropers D, et al. Coronary computed tomography angiography with a consistent dose below 1 mSv using prospectively electrocardiogram-triggered high-pitch spiral acquisition[J]. Eur Heart J, 2010, 31(3): 340-346.

[10] Wiest DB, Haney JS. Clinical pharmacokinetics and therapeutic efficacy of esmolol[J]. Clin Pharmacokinet, 2012, 51(6): 347-356.

[11] Maurovich-Horvat P, Károlyi M, Horváth T, et al. Esmolol is noninferior to metoprolol in achieving a target heart rate of 65 beats/min in patients referred to coronary CT angiography: a randomized controlled clinical trial[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2015, 9(2): 139-145.

[12] 国家心血管病专业质控中心专家委员会, 心血管影像质控专家工作组, 金征宇. 冠状动脉 CT 血管成像扫描与报告书写专家共识[J]. 协和医学杂志, 2019, 10(1): 23-30.

[13] Wang JD, Zhang HW, Xin Q, et al. Safety and efficacy of intravenous esmolol before prospective electrocardiogram-triggered high-pitch spiral acquisition for computed tomography coronary angiography[J]. J Geriatr Cardiol, 2014, 11(1): 39-43.

[14] Brodoefel H, Reimann A, Burgstahler C, et al. Noninvasive coronary angiography using 64-slice spiral computed tomography in an unselected patient collective: effect of heart rate, heart rate variability and coronary calcifications on image quality and diagnostic accuracy[J]. Eur J Radiol, 2008, 66(1): 134-141.

[15] Bischoff B, Hein F, Meyer T, et al. Comparison of sequential and helical scanning for radiation dose and image quality: results of the Prospective Multicenter Study on Radiation Dose Estimates of Cardiac CT Angiography (PROTECTION) I Study[J]. AJR Am J Roentgenol, 2010, 194(6): 1495-1499.

[16] Degertekin M, Gemici G, Kaya Z, et al. Safety and efficacy of patient preparation with intravenous esmolol before 64-slice computed tomography coronary angiography[J]. Coron Artery Dis, 2008, 19(1): 33-36.

[17] Shu YL, Yu H, Guo DJ, et al. Comparison of chest computed tomography in Turbo FLASH mode with conventional mode for coronary artery disease screening: radiation dose, image quality, and calcium scoring performance[J]. Quant Imaging Med Surg, 2025, 15(3): 2420-2432.

[18] Koplay M, Guneyli S, Akbayrak H, et al. Diagnostic accuracy and effective radiation dose of high pitch dual source multidetector computed tomography in evaluation of coronary artery bypass graft patency[J]. Wien Klin Wochenschr, 2016, 128(13-14): 488-494.

[19] Mushtaq S, Conte E, Pontone G, et al. Interpretability of coronary CT angiography performed with a novel whole-heart coverage high-definition CT scanner in 300 consecutive patients with coronary artery bypass grafts[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2020, 14(2): 137-143.

[20] Beitzke D, Berger-Kulemann V, Schöpf V, et al. Dual-source cardiac computed tomography angiography (CCTA) in the follow-up of cardiac transplant: comparison of image quality and radiation dose using three different imaging protocols[J]. Eur Radiol, 2015, 25(8): 2310-2317.

[21] Hosch W, Stiller W, Mueller D, et al. Reduction of radiation exposure and improvement of image quality with BMI-adapted prospective cardiac computed tomography and iterative reconstruction[J]. Eur J Radiol, 2012, 81(11): 3568-3576.

[22] Zhao RP, Hao ZR, Song ZJ. Diagnostic value of Flash dual-source CT coronary artery imaging combined with dual-energy myocardial perfusion imaging for coronary heart disease[J]. Exp Ther Med, 2014, 7(4): 865-868.


收稿日期: 2025-10-21