



罗俊辉,医学博士,硕士研究生导师,副主任医师。兼任中国研究型医院学会心脏瓣膜专业委员会委员、全军心血管外科专业委员会青年委员、河南省医师协会血管外科管理委员会委员、河南省心外科委员会委员、洛阳市心血管外科专业委员会副主任委员。主要从事心血管外科临床工作,研究方向为冠状动脉疾病的外科治疗、大动脉血流动力学及流体力学。主持省级课题2项,市级课题3项。

## 糖尿病患者冠脉旁路移植手术中动脉桥的研究现状

卢圣勋,邢亚闯,罗俊辉,刘杰,何厚乐,王志强,张娜

(解放军联勤保障部队第989医院心胸外科,河南 洛阳 471031)

**摘要:**冠状动脉旁路移植术(coronary artery bypass grafting, CABG)是治疗合并糖尿病(diabetes mellitus, DM)的严重三支冠脉病变的首选方法。动脉桥由于其远期通畅率远高于静脉桥,在CABG手术中的应用越来越多,在DM患者中的使用也日益引起关注。DM对冠脉血管的影响、对拟使用的桥动脉血管质量的影响、DM患者CABG术中多支动脉桥的应用策略和方法、不同动脉桥在DM患者中的通畅率及远期疗效等是目前研究的热点。本文就动脉桥在DM患者CABG手术中的应用及研究现状进行综述,为临床合理选择血管移植术、优化手术方案、改善DM患者CABG术后长期预后提供科学依据与参考。

**关键词:**冠状动脉旁路移植术;糖尿病;动脉桥;内乳动脉;桡动脉;远期通畅率

中图分类号:R587.1;R654.2

文献标志码:A

## Diabetic patients' arterial grafts in coronary artery bypass grafting: current research status

LU Shengxun, XING Yachuang, LUO Junhui, LIU Jie, HE Houle, WANG Zhiqiang, ZHANG Na  
(Department of Cardiothoracic Surgery, The 989th Hospital of PLA Joint Logistic Support Force, Luoyang 471031, Henan, China)

**Abstract:** Coronary artery bypass grafting (CABG) is the preferred method for severe triple-vessel coronary artery disease in patients with diabetes mellitus (DM). Due to the higher long-term patency rate compared to venous grafts, arterial grafts are increasingly used in CABG procedures, and their application in DM patients has garnered increasing attention. Current research focuses on the impact of DM on coronary vessels and the quality of potential arterial graft vessels, strategies and methods for the application of multiple arterial grafts in CABG for DM patients, and the patency rates and long-term outcomes of different arterial grafts in DM patients. This article reviews the application and current research status of arterial grafts in CABG for DM patients, aiming to provide a scientific basis and reference for the rational selection of vascular grafts in clinical practice, the optimization of surgical plans, and the improvement of the long-term prognosis of DM patients after CABG surgery.

**Key words:** Coronary artery bypass grafting; Diabetes mellitus; Arterial grafts; Internal mammary artery; Radial artery; Long-term patency rate

糖尿病(diabetes mellitus, DM)是世界卫生组织认定的发病率排名第二的慢性病,在我国的总体患病率已接近12%,特别是在>60岁的群体中,患病率高达1/3<sup>[1]</sup>,不仅对个人健康构成威胁,也对社会造成医疗负担。

心血管疾病是DM的主要并发症之一。在DM患者中,心血管疾病导致的死亡约占50%,其中冠状动脉粥样硬化性心脏病导致的死亡占据了约3/4<sup>[2]</sup>。尽管经皮冠状动脉介入治疗技术和材料的进步使大量冠状动脉粥样硬化性心脏病患者获得救治,冠状动脉旁路移植术(coronary artery bypass grafting, CABG)仍然是治疗合并DM的严重三支冠脉病变的首选方法<sup>[3]</sup>。

在CABG手术中,常用的血管移植物主要包括左或右内乳动脉(left/right internal mammary artery, LIMA/RIMA)、大隐静脉(great saphenous vein, SVG)、桡动脉(radial artery, RA)、胃右网膜动脉(right gastroepiploic artery, RGEA)等。与静脉桥相比,动脉桥的远期通畅率更高。随着合并DM的冠心病患者群体趋向年轻化,传统的LIMA加SVG术式已难以满足年轻患者的长期需求,因此远期通畅率成为选择桥血管的重要标准<sup>[4-5]</sup>。目前,越来越多的研究支持动脉桥在CABG手术中的应用,特别是其在DM患者中的应用,已成为研究的重点和热点。

鉴于此,本综述旨在系统梳理动脉桥在DM患者CABG手术中的应用研究进展,分析不同动脉桥的特点、临床疗效及存在的问题,为临床合理选择血管移植物、优化手术方案、改善DM患者CABG术后长期预后提供科学依据与参考。

## 1 DM患者冠脉病变的特点

DM患者的冠脉病变普遍重于非DM患者,表现为多支、弥漫性及闭塞性病变。病变会影响到冠脉的所有血管,冠状动脉造影特征一般表现为细小、弥漫性、钙化、多血管病变<sup>[6]</sup>。DM患者的血液呈高凝倾向,易形成血栓,从而影响组织灌注及供氧作用,导致血管硬化和闭塞。与非DM患者相比,DM患者冠状动脉内的斑块通常表现为更

大的坏死核心以及主要由巨噬细胞和T淋巴细胞组成的炎症,愈合斑块破裂和过度重构的发生率更高,提示更活跃的动脉粥样硬化过程<sup>[7]</sup>。Carson等<sup>[8]</sup>一项为期5年的研究表明,在调整了社会人口等因素后,糖化血红蛋白的升高与冠脉钙化的程度呈正相关( $RR = 1.78, 95\% CI: 1.08 \sim 2.95$ ),所以DM患者冠状动脉钙化病变也更为广泛。

## 2 DM对拟使用的桥动脉血管质量的影响

作为CABG手术中拟使用的动脉桥,无论是内乳动脉(internal mammary artery, IMA)、RA,还是RGEA,都属于中小动脉。糖尿病引起的动脉粥样硬化会严重损害这些中小动脉的质量,进而降低桥血管的远期通畅率。关于这方面的研究相对较少。研究发现,DM患者的RA中血管性血友病因子和内皮素-1信使RNA水平较高,而内皮型一氧化氮合酶蛋白表达量和光密度则相对较低,这表明DM患者更容易发生内膜增生和动脉粥样硬化,但与非DM患者的管腔径相比差异无统计学意义<sup>[9]</sup>。有学者对比了83例行CABG手术患者切除的IMA和RGEA,结果显示IMA没有出现粥样硬化和中膜的钙化,而RGEA的粥样硬化发生率为8.3%,其中DM患者( $n = 34$ )的RGEA内膜增生率及粥样硬化斑块发生率高于非DM患者( $n = 49$ ),且与糖化血红蛋白水平正相关<sup>[10]</sup>。分子病理学研究表明,DM患者的IMA中硒依赖性和非依赖性谷胱甘肽过氧化物酶、谷胱甘肽还原酶和谷胱甘肽S-转移酶的特异性酶活性降低,而脂质过氧化的荧光损伤产物升高,表明糖基化、氧化剂种类和脂质过氧化醛参与了DM患者小动脉壁的病变过程<sup>[11]</sup>。总之,DM对患者的桥动脉质量有一定的影响,但对IMA的影响相对较小。RA和RGEA则需在使用前用超声或造影评估其管径和血流速度,并在术中进一步检查血管质量。

## 3 DM患者CABG手术中动脉桥使用的策略和方法

目前,在CABG手术中采用多支动脉桥乃至全

动脉化搭桥的理念越来越深入人心。具体到 DM 人群,在使用动脉桥的过程中需要采用更多的策略和方法,来达到更好的手术效果。

### 3.1 选择单支动脉桥 (single arterial grafts, SAG) 还是多支动脉搭桥 (multiple arterial grafts, MAG)

对于多支病变的冠心病患者,心肌的完全再血管化可以获得更好的近期及远期治疗效果<sup>[12]</sup>,这一点在 DM 人群中体现更明显<sup>[13-14]</sup>。但在完全再血管化的策略上,由于动脉桥的获取难度及可能的并发症风险,很多医生选择了 LIMA 加 SVG 的动静脉混合搭桥策略。然而,研究表明,相对于 SAG, MAG 能够获得更好的远期预后,尤其在 DM 患者中优势更为明显。Puskas 等<sup>[15]</sup> 研究显示,与单纯使用 LIMA 相比,接受双侧 IMA 移植的 DM 患者的 15 年心脑血管意外的发生率显著降低,长期生存率明显升高。一项多中心的研究也表明,在 DM 患者的队列中,使用 SAG 患者的 10 年死亡率高于使用 MAG 的患者 (29.9% vs. 21.5%, HR = 0.68, 95% CI: 0.51 ~ 0.91), SAG 组的心脑血管事件发生率也高于 MAG 组 (35.4% vs. 28.9%, HR = 0.80, 95% CI: 0.61 ~ 1.03), 这一结果在年轻患者中更为显著<sup>[16]</sup>。另一篇 2022 年的多中心的回顾性研究也显示,经过平均 12.6 年的随访,使用 SAG 术式的 DM 患者的死亡率为 57%, 而使用 MAG 术式的 DM 患者的死亡率为 40%<sup>[17]</sup>。Yamaguchi 等<sup>[18]</sup> 的倾向匹配分析报告和 Schwann 等<sup>[19]</sup> 的回顾性分析也得出了类似的结论。这些研究均表明,在 DM 患者中,使用 MAG 可以提高患者的远期生存率,降低心脑血管事件的发生率。因此,在 DM 患者的冠脉完全再血管化中应尽可能采用全动脉化搭桥,包括使用 Y 型吻合、序贯吻合等技术,以实现更佳的治疗效果。

### 3.2 第二动脉桥是选择 RIMA 还是 RA

在 CABG 手术中采用 MAG 搭桥策略, LIMA 做为第一动脉桥已经得到了广泛认可。然而,第二动脉桥是使用 RIMA 还是 RA, 还存在一定争议。一些研究表明, RIMA 的远期通畅率和心脑血管并发症的发生率低于 RA, 且不受竞争血流的影响; 对于低风险、预期寿命较长的患者, 使用 RIMA 可能更有利于长期生存, 因此很多研究推荐它作为第二动脉桥的首选<sup>[20-23]</sup>。然而, 也有一些研究指出, RIMA 和 RA 在远期效果上差异并无统计学意义<sup>[24-25]</sup>, 甚至在 Tranbaugh 等<sup>[26]</sup> 的研究中, 使用 RA 的患者在 1 年、5 年、10 年和 15 年生存率均高于使用 RIMA 的患者, 主要不良事件的发生率也较低

(7.6% vs. 14.0%,  $P < 0.001$ ), 这在 DM 患者人群中表现得更为明显 ( $OR = 0.32, P < 0.003$ )。但争议的双方都建议, 考虑到 RIMA 的使用通常伴随着较高的胸骨感染率, 尤其是在 DM 患者中, 可能会导致患者的早期死亡率明显升高, 因此对于 DM 患者, 推荐使用 RA 作为第二动脉桥的选择<sup>[20,26-27]</sup>。

### 3.3 移植血管的骨骼化问题

在 CABG 手术中, 使用双侧 IMA 作为桥血管时, 许多学者推荐骨骼化技术。在非 DM 患者中, 是否进行 IMA 的骨骼化主要取决于手术习惯, 研究表明, 即使不进行骨骼化, 非 DM 患者的胸骨并发症发生率与非骨骼化患者相比差异无统计学意义<sup>[28]</sup>。然而, 在 DM 患者中, IMA 的骨骼化技术可显著降低胸骨感染的风险, 即使这可能会使手术时间延长 15 ~ 20 min<sup>[29-32]</sup>。Pevni 等<sup>[33]</sup> 的一项连续队列研究表明, 在 1 000 例接受骨骼化双侧 IMA 移植的患者中, 胸骨感染率为 2.2%, 且 DM 患者和非 DM 患者之间差异无统计学意义。Matsa 等<sup>[34]</sup> 的研究也得到了相似的结论。在 DM 患者中, 由于双侧 IMA 的骨骼化技术可以做到将胸骨感染的发生率降低到与非 DM 患者相同的水平, 因此推荐在获取 IMA 时采用骨骼化技术。

同样, 当 RGEA 作为移植物时, 使用骨骼化技术也可以提高其远期的通畅率。骨骼化的 RGEA 除了能够提供更长的长度, 还能够作为游离移植物进行 Y 型或 I 型复合移植, 这进一步增加了全动脉完全心肌血运重建的可能性<sup>[35]</sup>。

### 3.4 选择停跳还是不停跳技术

目前在 DM 患者中采用不停跳 CABG (off-pump CABG, OPCAB) 技术并探讨动脉桥的通畅率及预后的研究很少, 仅 2015 年 Suzuki 等<sup>[36]</sup> 报道了 436 例 DM 患者采用 OPCAB 技术进行全动脉化搭桥, 10 年随访结果与非 DM 组没有差别。其后并无专门针对该方面的研究。停跳 CABG (on-pump CABG, ONCAB) 和 OPCAB 之争一直是 CABG 研究的热点, 一些学者认为, 在 DM 患者中 ONCAB 较 OPCAB 有着更高的远期桥血管通畅率<sup>[37]</sup>, 但另外的一些学者则认为两者没有明显差异<sup>[38-39]</sup>。2017 年在《新英格兰杂志》上发表了两个重要的关于 OPCAB 的随机对照研究结果, CORONARY 试验<sup>[40]</sup> 支持使用 OPCAB, 而 ROOBY 试验<sup>[41]</sup> 则不支持。但是在 CORONARY 试验中, DM 亚组发生终点事件的风险更低 ( $HR = 0.85, 95\% CI: 0.72 \sim 1.01, P = 0.06$ ), 提示 DM 患者更可能在 OPCAB 中获益, 但该研究并没有给出明确结论。2024 年一篇荟萃

分析纳入 13 085 例 DM 患者,并进行了倾向评分分析,OPCAB 与 ONCAB 在早期死亡率、中期生存率、心肌梗死、低心输出量和肾替代治疗方面无显著差异,OPCAB 可降低脑血管意外的发生风险及因出血而再次手术的风险( $OR=0.43, P=0.004$ ),但也与不完全再灌注的风险增加有关( $OR=2.07, P<0.000\ 01$ )<sup>[42]</sup>。尽管目前相关研究没有明确的结论,但考虑到 DM 患者的冠脉病变更复杂,完全再血管化难度高于非 DM 患者,且动脉桥的目的就是增加远期通畅率、降低再手术率,因此采用 ONCAB 手术可能会给 DM 患者带来更多益处。当然,选择何种手术方式也要根据术者习惯、操作熟练度、患者实际情况等来决定。

### 3.5 选择经胸骨搭桥手术还是微创搭桥手术

近年来,越来越多的患者接受微创冠脉旁路移植术(minimally invasive cardiac surgery coronary artery bypass grafting, MICS CABG)<sup>[43-44]</sup>。MICS CABG 手术由于不切开胸骨,比较有利于 DM 患者,但同时因该术式操作视野较小及采用 OPCAB,因此其远期效果值得关注。在 MICS CABG 中,动脉桥的使用率更高,如 LIMA 在 MICS CABG 手术中的使用比例高于经胸骨手术组。在 2024 年安贞医院发表的一项研究中,MICS CABG 组比正中开胸组更多地使用了 LIMA(98% vs. 62%)<sup>[45]</sup>。同时由于 RIMA 获取较为便捷,使用双侧 IMA 及全动脉化 MICS CABG 的比例也相对高<sup>[46-47]</sup>。Nambiar 等<sup>[47]</sup>在对 940 例(其中 DM 患者 843 例)接受了双侧 IMA 的 MICS CABG 的患者近 3 年的随访中,发现 DM 患者的伤口感染的发生率低于经胸骨手术,远期疗效则不差于经胸骨手术患者。Nisivaco 等<sup>[48]</sup>及 Tiwari 等<sup>[49]</sup>的随访结果也得出了类似的结论。因此,对于 DM 患者,全动脉化 MICS CABG 手术可以作为一个合适的选项,术中可以使用双 IMA 的原位移植,也可以使用游离 RIMA 或 RA,配合序贯吻合和 Y 型吻合技术来达到全动脉化的效果,后者包括 LIMA-RIMA 和 LIMA-RA 的吻合<sup>[43,46-49]</sup>。

## 4 不同动脉桥在 DM 患者中的通畅率及远期疗效

相关研究表明,与静脉桥相比,动脉桥在 DM 患者中有着更高的近远期通畅率<sup>[50-53]</sup>。2020 年的一项回顾性研究指出,在 1 000 例 DM 患者中,接受全动脉 CABG 的患者术中急性肾衰竭及脑血管意外的发生率低于接受常规 CABG 的患者,两组在胸

骨感染的发生率上差异无统计学意义;此外,10 年的随访结果显示,采用全动脉 CABG 手术的患者在全因病死亡率和心脑血管不良事件发生率方面均显著低于接受常规 CABG 的患者<sup>[54]</sup>。

临床上常用的动脉桥血管 LIMA、RIMA、RA、RGEA 等可以在一台 CABG 手术中通过不同的组合达到使用全动脉桥的目的,但不同的桥动脉具有不同的特性。在 DM 患者中,其近、中、远期的通畅率及临床特点也不同。

作为冠脉搭桥手术中“金标准”的 LIMA,在普通患者中的远期通畅率超过 95%<sup>[55]</sup>,在 DM 患者中,LIMA 的远期通畅率同样非常高。2017 年美国克利夫兰大学的研究显示,DM 患者的 LIMA 的远期通畅率和非 DM 患者没有差异,在术后 1、5、10、15 和 20 年的随访中,DM 患者的 LIMA 通畅率分别为 97%、97%、96%、96%和 96%,而非 DM 患者的通畅率分别为 96%、96%、95%、94%和 93%。值得注意的是,DM 患者早期 LIMA 的通畅率甚至还略高于非 DM 患者( $OR=0.63$ )<sup>[20]</sup>。这可能是由于 DM 患者的弥漫性冠状动脉血管狭窄更为严重,减少了竞争性血流,使得 LIMA 血流量相较于非 DM 患者更高,从而延迟了狭窄的发生。

RIMA 也是目前广泛应用于 CABG 手术的动脉桥,2012 年的一项临床研究指出,使用 LIMA 和 RIMA 双动脉桥的患者,其 10 年死亡率低于仅使用 LIMA 的患者,在 DM 患者中,这一趋势更为显著,死亡率降低了约 35%<sup>[15]</sup>,这表明在 DM 患者中使用 RIMA 是有益的。早期的观点认为,获取双侧 IMA(无论是否为 DM 患者)可能导致胸骨感染风险增加,但近年研究表明,在非 DM 人群中获取 RIMA 并不会显著增加胸骨感染风险,在 DM 患者中胸骨感染的风险显著增加(7.9% vs. 4.8%),特别是在胰岛素依赖的 DM 患者,其胸骨感染的发生率高达 9.6%。尽管如此,远期来看,使用双侧 IMA 带来的益处仍然显著,绝对风险降低了 8%<sup>[16]</sup>。

RA 作为常用的动脉桥,在临床应用中,术前使用 RA 进行介入导致的内皮损伤对其桥血管的近远期通畅率的影响是一个常见的问题<sup>[21]</sup>。然而,最新的研究表明,在双侧 RA 均应用于 CABG 手术的患者中(其中一侧 RA 曾进行过介入治疗),经过平均 4.3 年的随访,介入治疗过的 RA 与未介入治疗过的 RA 在通畅率上差异无统计学意义(80% vs. 82%, $OR=0.86, P>0.99$ ),超声检测也显示两组的管腔直径差异无统计学意义<sup>[55]</sup>。Buxton 等<sup>[56]</sup>研究表明,RA 的使用能够降低 DM 患者的早期死亡率,这可

能是由于 RA 的使用减少了 RIMA 的使用,从而降低了胸骨感染的比例有关。对于 DM 患者使用 RA 做为动脉桥的远期通畅率,不同临床试验的结果存在差异。Ruttmann 等<sup>[57]</sup>研究表明,在 DM 患者中,RA 的远期通畅率与非 DM 相比并无显著变化。而 Tsuneyoshi 等<sup>[58]</sup>研究则得出了相反的结论。这种差异可能与 RA 使用在哪支冠脉上有关:使用在左侧冠脉系统或存在竞争性血流的靶血管上可能导致 RA 出现暂时性的闭塞(线性征)或血栓形成,从而影响了研究结果<sup>[59]</sup>。

RGEA 在 DM 患者中的随访结果目前尚未见相关报道。

随着研究的不断深入,越来越多的证据表明,在 CABG 手术中使用动脉桥对患者的益处大,尤其是在 DM 患者获益更为显著。使用更多的动脉桥可以给 DM 患者带来更多的好处。自 2017 年开始、目前仍在进行中的全球规模最大的全动脉化搭桥的多中心、前瞻性、非盲、随机临床试验(ROMA 试验)设计了 DM 和非 DM 亚组,以观察多支动脉桥在 DM 患者中的作用<sup>[60]</sup>,并取得了较好的中期临床试验数据,预计在不久的将来会看到更多令人鼓舞的结果。

## 参考文献:

- [1] 国家老年医学中心,中华医学会老年医学分会,中国老年保健协会糖尿病专业委员会,等.中国老年糖尿病诊疗指南(2024版)[J].协和医学杂志,2024,15(4):771-800.  
National Center of Gerontology, Chinese Society of Geriatrics, Diabetes Professional Committee of Chinese Aging Well Association, et al. Guidelines for diagnosis and treatment of senile diabetes in China (2024 edition)[J]. Medical Journal of Peking Union Medical College Hospital, 2024, 15(4): 771-800.
- [2] 张健,袁戈恒.糖尿病卒中:被忽视的大血管并发症[J].中华糖尿病杂志,2020,12(11):864-869.  
ZHANG Jian, YUAN Geheng. Diabetic stroke: a neglected macrovascular complication [J]. Chinese Journal of Diabetes Mellitus, 2020, 12(11): 864-869.
- [3] Neumann FJ, Sousa-Uva M, Ahlsson A, et al. 2018 ESC/EACTS guidelines on myocardial revascularization. the task force on myocardial revascularization of the European society of cardiology (ESC) and European association for cardio-thoracic surgery (EACTS)[J]. G Ital Cardiol (Rome), 2019, 20: 1S-61S. doi:10.1714/3203.31801
- [4] Campbell PT, Newton CC, Patel AV, et al. Diabetes and cause-specific mortality in a prospective cohort of one million U.S. adults[J]. Diabetes Care, 2012, 35(9): 1835-1844.
- [5] Ferrannini G, Manca ML, Magnoni M, et al. Coronary artery disease and type 2 diabetes: a proteomic study[J]. Diabetes Care, 2020, 43(4):843-851.
- [6] Karagiannidis E, Moysidis DV, Papazoglou AS, et al. Prognostic significance of metabolomic biomarkers in patients with diabetes mellitus and coronary artery disease [J]. Cardiovasc Diabetol, 2022, 21(1): 70. doi:10.1186/s12933-022-01494-9
- [7] Yahagi K, Kolodgie FD, Lutter C, et al. Pathology of human coronary and carotid artery atherosclerosis and vascular calcification in diabetes mellitus[J]. Arterioscler Thromb Vasc Biol, 2017, 37(2): 191-204.
- [8] Carson AP, Steffes MW, Carr JJ, et al. Hemoglobin A<sub>1c</sub> and the progression of coronary artery calcification among adults without diabetes[J]. Diabetes Care, 2015, 38(1): 66-71.
- [9] Zou L, Chen XJ, Chen W, et al. Comparative study on the histomorphology and molecular biology of radial artery conduits in patients with diabetes mellitus who underwent coronary bypass surgery [J]. Diab Vasc Dis Res, 2013, 10(3): 208-215.
- [10] Nakajima T, Tachibana K, Takagi N, et al. Histomorphologic superiority of internal thoracic arteries over right gastroepiploic arteries for coronary bypass[J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2016, 151(6): 1704-1708.
- [11] Lapenna D, Ciofani G, Calafiore AM, et al. Impaired glutathione-related antioxidant defenses in the arterial tissue of diabetic patients [J]. Free Radic Biol Med, 2018, 124: 525-531. doi:10.1016/j.freeradbiomed.2018.06.033
- [12] Pasierski M, Staromłyński J, Finke J, et al. Clinical insights to complete and incomplete surgical revascularization in atrial fibrillation and multivessel coronary disease [J]. Front Cardiovasc Med, 2022, 9: 910811. doi:10.3389/fcvm.2022.910811
- [13] Misfeld M, Sandner S, Caliskan E, et al. Outcomes after surgical revascularization in diabetic patients [J]. Interdiscip Cardiovasc Thorac Surg, 2024, 38(2): ivae014. doi:10.1093/icvts/ivae014
- [14] Zimarino M, Ricci F, Romanello M, et al. Complete myocardial revascularization confers a larger clinical benefit when performed with state-of-the-art techniques in high-risk patients with multivessel coronary artery disease: a meta-analysis of randomized and observational studies[J]. Catheter Cardiovasc Interv, 2016, 87(1): 3-12.
- [15] Puskas JD, Sadiq A, Vassiliades TA, et al. Bilateral internal thoracic artery grafting is associated with significantly improved long-term survival, even among diabetic patients[J]. Ann Thorac Surg, 2012, 94(3): 710-715.

- [16] Taggart DP, Audisio K, Gerry S, et al. Single versus multiple arterial grafting in diabetic patients at 10 years: the arterial revascularization trial[J]. *Eur Heart J*, 2022, 43(44): 4644-4652.
- [17] Thuijs DJFM, Davierwala P, Milojevic M, et al. Long-term survival after coronary bypass surgery with multiple versus single arterial grafts[J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2022, 61(4): 925-933.
- [18] Yamaguchi A, Kimura N, Itoh S, et al. Efficacy of multiple arterial coronary bypass grafting in patients with diabetes mellitus[J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2016, 50(3): 520-527.
- [19] Schwann TA, El Hage Sleiman AKM, Yamine MB, et al. Incremental value of increasing number of arterial grafts: the effect of diabetes mellitus[J]. *Ann Thorac Surg*, 2018, 105(6): 1737-1744.
- [20] Raza S, Blackstone EH, Houghtaling PL, et al. Influence of diabetes on long-term coronary artery bypass graft patency[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2017, 70(5): 515-524.
- [21] Gaudino M, Yong CM, Chadow D, et al. Coronary artery bypass surgery after transradial catheterization: implementing 2021 ACC/AHA/SCAI revascularization guidelines into clinical practice[J]. *JACC Case Rep*, 2022, 4(1): 27-30.
- [22] Benedetto U, Gaudino M, Caputo M, et al. Right internal thoracic artery versus radial artery as the second best arterial conduit: insights from a meta-analysis of propensity-matched data on long-term survival[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2016, 152(4): 1083-1091.
- [23] Magouliotis DE, Fergadi MP, Zotos PA, et al. Differences in long-term survival outcomes after coronary artery bypass grafting using single vs multiple arterial grafts: a meta-analysis with reconstructed time-to-event data and subgroup analyses[J]. *Gen Thorac Cardiovasc Surg*, 2023, 71(2): 77-89.
- [24] Navia D, Vrancic M, Piccinini F, et al. Is the second internal thoracic artery better than the radial artery in total arterial off-pump coronary artery bypass grafting? A propensity score-matched follow-up study[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2014, 147(2): 632-638.
- [25] Gaudino M, Lorusso R, Rahouma M, et al. Radial artery versus right internal thoracic artery versus saphenous vein as the second conduit for coronary artery bypass surgery: a network meta-analysis of clinical outcomes[J]. *J Am Heart Assoc*, 2019, 8(2): e010839. doi:10.1161/JAHA.118.010839
- [26] Tranbaugh RF, Dimitrova KR, Lucido DJ, et al. The second best arterial graft: a propensity analysis of the radial artery versus the free right internal thoracic artery to bypass the circumflex coronary artery[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2014, 147(1): 133-140.
- [27] Tatoulis J. The radial artery in coronary surgery, 2018 [J]. *Indian J Thorac Cardiovasc Surg*, 2018, 34(Suppl 3): 234-244.
- [28] Cartier R, Leacche M, Couture P. Changing pattern in beating heart operations: use of skeletonized internal thoracic artery[J]. *Ann Thorac Surg*, 2002, 74(5): 1548-1552.
- [29] Calafiore AM, Vitolla G, Iaco AL, et al. Bilateral internal mammary artery grafting: midterm results of pedicled versus skeletonized conduits [J]. *Ann Thorac Surg*, 1999, 67(6): 1637-1642.
- [30] Galbut DL, Kurlansky PA, Traad EA, et al. Bilateral internal thoracic artery grafting improves long-term survival in patients with reduced ejection fraction: a propensity-matched study with 30-year follow-up [J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2012, 143(4): 844-853.
- [31] Benedetto U, Altman DG, Gerry S, et al. Pedicled and skeletonized single and bilateral internal thoracic artery grafts and the incidence of sternal wound complications: insights from the Arterial Revascularization Trial [J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2016, 152(1): 270-276.
- [32] Deja MA, Woś S, Gołba KS, et al. Intraoperative and laboratory evaluation of skeletonized versus pedicled internal thoracic artery[J]. *Ann Thorac Surg*, 1999, 68(6): 2164-2168.
- [33] Pevni D, Mohr R, Lev-Run O, et al. Influence of bilateral skeletonized harvesting on occurrence of deep sternal wound infection in 1, 000 consecutive patients undergoing bilateral internal thoracic artery grafting[J]. *Ann Surg*, 2003, 237(2): 277-280.
- [34] Matsa M, Paz Y, Gurevitch J, et al. Bilateral skeletonized internal thoracic artery grafts in patients with diabetes mellitus[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2001, 121(4): 668-674.
- [35] Suma H, Tanabe H, Yamada J, et al. Midterm results for use of the skeletonized gastroepiploic artery graft in coronary artery bypass [J]. *Circ J*, 2007, 71(10): 1503-1505.
- [36] Suzuki T, Asai T, Kinoshita T. Total arterial off-pump coronary artery bypass grafting was not associated with inferior outcomes for diabetic when compared with non-diabetic patients[J]. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*, 2015, 21(6): 705-711.
- [37] Shroyer ALW, Quin JA, Wagner TH, et al. Off-pump versus on-pump impact: diabetic patient 5-year coronary artery bypass clinical outcomes[J]. *Ann Thorac Surg*, 2019, 107(1): 92-98.
- [38] Xu F, Li L, Zhou CH, et al. On-pump or off-pump impact of diabetic patient undergoing coronary artery bypass grafting 5-year clinical outcomes[J]. *Rev Cardiovasc*

- Med, 2024, 25(9): 349. doi:10.31083/j.rcm2509349
- [39] Wang YS, Shi XL, Du RS, et al. Off-pump versus on-pump coronary artery bypass grafting in patients with diabetes: a meta-analysis[J]. *Acta Diabetol*, 2017, 54(3): 283-292.
- [40] Lamy AR, Devereaux PJ, Yusuf S. Five-year outcomes after off-pump or on-pump coronary-artery bypass grafting[J]. *N Engl J Med*, 2017, 376(9): 894-895.
- [41] Shroyer AL, Hattler B, Wagner TH, et al. Five-year outcomes after on-pump and off-pump coronary-artery bypass[J]. *N Engl J Med*, 2017, 377(7): 623-632.
- [42] Ren QS, Li G, Chu TX, et al. Off-pump versus on-pump coronary artery bypass grafting in diabetic patients: a meta-analysis of observational studies with a propensity-score analysis [J]. *Cardiovasc Drugs Ther*, 2024. doi:10.1007/s10557-024-07603-y
- [43] 许志锋,凌云鹏,崔仲奇,等.经左胸前外侧微创冠脉搭桥治疗冠心病多支病变[J]. *北京大学学报(医学版)*, 2020, 52(5): 863-869.  
XU Zhifeng, LING Yunpeng, CUI Zhongqi, et al. Feasibility and safety of minimally invasive cardiac coronary artery bypass grafting surgery for patients with multivessel coronary artery disease: early outcome and short-mid-term follow up results[J]. *Journal of Peking University (Health Sciences)*, 2020, 52(5): 863-869.
- [44] Zhang LF, Fu YH, Gong YC, et al. Graft patency and completeness of revascularization in minimally invasive multivessel coronary artery bypass surgery [J]. *J Card Surg*, 2021, 36(3): 992-997.
- [45] Zhao GX, Chi LQ, Liang L, et al. The efficacy of minimally invasive coronary artery bypass grafting (mics cabg) for patients with coronary artery diseases and diabetes: a single center retrospective study [J]. *J Cardiothorac Surg*, 2024, 19(1): 244. doi:10.1186/s13019-024-02717-8
- [46] Guo MH, Toubar O, Issa H, et al. Long-term survival, cardiovascular, and functional outcomes after minimally invasive coronary artery bypass grafting in 566 patients [J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2024, 168(4): 1080-1088.
- [47] Nambiar P, Kumar S, Mittal CM, et al. Outcomes of bilateral internal thoracic arteries in minimally invasive coronary artery bypass grafting with analogy to the SYN-TAX trial [J]. *Innovations*, 2019, 14(3): 227-235.
- [48] Nisivaco S, Bhasin R, Kitahara H, et al. Bilateral internal thoracic artery grafting in robotic beating-heart totally endoscopic coronary artery bypass: 10-year outcomes [J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2024, 13(4): 354-363.
- [49] Tiwari KK, Wadhawa V, Jawarkar M, et al. Total arterial multivessels minimal invasive direct coronary artery bypass grafting via left minithoracotomy [J]. *Gen Thorac Cardiovasc Surg*, 2021, 69(1): 8-13.
- [50] Flather M, Dimagli A, Benedetto U, et al. Bilateral versus single internal thoracic coronary artery bypass grafting: the ART RCT [J]. *Efficacy and Mechanism Evaluation*, 2023. doi:10.3310/JYGF5402
- [51] Farkouh ME, Domanski M, Sleeper LA, et al. Strategies for multivessel revascularization in patients with diabetes [J]. *N Engl J Med*, 2012, 367(25): 2375-2384.
- [52] Tranbaugh RF, Dimitrova KR, Friedmann P, et al. Coronary artery bypass grafting using the radial artery: clinical outcomes, patency, and need for reintervention [J]. *Circulation*, 2012, 126(Suppl 1): 170-175.
- [53] di Bacco L, Repossini A, Muneretto C, et al. Long-term outcome of total arterial myocardial revascularization versus conventional coronary artery bypass in diabetic and non-diabetic patients: a propensity-match analysis [J]. *Cardiovasc Revasc Med*, 2020, 21(5): 580-587.
- [54] Gharibeh L, Ferrari G, Ouimet M, et al. Conduits' biology regulates the outcomes of coronary artery bypass grafting [J]. *JACC Basic Transl Sci*, 2021, 6(4): 388-396.
- [55] Hamilton GW, Theuerle J, Chye D, et al. Graft patency and clinical outcomes in patients with radial artery grafts previously instrumented for cardiac catheterization [J]. *Circ Cardiovasc Interv*, 2024, 17(7): e013739. doi:10.1161/CIRCINTERVENTIONS.123.013739
- [56] Buxton BF, Shi WY, Tatoulis J, et al. Total arterial revascularization with internal thoracic and radial artery grafts in triple-vessel coronary artery disease is associated with improved survival [J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2014, 148(4): 1238-1243.
- [57] Ruttman E, Fischler N, Sakic A, et al. Second internal thoracic artery versus radial artery in coronary artery bypass grafting: a long-term, propensity score-matched follow-up study [J]. *Circulation*, 2011, 124(12): 1321-1329.
- [58] Tsuneyoshi H, Komiya T, Shimamoto T, et al. The second best arterial graft to the left coronary system in off-pump bypass surgery: a propensity analysis of the radial artery with a proximal anastomosis to the ascending aorta versus the right internal thoracic artery [J]. *Gen Thorac Cardiovasc Surg*, 2015, 63(6): 335-342.
- [59] Qureshi SH, Boulemden A, Darwin O, et al. Multiarterial coronary grafting using the radial artery as a second arterial graft: how far does the survival benefit extend? [J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2021, 61(1): 216-224.
- [60] Gaudino M, Alexander JH, Bakaeen FG, et al. Randomized comparison of the clinical outcome of single versus multiple arterial grafts: the ROMA trial-rationale and study protocol [J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2017, 52(6): 1031-1040.