

· 主题综述 ·

肾动脉狭窄介入治疗中的血流动力学评估进展

常羽茜 李昱熙 刘旭 刘志浩 张岩
(北京大学第一医院心内科, 北京 100034)

【摘要】 肾动脉狭窄是导致继发性高血压及肾功能不全的常见原因, 介入治疗是重要的治疗方法之一。既往大规模随机对照研究表明, 介入治疗相比单纯药物治疗可能无法为动脉粥样硬化性肾动脉狭窄患者带来获益, 但这些研究存在选择偏倚等缺陷, 其结论引发了广泛争议。现主要探究肾动脉狭窄的血流动力学评估方法, 总结血流动力学指导的介入治疗对患者预后的预测能力, 并对血流动力学评估下介入治疗在肾动脉狭窄患者中的应用及发展作出展望。

【关键词】 肾动脉狭窄; 介入治疗; 血流动力学; 肾脏血流储备分数

【DOI】 10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2024.03.002

Hemodynamic Evaluation in Interventional Therapy of Renal Artery Stenosis

CHANG Yuxi, LI Yuxi, LIU Xu, LIU Zhihao, ZHANG Yan

(Department of Cardiology, Peking University First Hospital, Beijing 100034, China)

【Abstract】 Renal artery stenosis is a common cause of secondary hypertension and renal insufficiency, and interventional therapy is one of the important treatment methods. Previous large-scale randomized controlled trials have shown that interventional therapy may not bring benefit for patients with atherosclerotic renal artery stenosis compared to drug therapy alone, but the conclusion has caused wide debate due to the shortcomings in these studies such as selection bias. This article mainly explores the hemodynamic evaluation methods of renal artery stenosis, summarizes the ability of hemodynamic guided interventional therapy to predict the prognosis of patients, and makes prospects for the application and development of interventional therapy under hemodynamic evaluation in patients with renal artery stenosis.

【Keywords】 Renal artery stenosis; Interventional therapy; Hemodynamics; Renal fractional flow reserve

肾动脉狭窄 (renal artery stenosis, RAS) 指各种原因引起的单侧或双侧肾动脉主干或分支狭窄, 是导致继发性高血压及肾功能不全的常见原因。RAS 按病因可分为动脉粥样硬化性肾动脉狭窄 (atherosclerotic renal artery stenosis, ARAS) 及非动脉粥样硬化性肾动脉狭窄, RAS 患病率在继发性高血压人群中为 20%; 偶然发现的 RAS 患者中, 高血压和肾功能衰竭的发生率为 65.5% 和 27.5%^[1]。目前, RAS 的主流治疗方法有药物治疗与血运重建, 药物治疗包括针对病因的药物治疗及药物降压, 血运重建主要推荐经皮腔内肾动脉成形术 (percutaneous transluminal renal angioplasty, PTR), 以经皮腔内肾动脉成形术及支架置入术 (percutaneous transluminal renal angioplasty and stenting, PTRAS) 为主^[2]。

1 RAS 介入治疗与血流动力学评估

1.1 指南推荐

ARAS 占 RAS 绝大多数, 纵观国内外指南, 介入治疗在 ARAS 中的应用时机及适应证尚无统一标准, 肾动脉血运重建策略的制定应基于充分的个体化评估, 系统评价患者的病因、解剖、病理生理, 以及预期寿命、合并症、血压控制及肾功能情况, 进而判断风险与获益。

2014 年, 美国肾动脉支架置入术专家共识^[3]将有血流动力学意义的狭窄定义为血管造影狭窄 > 70% 的严重狭窄, 或 50% ~ 70% 的中度狭窄伴静息平均压力差 > 10 mm Hg (1 mm Hg = 0.133 3 kPa)、跨病变收缩压差 > 20 mm Hg 或肾动脉远端压/近端压 ≤ 0.8 (肾内推注罂粟碱 30 mg 或多巴胺 50 μg/kg 诱发最大充血

基金项目: 中央高水平医院临床科研业务费资助 (北京大学第一医院高质量临床研究专项) (2022CR77); 中央高水平医院临床科研业务费资助 (北京大学第一医院科技成果转化孵育引导基金项目) (2022CX07)

通信作者: 张岩, E-mail: drzhy1108@163.com

状态),并提出该类 RAS 需考虑血运重建。2017 年《肾动脉狭窄的诊断和处理中国专家共识》^[2]中推荐血运重建最小阈值为肾动脉直径狭窄 50%。以往证据^[4]表明,能获益的血运重建临床指征包括:严重高血压(持续高血压 2~3 级)、恶性高血压、难治性高血压、高血压恶化或药物治疗不耐受,伴肾缺血的急性少尿或无尿性肾功能不全,突发性或一过性肺水肿,不稳定型心绞痛、左室射血分数保留的心力衰竭等。2017 年欧洲心脏病学会联合欧洲血管外科学会外周血管疾病指南^[5]指出,解剖和功能上具有显著意义的 RAS 患者在上述特定临床指征下应进行血运重建。

1.2 现有循证医学证据及争议

血管紧张素转化酶抑制剂、血管紧张素受体拮抗剂等药物改善了 RAS 患者的血压控制^[6],但存在肌酐增加^[7]等风险;血运重建可能为部分患者带来血压、肾功能改善及远期预后获益,但作为一种侵入式手段,存在一定的并发症风险且能从中获益的患者群体尚不明确。为进一步对两种治疗方式进行评估,许多临床研究在单纯药物治疗与药物联合 PTRAS 之间展开比较,主要关注治疗后患者的血压、肾功能及生存率等指标。其中,ASTRAL^[8]和 CORAL^[9]研究是对 ARAS 患者展开的大样本随机对照研究,但两项研究均指出 ARAS 患者无法从血运重建中获益。

2010 年,ASTRAL 试验^[8]发现,除舒张压在单纯药物治疗组控制更佳外,联合血运重建相比单纯药物治疗,在 5 年肾损害进展、血肌酐变化以及肾脏和心血管事件发生率等结局方面均无统计学意义差异,但血运重建的围手术期并发症发生率为 9%。因该研究纳入较多狭窄 < 70% 的患者,其结果存在争议。2014 年,CORAL 试验^[9]发现,除收缩压持续略低外,在药物治疗的基础上,PTRAS 在心血管、肾脏临床事件、全因死亡率等方面无显著获益。然而,同样因许多狭窄不严重或高血压程度较轻的患者被随机分至血运重建治疗组,且有 210 例可能存在严重 RAS 的受试者由医生撤回知情同意书而未进入随机分组,试验结果亦引发争论。此外,2009 年 STAR 试验^[10]亦显示 PTRAS 对肾功能损害改善无显著影响。

但许多小样本研究得出了不同结论。这些研究提示介入治疗能一定程度改善 RAS 患者的血压、肾功能^[11-15],从而减少抗高血压药使用、推迟肾脏替代治疗等,但由于发表时间早、纳入样本量少,无法判断其在真实世界中的应用价值。此外,一些合并前述高危临床表现的 ARAS 也被证明能从血运重建中获益^[4,16-17]。

2016 年,一项关于 RAS 管理策略有效性比较的系

统综述^[18]指出,只有低等级证据表明,药物与 PTRAS 在死亡、心血管事件、肾脏替代治疗等重要临床结局及血压控制方面均无显著的统计学差异,以及 PTRAS 可能改善肾功能并使部分尚未被明确定义的亚组患者受益。该系统综述总结了既往研究中介入治疗对各临床结局的干预结果,但也强调了基于原始证据质量等问题。因此,仍需新的研究证据来比较 RAS 不同治疗方法的有效性。

1.3 血流动力学评估的意义

越来越多的证据表明,相比单纯药物治疗,介入治疗可能无法为 RAS 患者带来普遍获益,但亦无法完全否定其在特定患者中存在的潜在优势。此外,由于单纯考虑解剖学狭窄不一定会导致高血压、慢性肾脏病等任何临床综合征,利用血运重建解决狭窄可能无法带来任何解剖学以外的功能学获益,伴随的围手术期并发症却无可避免地成为其相较单纯药物治疗的劣势之一,故解剖学狭窄程度不足以作为评判介入治疗有效性或预测血运重建能否获益的标准。

参考前述指南,目前 RAS 介入治疗时机的选择除解剖学指征,还需考虑狭窄的功能学意义。借鉴冠状动脉功能学评估经验,血流动力学评估能进一步判断狭窄带来的功能学改变,预测血流动力学改变可能导致的继发疾病或病理状态,从而对血运重建具有较高的指导意义。有研究^[19-20]表明,血流动力学指标充血状态下的收缩压差能预测 PTRAS 后的血压改善,而造影定量测量的血管狭窄则无法作出预测。此外,RADAR 研究^[21]在多普勒超声检测的血流动力学异常患者中仅观察到 PTRAS 对肾功能、血压改善的极微弱优势,但由于入组远未达到能进行统计的样本量,其结果仍需谨慎看待。

2 RAS 血流动力学评估进展

2.1 肾脏血流储备

1979 年,介入心脏病学之父 Andreas Gruentzig 发现冠状动脉介入治疗术后狭窄血管的平均压力梯度降低。1993 年,Pijls 等^[22]首次提出冠状动脉血流储备分数(fractional flow reserve,FFR)的概念,即狭窄冠状动脉供血区域心肌最大血流量与理论上同一冠状动脉无狭窄时心肌所能获得最大血流量之比,并提出该值可在冠状动脉造影时由血管内测压技术进行测定。随后,FFR 逐渐成为反映狭窄引起心肌缺血的“金标准”,用于评估狭窄严重程度并指导血运重建,人们也逐渐认识到解剖学狭窄程度与功能学心肌缺血的不匹配。鉴于只有引起心肌缺血的病变进行腔内修复才可能减轻症状、改善预后^[23],FFR 指导冠心病患者血运重建被纳入指南^[24],并被证实在真实世界

的获益与随机对照研究中一致^[25]。

借鉴冠状动脉功能学评估经验,肾脏血流储备分数(renal fractional flow reserve, rFFR)被定义为肾脏最大充血状态下狭窄肾动脉远端与近端血压的比值(Pd/Pa),rFFR 是利用专门的压力导丝,在血管内部阻塞病变两端测量压力数值。因此,其具有较好的重复性及特异性,能反映病变本身导致肾脏缺血的程度^[23]。

2.2 诱发肾脏最大充血状态的药物

如上所述,rFFR 及其他血流动力学指标的测量需诱发肾脏最大充血灌注状态,罂粟碱是应用于扩张肾血管的药物之一。罂粟碱是不依赖内皮的血管扩张剂,能诱导冠状动脉充血^[26],其固定剂量 24 ~ 32 mg 肾内注射也被用于诱导肾充血和增加肾血流量^[27-28]。有证据表明,多巴胺比罂粟碱对肾循环的作用更强,是最有力的肾血管扩张药物^[29-30];但多巴胺 50 μg/kg 肾内注射与罂粟碱 30 mg 肾内注射在诱导 rFFR 降低的血流动力学反应上无显著差异^[31]。

相似地,硝酸异山梨酯、乙酰胆碱能扩张血管^[32],非诺多泮诱发肾血流增加,皆能发挥诱导肾脏充血的作用;硝酸甘油肾内给药能降低肾内阻力,但其给药量与静息收缩压差呈高度相关性^[33]。然而,目前相关研究多将这些药物用于肾脏其他血流动力学指标的评估,针对 rFFR 的证据较少,因此,无法预估药物在 rFFR 测量中的应用效果。

2.3 肾脏血流动力学评估与狭窄程度的相关性

Subramanian 等^[28]发现,罂粟碱诱发充血后,rFFR 与病变严重程度的其他血流动力学参数(静息平均压差和充血跨病变收缩压差)相关性良好,但与血管造影测量值相关性较差;乙酰胆碱诱发充血后,上述其他血流动力学参数与目测或造影测量的狭窄严重程度亦无相关性^[32]。然而,Kadziela 等^[34]发现,罂粟碱肾内注射测得的 rFFR 与血管造影狭窄段最小管腔直径之间存在中度且统计学上显著的线性相关性。此外,多数研究表明 RAS 的血管造影分级与大多数血流动力学参数间的相关性较差^[19],仅发现乙酰胆碱诱导的跨病变压力差与血管造影测量相关^[35-36],以及静息 Pd/Pa 与造影狭窄程度显著相关^[37]。目前,针对肾脏血流动力学评估与狭窄程度关系的研究不多,但总体证据表明,二者相关性较差。

2.4 诊断界值

FFR 指导冠心病介入的界值为 0.75 ~ 0.80^[25],该值具有良好的敏感度、特异度及准确度。然而目前,能诱发肾脏充血的药物储备较少,各药物能诱发的充血程度也有限,预估 rFFR 的动态范围很可能低于

FFR。同时,冠状动脉自身调节旨在通过改变灌注压来保障血流量恒定,而肾脏则重在通过调节自身血流量来维持滤过压力的恒定^[38],因此,肾脏的流量储备低,其充血也是适度的。综上,无法将冠状动脉介入中 FFR 的界值直接应用于 RAS。

2007 年,有研究^[39]发现血压在 rFFR < 0.8 患者群体中的改善情况显著优于对照组,并提出 rFFR 未来很可能成为识别 PTRAS 获益患者的一种工具。而后,Kadziela 等^[34]指出,对狭窄 > 70% 的严重 RAS,罂粟碱诱发充血后的 rFFR 预测值为 0.8;然而,也有研究表明 rFFR < 0.8 不能作为血压^[39-40]或肾功能^[41]改善的预测指标,推测结论的差异可能因为这些研究中的跨病变压力差是由导管进行测量,其准确性低于压力导丝^[42]。Leesar 等^[20]预测的 PTRAS 术后高血压改善患者的 rFFR 切点为 0.90,预测准确度为 79%,曲线下面积为 0.85。亦有研究^[31]提出,相较无创肾脏缺血检测,rFFR ≤ 0.90 诊断动脉病变导致肾脏缺血的特异度为 100%。目前,相关研究还无法对指导血运重建的 rFFR 界值进行统一,但结论多集中在 rFFR = 0.9 或 0.8。

2.5 肾脏血流动力学评估与预后相关的研究

Mitchell 等^[39]对 17 例单侧 RAS 和难治性高血压患者用罂粟碱诱导的最大充血测量 rFFR,术后 90 d rFFR < 0.80 患者血压改善情况明显优于正常 rFFR 组。然而,Kadziela 等^[40]对 35 例 RAS 患者罂粟碱肾内给药测量 rFFR,rFFR = 0.8 为界,两组患者随访 6 个月的血压反应无差异。进一步对肾功能指标的探究^[41]仅发现肾小球滤过率的微小差异,血清胱抑素 C 和白蛋白尿均无显著差异。

目前,国内相关研究数量较少,样本量也较小。2015 年,安贞医院^[23]对 9 例中度 RAS 患者行 FFR 指导下腔内修复术的回顾性分析显示,以 rFFR ≤ 0.90 或狭窄近远端平均压差 > 20 mm Hg 作为行介入治疗的指征,术后部分患者血压可恢复正常。2022 年,何志裕等^[43]以 rFFR = 0.7 和 0.8 为界将 82 例 RAS 患者分为极低 rFFR、低 rFFR 及未测量 rFFR 组(rFFR 测量未使用血管扩张药物),3 组患者 PTRAS 术后血压、心肌酐浓度较术前均出现明显下降,极低 rFFR 组降幅最明显,而随访 12 个月心脑血管事件发生率无显著差异。2023 年,北京大学第一医院李建平教授团队在 ClinicalTrials 上注册开展 FAIR-pilot 研究(NCT05732077),旨在通过多巴胺诱导最大充血状态 rFFR 指导 ARAS 的治疗。

2.6 肾脏微循环血流动力学评估进展

对部分急性心肌梗死患者,即使行及时有效的经

皮冠状动脉介入治疗,可能仍无复流出现或出现缓血流,该现象可归因于冠状动脉微循环功能障碍,不仅导致血运重建无效,还会加重心肌缺血缺氧。同样,RAS 患者也可能因炎症激活、内皮功能障碍等机制出现肾脏微循环血流动力学改变,从而无法从针对狭窄处的血运重建中获益;因此,辨别血流阻力源于狭窄血管或肾脏微血管是有意义的^[19]。Protasiewicz 等^[44]发现,跨病变压力差预测的 RAS 血运重建下高血压改善不明显,推测源于研究纳入了较多糖尿病患者,糖尿病影响肾脏微循环并诱导高肾脏抵抗,从而影响肾脏充血。

冠状动脉微循环相关指标中,冠状动脉血流储备反映心外膜动脉和微循环的共同作用结果,FFR 反映心外膜动脉狭窄,二者结合能反映冠状动脉损伤的突出原因。同样,肾流量储备是充血与极限条件下肾内平均峰值流速的比值,反映狭窄血管和微循环共同作用的结果,而 rFFR 反映狭窄两端压力差。因此,可推测,肾流量储备与 rFFR 结合能有效评估肾血管功能,帮助识别灌注损伤的起源并预测血运重建后的临床结局;但二者测量与肾脏血管间的关系尚未确定^[19]。此外,另一指标微循环阻力指数仅能反映微循环阻力,不受心外膜血管影响,可作为介入疗效评估、预后预测的指标^[45],但尚未应用于 RAS 微循环评估。

3 展望

既往大型研究结果不支持介入治疗相比单纯药物治疗能为 ARAS 患者带来血压、肾功能方面的获益,但这些研究存在选择偏倚等缺陷,且很少将血流动力学指标纳入是否进行介入治疗的评判指标。因此,参考冠状动脉功能学评估仍旧推测,在适当的血流动力学指导下,血运重建能为 RAS 患者带来获益。目前,RAS 血流动力学评估指标及方法多来源于冠状动脉相关评估,其中,rFFR 作为评价病变生理学功能的参数,能较稳定、特异地反映狭窄造成的肾脏缺血,从而预测血运重建能带来的获益。目前,针对 rFFR 指导的血流动力学评估与患者预后之间关系的研究较少,结论缺乏一致性,且 rFFR 诊断或指导血运重建的界值尚未被统一。综上,血流动力学评估指导的血运重建很可能为 RAS 患者带来获益,但其在 RAS 中的应用证据不足,仍需进一步研究来判断风险与获益,指导治疗决策。

参考文献

- de Mast Q, Beutler JJ. The prevalence of atherosclerotic renal artery stenosis in risk groups; a systematic literature review [J]. *J Hypertens*, 2009, 27 (7): 1333-1340.
- 中国医疗保健国际交流促进会血管疾病高血压分会专家共识起草组. 肾动脉狭窄的诊断和处理中国专家共识 [J]. *中国循环杂志*, 2017, 32 (9): 835-844.
- Parikh SA, Shishehbor MH, Gray BH, et al. SCAI expert consensus statement for renal artery stenting appropriate use [J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2014, 84 (7): 1163-1171.
- Ritchie J, Green D, Chrysochou C, et al. High-risk clinical presentations in atherosclerotic renovascular disease: prognosis and response to renal artery revascularization [J]. *Am J Kidney Dis*, 2014, 63 (2): 186-197.
- Aboyans V, Ricco JB, Bartelink MEL, et al. 2017 ESC Guidelines on the Diagnosis and Treatment of Peripheral Arterial Diseases, in collaboration with the European Society for Vascular Surgery (ESVS): Document covering atherosclerotic disease of extracranial carotid and vertebral, mesenteric, renal, upper and lower extremity arteries Endorsed by: the European Stroke Organization (ESO) The Task Force for the Diagnosis and Treatment of Peripheral Arterial Diseases of the European Society of Cardiology (ESC) and of the European Society for Vascular Surgery (ESVS) [J]. *Eur Heart J*, 2018, 39 (9): 763-816.
- Evans KL, Tuttle KR, Folt DA, et al. Use of renin-angiotensin inhibitors in people with renal artery stenosis [J]. *Clin J Am Soc Nephrol*, 2014, 9 (7): 1199-1206.
- Caps MT, Perissinotto C, Zierler RE, et al. Prospective study of atherosclerotic disease progression in the renal artery [J]. *Circulation*, 1998, 98 (25): 2866-2872.
- Moneta GL. Revascularization versus medical therapy for renal-artery stenosis [J]. *Yearbook of Vascular Surgery*, 2010, 2010: 163-165.
- Cooper CJ, Murphy TP, Cutlip DE, et al. Stenting and medical therapy for atherosclerotic renal-artery stenosis [J]. *N Engl J Med*, 2014, 370 (1): 13-22.
- Bax L, Woittiez AJ, Kouwenberg HJ, et al. Stent placement in patients with atherosclerotic renal artery stenosis and impaired renal function: a randomized trial [J]. *Ann Intern Med*, 2009, 150 (12): 840-848, W150-W151.
- van de Ven PJ, Beutler JJ, Kaatee R, et al. Transluminal vascular stent for ostial atherosclerotic renal artery stenosis [J]. *Lancet*, 1995, 346 (8976): 672-674.
- Harden PN, Macleod MJ, Rodger RS, et al. Effect of renal-artery stenting on progression of renovascular renal failure [J]. *Lancet*, 1997, 349 (9059): 1133-1136.
- White CJ, Ramee SR, Collins TJ, et al. Renal artery stent placement; utility in lesions difficult to treat with balloon angioplasty [J]. *J Am Coll Cardiol*, 1997, 30 (6): 1445-1450.
- Henry M, Amor M, Henry I, et al. Stent placement in the renal artery: three-year experience with the Palmaz stent [J]. *J Vasc Interv Radiol*, 1996, 7 (3): 343-350.
- Iannone LA, Underwood PL, Nath A, et al. Effect of primary balloon expandable renal artery stents on long-term patency, renal function, and blood pressure in hypertensive and renal insufficient patients with renal artery stenosis [J]. *Catheter Cardiovasc Diagn*, 1996, 37 (3): 243-250.
- Kalra PA, Chrysochou C, Green D, et al. The benefit of renal artery stenting in patients with atheromatous renovascular disease and advanced chronic kidney disease [J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2010, 75 (1): 1-10.
- Gray BH, Olin JW, Childs MB, et al. Clinical benefit of renal artery angioplasty with stenting for the control of recurrent and refractory congestive heart failure [J]. *Vasc Med*, 2002, 7 (4): 275-279.
- Balk EM, Raman G, Adam GP, et al. Renal artery stenosis management strategies: an updated comparative effectiveness review [M]. Rockville (MD): Agency for Healthcare Research and Quality (US), 2016, Report No. 16-EHC026-EF.
- van Brussel PM, van de Hoef TP, de Winter RJ, et al. Hemodynamic measurements for the selection of patients with renal artery stenosis: a systematic review [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2017, 10 (10): 973-985.
- Leesar MA, Varma J, Shapira A, et al. Prediction of hypertension improvement

- after stenting of renal artery stenosis; comparative accuracy of translesional pressure gradients, intravascular ultrasound, and angiography [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2009, 53(25):2363-2371.
- [21] Zeller T, Kränkenberg H, Erglis A, et al. A randomized, multi-center, prospective study comparing best medical treatment versus best medical treatment plus renal artery stenting in patients with hemodynamically relevant atherosclerotic renal artery stenosis (RADAR)—One-year results of a pre-maturely terminated study [J]. *Trials*, 2017, 18(1):380.
- [22] Pijls NH, van Son JA, Kirkeeide RL, et al. Experimental basis of determining maximum coronary, myocardial, and collateral blood flow by pressure measurements for assessing functional stenosis severity before and after percutaneous transluminal coronary angioplasty [J]. *Circulation*, 1993, 87(4):1354-1367.
- [23] 郭曦, 李彭, 刘光锐, 等. 血流储备分数在肾动脉狭窄腔内修复术中的应用价值[J]. *中华心血管病杂志*, 2015, 43(5):413-417.
- [24] Levine GN, Bates ER, Blankenship JC, et al. 2011 ACCF/AHA/SCAI Guideline for Percutaneous Coronary Intervention. A report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines and the Society for Cardiovascular Angiography and Interventions [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2011, 58(24):e44-e122.
- [25] Li J, Elrashidi MY, Flammer AJ, et al. Long-term outcomes of fractional flow reserve-guided vs. angiography-guided percutaneous coronary intervention in contemporary practice [J]. *Eur Heart J*, 2013, 34(18):1375-1383.
- [26] Wilson RF, White CW. Intracoronary papaverine: an ideal coronary vasodilator for studies of the coronary circulation in conscious humans [J]. *Circulation*, 1986, 73(3):444-451.
- [27] Beregi JP, Mounier-Vehier C, Devos P, et al. Doppler flow wire evaluation of renal blood flow reserve in hypertensive patients with normal renal arteries [J]. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2000, 23(5):340-346.
- [28] Subramanian R, White CJ, Rosenfield K, et al. Renal fractional flow reserve: a hemodynamic evaluation of moderate renal artery stenoses [J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2005, 64(4):480-486.
- [29] Manoharan G, Pijls NH, Lameire N, et al. Assessment of renal flow and flow reserve in humans [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2006, 47(3):620-625.
- [30] Protasiewicz M, Początek K, Poręba R, et al. Comparison of the renal hyperemic effects of papaverine and dopamine in patients with renal artery stenosis [J]. *J Am Soc Hypertens*, 2015, 9(1):9-14.
- [31] Mangiacapra F, Trana C, Sarno G, et al. Translesional pressure gradients to predict blood pressure response after renal artery stenting in patients with renovascular hypertension [J]. *Circ Cardiovasc Interv*, 2010, 3(6):537-542.
- [32] Jones NJ, Bates ER, Chetcuti SJ, et al. Usefulness of translesional pressure gradient and pharmacological provocation for the assessment of intermediate renal artery disease [J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2006, 68(3):429-434.
- [33] Gross CM, Krämer J, Weingärtner O, et al. Determination of renal arterial stenosis severity: comparison of pressure gradient and vessel diameter [J]. *Radiology*, 2001, 220(3):751-756.
- [34] Kądziała J, Witkowski A, Januszewicz A, et al. Assessment of renal artery stenosis using both resting pressures ratio and fractional flow reserve; relationship to angiography and ultrasonography [J]. *Blood Press*, 2011, 20(4):211-217.
- [35] Kawarada O, Yokoi Y, Takemoto K, et al. The performance of renal duplex ultrasonography for the detection of hemodynamically significant renal artery stenosis [J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2006, 68(2):311-318.
- [36] Staub D, Canevascini R, Huegli RW, et al. Best duplex-sonographic criteria for the assessment of renal artery stenosis—Correlation with intra-arterial pressure gradient [J]. *Ultraschall Med*, 2007, 28(1):45-51.
- [37] Drieghe B, Madaric J, Sarno G, et al. Assessment of renal artery stenosis: side-by-side comparison of angiography and duplex ultrasound with pressure gradient measurements [J]. *Eur Heart J*, 2008, 29(4):517-524.
- [38] Loutzenhiser R, Griffin K, Williamson G, et al. Renal autoregulation: new perspectives regarding the protective and regulatory roles of the underlying mechanisms [J]. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 2006, 290(5):R1153-R1167.
- [39] Mitchell JA, Subramanian R, White CJ, et al. Predicting blood pressure improvement in hypertensive patients after renal artery stent placement; renal fractional flow reserve [J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2007, 69(5):685-689.
- [40] Kądziała J, Januszewicz A, Prejbisz A, et al. Prognostic value of renal fractional flow reserve in blood pressure response after renal artery stenting (PREFER study) [J]. *Cardiol J*, 2013, 20(4):418-422.
- [41] Kądziała J, Prejbisz A, Michałowska I, et al. Relationship between hemodynamic parameters of renal artery stenosis and the changes of kidney function after renal artery stenting in patients with hypertension and preserved renal function [J]. *Blood Press*, 2015, 24(1):30-34.
- [42] Li Y, Wen X, Zheng B, et al. Case report; combination of pressure guidewire and optical coherence tomography-guided drug-coated balloon revascularization for renal artery fibromuscular dysplasia [J]. *Front Cardiovasc Med*, 2021, 8:773563.
- [43] 何志裕, 罗碧辉, 陈爱兰, 等. 血流储备分数在肾动脉支架植入术中治疗肾动脉狭窄患者的应用价值 [J]. *岭南心血管病杂志*, 2022, 28(5):385-390.
- [44] Protasiewicz M, Kądziała J, Początek K, et al. Renal artery stenosis in patients with resistant hypertension [J]. *Am J Cardiol*, 2013, 112(9):1417-1420.
- [45] Fearon WF, Low AF, Yong AS, et al. Prognostic value of the index of microcirculatory resistance measured after primary percutaneous coronary intervention [J]. *Circulation*, 2013, 127(24):2436-2441.

收稿日期:2024-01-24