

综 述

冠状动脉CT血管成像血流储备分数应用于冠状动脉疾病的研究进展*

龙阳飞 郭 瑞 马 静*
石河子大学第二附属医院影像科
(新疆 乌鲁木齐 830000)

【摘要】冠状动脉血流储备分数(fractional flow reserve, FFR)是评价冠状动脉血管生理功能的金标准。基于冠状动脉CT血管成像的无创血流储备分数(CT-FFR)是研究冠状动脉疾病的新技术,它将计算流体力学应用于解剖数据为临床医生提供了进一步的功能评估,以指导治疗决策。目前,CT-FFR的潜力已被认识到。在这篇综述中,介绍了CT-FFR的基本原理,CT-FFR对于冠状动脉疾病的诊断效能及影响因素,限制与不足及未来发展方向。

【关键词】血流储备分数; CT-FFR;
冠状动脉疾病(CAD); 流体力学
【中图分类号】R543.3+2
【文献标识码】A
【基金项目】新疆生产建设兵团医院院级
科技计划项目基金(2022011)
DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2024.06.056

Progress in the Application of Coronary Artery CT Angiography Blood Flow Reserve Fraction in Coronary Artery Disease*

LONG Yang-fei, GUO Rui, MA Jing*
Imaging Department of the Second Affiliated Hospital of Shihezi University, Urumqi 830000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China

ABSTRACT
Coronary flow reserve (FFR) is the gold standard for evaluating the physiologic function of the coronary vasculature. Noninvasive flow reserve fraction (CT-FFR) based on coronary CT angiography is a new technique for the study of coronary artery disease, which applies computational fluid dynamics to anatomical data providing clinicians with further functional assessment to guide therapeutic decisions. The potential of CT-FFR is now recognized. In this review, the basic principles of CT-FFR, the diagnostic efficacy of CT-FFR for coronary artery disease and the factors affecting it, limitations and shortcomings, and future directions are presented.

Keywords: Blood Flow Reserve Fraction; CT-FFR; Coronary Artery Disease (CAD); Fluid Mechanics

冠状动脉疾病(coronary artery disease, CAD)作为临床上最常见的心血管疾病,其发病率仍在不断上升。临床上以有创冠脉造影(invasive coronary angiography, ICA)是作为诊断CAD的金标准。临床上常用的影像学诊断方法为冠状动脉CT血管成像(coronary CT angiography, CCTA)。目前,大量的无创性检查可用于诊断CAD,并随后对患者进行风险分层或指导血运重建选择^[1]。冠状动脉血流储备分数(fractional flow reserve, FFR)能反映冠状动脉疾病引起的血流动力学障碍,并且,FFR指导下的介入治疗能改善CAD患者的预后^[2]。基于CCTA结合计算机流体力学(CFD)得出的冠脉CT血流储备分数(CT-FFR)具有其无创与FFR相关性高的特点^[3]。与ICA-FFR相比,CT-FFR具有可进行多支血管测定及可重复性的优势^[4],弥补了CCTA诊断特异性较低的不足,更好地指导临床决策。作为无创评估冠状动脉疾病的新兴技术,CT-FFR高效安全的提供组合了的解剖学和生理学评估信息^[5]。本综述主要介绍CT-FFR的基本原理,CT-FFR对于冠状动脉疾病的诊断效能及影响因素,以及未来的发展方向及限制。

1 CT-FFR原理简述

目前,从CCTA计算FFR的方法有两种。第一种方法涉及整个冠状动脉树的三维(3D)建模,计算整个冠状动脉树的FFR值。这是一个计算要求很高的过程,需要场外超级计算机分析,这种分析被称为CT-FFR,由HeartFlow,Inc.(美国加利福尼亚州红木城)提供基于Web的服务。CT-FFR于2014年底被美国食品药品监督管理局(FDA)批准用于临床。第二种为SIEMENS Healthcare(Forchheim,德国)开发了一种简化的一维(1D)分析(CFFR),可以在现场工作站上进行,但尚未商用。由CCTA计算FFR的技术包括三个主要环节:(1)冠状动脉的解剖学建模;(2)血流的生理学建模;(3)用数值方法在计算机上求解血流控制方程。从CCTA图像中获得的冠状动脉和左心室质量的解剖模型能够计算冠状动脉中的血流量,因为静息条件下的冠状动脉血流量与心肌质量成正比。根据左室心肌质量计算的静息总血流量和三维(3D)冠脉模型中分支的数目和大小来估计每一支血管的冠脉血流量,三维(3D)模型详细描述了管腔边界,捕捉了速度向量的三个分量,并直接考虑了狭窄处的压力梯度^[6]。而CT-FFR值的计算基于Navier-Stokes方程,这是流体动力学控制方程的物理定律;其中血液被视为不可压缩的牛顿流体,在冠状动脉内具有恒定的粘度。采用Navier-Stokes方程可计算出冠状动脉血管内的流量和压力。因此,由病变所导致的管腔两端的血流动力学变化能够以数值的形式表现出来。另外,在进行侵入性测量FFR时,需要腺苷引起最大程度的冠状动脉充血,从而评估引起病变的冠状动脉下降。但是,对于CT-FFR的三维计算分析,在静息条件下进行CCTA扫描时不需要腺苷给药。

2 CT-FFR对于冠状动脉疾病的诊断效能

2.1 CT-FFR与CCTA、ICA的比较 ICA是诊断冠状动脉疾病的金标准,但是血管造影与生理性狭窄严重程度之间的相关性较差^[7],在考虑ICA或PCI之前,进行无创检查是有必要的选择。通常临床上首先选择CCTA来诊断冠状动脉疾病,但是CCTA往往会高估患者的严重程度,阳性预测率一直较低。CT-FFR作为一种结合解剖学和功能学的无创检测新技术,能够指导临床制定更好的治疗决策。Gohmann等^[8]纳入460例接受主动脉瓣置换术(TAVR)前CT检查的患者年龄(79.6±7.4岁),CT-FFR的诊断敏感度和阴性预测值分别94.9%和94.9%,CT-FFR的评估使准确率提高了3.4%,并将CAD阴性检查总数提高到43.9%(202/460)。同样,多项研究显示^[9-12],CT-FFR的特异度、阳性预测值和阴性预测值均高于CCTA,CT-FFR和CCTA的受试者操作特征曲线下面积(area under

【第一作者】龙阳飞,男,硕士研究生,主要研究方向:心血管影像诊断。E-mail: lyf20dl@163.com
【通讯作者】马 静,女,主任医师,主要研究方向:心血管影像诊断。E-mail: missingshz@163.com

curve, AUC)分别为0.84-0.90, 0.66-0.77, CT-FFR的AUC明显高于CCTA。Nørgaard等^[13]一项前瞻性多中心试验, 结果表明, CT-FFR诊断心肌缺血的敏感性和特异性分别为86%和79%, 而CCTA的敏感性和特异性分别为94%和34%, ICA的敏感性和特异性分别为64%和83%, 在中度狭窄的患者中, CT-FFR的诊断准确率仍然很高。Mesnier等^[14]纳入338例严重症状主动脉瓣狭窄患者, CCTA和CT-FFR的诊断准确率分别为66.9%和87.6%, 结果表明CT-FFR显著提高了CCTA的诊断准确率, 无需额外的检测, 并增加了可以安全避免ICA的患者比例。曹红岩等^[15]研究表明, CT-FFR的特异度明显高于CCTA(93.62% VS 46.81%)。一项前瞻性多中心临床试验纳入了366支血管中的317例冠状动脉狭窄患者^[16], 结果显示, CT-FFR和CCTA的每支血管敏感率, 特异率和准确率分别为89.9%, 87.8%, 88.8%和89.3%, 35.5%, 60.4%。在Nørgaard等^[17]的研究中, CT-FFR对比CCTA显示更好的缺血辨别能力(AUC:0.91 vs.0.71; $P=0.004$)。以上研究表明, CT-FFR对比CCTA和ICA在检测病变特异性心肌缺血有着更加良好的诊断效能。并且, 也有研究表明^[16,18], CT-FFR可能在FFR(0.75~0.80)“灰色区域”具有诊断能力。

2.2 CT-FFR在冠状动脉斑块中的应用 既往研究表明^[18], 对于钙化积分 ≥ 400 和 < 400 的两组患者, CT-FFR对其诊断效能没有显著差异。Driessen等^[19]研究显示CT-FFR对于高钙化斑块负荷患者的评估也有着一定的潜力。在斑块的定量分析中, Mrgan等^[20]评估了斑块总体积和钙化斑块、非钙化斑块和低密度非钙化斑块的体积, CT-FFR < 0.75 患者在所有斑块组分的斑块体积上都较高, 但仅对低密度非钙化斑块组分有显著意义。Mickley等^[21]对稳定性胸痛伴广泛冠状动脉钙化患者的研究发现, 钙化积分 > 399 的大多数患者的CT-FFR ≤ 0.80 。同样, Lee等^[22]人在急性冠脉综合征的调查发现, 高风险斑块的发生导致CT-FFR的值越低。乔红艳等^[23]研究表明, 斑块的进展会导致CT-FFR值的减低, CTFFR是斑块进展的重要预测因子。

2.3 CT-FFR预测的临床结局 来自国际ADVANCE登记处的5083例冠状动脉疾病患者, Patel等^[24]研究表明, 与CT-FFR > 0.80 的患者相比, CT-FFR ≤ 0.80 患者发生的心血管不良事件(包括心血管死亡或心肌梗死等)数量更多。CT-FFR > 0.80 患者的血运重建较少, 心血管不良事件发生率显著降低, 证明了CT-FFR对患者的临床结局有良好的预测作用。一项前瞻性亚组分析^[25]结果显示, CT-FFR阳性(CT-FFR ≤ 0.80)受试者较CCTA阳性(狭窄率 $\geq 50\%$)受试者其终点事件得心血管不良事件的发生率更高(73.4% vs 48.7%, $P<0.001$), 表明CT-FFR对患者预后的评估优于CCTA。血管特征研究中^[26], 总斑块体积, 钙化斑块体积, 斑块长度和管腔狭窄 $> 50\%$ 是心肌缺血的预测因子, CT-FFR联合CCTA可同时观察解剖狭窄, 评估功能水平的心肌供血, 可以更好预测患者的临床结局。

3 CT-FFR诊断冠状动脉疾病的影响因素

CT-FFR评估冠状动脉疾病中, Tsugu等^[27]研究发现当冠状动脉存在大分支冠状动脉时会导致CT-FFR值减少。一项观察性研究^[28], 将三维(3D)模型冠状动脉树的最小直径从1.2mm延长至0.8mm, 结果表明, CT-FFR的敏感率提高了16.7%。因此, 血流是否存在湍流和三维(3D)模型的冠状动脉树的直径可能会影响CT-FFR对于冠状动脉疾病的评估。Michiels等^[29]纳入了25例严重主动脉瓣狭窄(AS)患者, 测量了患者手术(SAVR)或经导管(TAVR)主动脉瓣置换术之前和之后6个月的总冠状动脉容积(V), 左心室质量(M)及其比率(V/M)和CT-FFR值。研究表明, 左心室质量下降、V/M显著增加并没有导致CT-FFR值的改变。Holmes等^[30]使用硝酸甘油硝酸甘油(NTG)诱导冠状动脉血管舒张, 增加了总冠状动脉容积(V), 结果表明, CT-FFR值并没有随着总冠状动脉容积(V)的增加而改变。因此, 冠状动脉疾病侵入性的治疗未必会影响CT-FFR对于冠状动脉的评估。然而, 冠状动脉疾病不同侵入性或者非侵入性的治疗会不会影响CT-FFR值的变化仍需要进一步研究。一项中国临床试验中^[31], 纳入了305例可评估钙化积分(CAC)的患者, CAC评分组分别为(CAC = 0, > 0 to < 100 , ≥ 100 to < 400 , and ≥ 400), 结果显示, 所有CAC评分组中, CT-FFR患者的诊断效能无统计学差异, 冠状动脉钙化对CT-FFR

诊断效能并没有显著影响。但是, 严重钙化也许会引起CT-FFR之间的较大偏差。同样, 在一项中国多中心研究中^[32], 探究了钙化弧, 钙化重塑指数(CRI)和Agatston评分(AS)对CT-FFR诊断效能的影响。结果表明, CT-FFR在不同钙化弧, CRI或AS水平的诊断准确性, 敏感性或特异性方面无统计学差异。因此, 冠状动脉钙化形态和严重程度并不会影响CT-FFR在缺血检测中的诊断性能。在李等研究中^[33], 比较了5种不同成像重建算法(FBP和ADMIRE, 强度水平为1、2、3和5)的CT-FFR值, 结果显示, FBP和ADMIRE 1、2、3和5组之间的CT-FFR(ML)值没有显著差异, 但是高迭代强度水平(ADMIRE 5)也许会对病变特异性缺血的评估产生影响。综上所述, 冠状动脉心室重构、扩张、钙化程度等重要的解剖学的改变并不会显著影响CT-FFR对于冠状动脉疾病的评估。但是, 对于冠状动脉某些生理指标是否会影响CT-FFR对冠状动脉疾病的评估需进一步研究。

4 限制与不足

CT-FFR作为非侵入性评估冠状动脉疾病的一种新兴技术, 不断更新。但是, 冠状动脉疾病的发生是诸多因素产生的结果, CT-FFR是不能完全评估冠状动脉疾病的真实状态。因此, CT-FFR仍具有其局限性。第一, 一项分析报道中^[34], CT-FFR对于介于0.75~0.80的被“灰色地带”的诊断准确率仅46%。“灰色地带”CT-FFR值的患者, 是否需要血运重建应综合考虑临床和其他功能影像学信息, 因此这项无创性功能学评估仍然存在不足。第二, CT-FFR评估冠状动脉疾病时, 只关注于冠状动脉本身。然而, 在实际临床中, 许多老年冠心病患者有着不同药物的治疗及不同侵入性治疗, 如经皮冠状动脉介入治疗或冠状动脉旁路搭桥术后等。所以, 需要大量临床研究来检测CT-FFR评估冠状动脉疾病患者有创治疗后的临床效用和安全性。第三, CT-FFR提供了解剖(即管腔狭窄和斑块)和血流动力学信息, 即只是对于冠状动脉疾病本身已有某些解剖学和血流动力学的改变进行有效评估, 然而对于有高危风险因素存在但无具体解剖学改变和血流动力学改变的患者是否发生心血管事件的评估预测存在不足。

5 未来发展方向

CT-FFR对冠状动脉疾病的诊断具有较高的诊断准确性和阴性预测价值, 与ICA-FFR相比其具有更低的风险和更低的成本。CT-FFR使用CCTA的CT数据集提供关于病变的功能重要性的信息, CT-FFR联合其他基于深度学习的其他模型来提高CT-FFR诊断冠状动脉疾病的诊断率是今后研究发展的一个方向。一些研究已经开始了这方面的尝试, 如杨等在CT-FFR中添加冠状动脉周围脂肪组织(PCAT)放射组学模型提高CT-FFR的诊断率。总之, CT-FFR作为一项诊断率较高的无创性检查手段, 也许能改变冠状动脉疾病的诊断流程, 但是仍需要进一步大量的临床数据研究及技术支撑。

参考文献

- [1] Danad I, Szymonifka J, Twisk JWR, et al. Diagnostic performance of cardiac imaging methods to diagnose ischaemia-causing coronary artery disease when directly compared with fractional flow reserve as a reference standard: a meta-analysis[J]. Eur Heart J, 2017, 38(13): 991-998.
- [2] Tonino PA, De Bruyne B, Pijls NH, et al. Fractional flow reserve versus angiography for guiding percutaneous coronary intervention[J]. N Engl J Med, 2009, 360(3): 213-224.
- [3] Kurata A, Fukuyama N, Hirai K, et al. On-site computed tomography-derived fractional flow reserve using a machine-learning algorithm - clinical effectiveness in a retrospective multicenter cohort[J]. Circ J, 2019, 83(7): 1563-1571.
- [4] Leher A, Mukherjee D. Coronary calcium risk score and cardiovascular risk[J]. Curr Vasc Pharmacol, 2021, 19(3): 280-284.
- [5] Chen J, Wetzel LH, Pope KL, et al. Current Status[J]. AJR Am J Roentgenol, 2021, 216(3): 640-648.
- [6] Nakanishi R, Budoff MJ. Noninvasive FFR derived from coronary CT angiography in the management of coronary artery disease: technology and clinical update[J]. Vasc Health Risk Manag, 2016, 12: 269-278.
- [7] Tonino PA, Fearon WF, De Bruyne B, et al. Angiographic versus functional severity of coronary artery stenoses in the FAME study fractional flow reserve versus angiography in multivessel evaluation[J]. J Am Coll Cardiol, 2010, 55(25): 2816-2821.
- [8] Gohmann RF, Pawelka K, Seitz P, et al. Combined cCTA and TAVR planning for ruling out significant CAD: added value of ML-Based CT-FFR[J]. JACC

- Cardiovasc Imaging, 2022, 15 (3): 476-486.
- [9] Koo BK, Erglis A, Doh JH, et al. Diagnosis of ischemia-causing coronary stenoses by noninvasive fractional flow reserve computed from coronary computed tomographic angiograms. Results from the prospective multicenter DISCOVER-FLOW (diagnosis of ischemia-causing stenoses obtained via noninvasive fractional flow reserve) study[J]. J Am Coll Cardiol, 2011, 58 (19): 1989-1997.
- [10] Ko BS, Cameron JD, Munnur RK, et al. Noninvasive CT-derived FFR based on structural and fluid analysis: a comparison with invasive FFR for detection of functionally significant stenosis[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2017, 10 (6): 663-673.
- [11] Kruk M, Wardziak Ł, Demkow M, et al. Workstation-based calculation of CTA-based FFR for intermediate stenosis[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2016, 9 (6): 690-699.
- [12] 申燕艳, 曾燕冲, 范金凤, 等. CT-FFR诊断冠状动脉缺血病变的价值观察[J]. 中国CT和MRI杂志, 2022, 20 (12): 76-78.
- [13] Nørgaard BL, Leipsic J, Gaur S, et al. Diagnostic performance of noninvasive fractional flow reserve derived from coronary computed tomography angiography in suspected coronary artery disease: the NXT trial (analysis of coronary blood flow using ct angiography: next steps) [J]. J Am Coll Cardiol, 2014, 63 (12): 1145-1155.
- [14] Mesnier J, Rodé s-Cabau J. CT-FFR in the TAVR work-up: optimizing the gatekeeper[J]. JACC Cardiovasc Interv, 2022, 15 (11): 1150-1152.
- [15] 曹红岩, 蔡晓航, 孙国臣. CCTA及CT-FFR评估冠脉病变特异性缺血的价值观察[J]. 中国CT和MRI杂志, 2023, 21 (5): 52-54.
- [16] Gao Y, Zhao N, Song L, et al. Diagnostic performance of CT FFR With a new parameter optimized computational fluid dynamics algorithm from the CT-FFR-CHINA trial: characteristic analysis of gray zone lesions and misdiagnosed lesions[J]. Front Cardiovasc Med, 2022, 9: 819460.
- [17] Nørgaard BL, Gaur S, Leipsic J, et al. Influence of coronary calcification on the diagnostic performance of CT angiography derived FFR in coronary artery disease: a substudy of the NXT trial[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2015, 8 (9): 1045-1055.
- [18] Tang CX, Liu CY, Lu MJ, et al. CT FFR for ischemia-specific CAD with a new computational fluid dynamics algorithm: a Chinese multicenter study[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2020, 13 (4): 980-990.
- [19] Driessen RS, Stuijffzand WJ, Raijmakers PG, et al. Effect of plaque burden and morphology on myocardial blood flow and fractional flow reserve[J]. J Am Coll Cardiol, 2018, 71 (5): 499-509.
- [20] Mrgan M, Nørgaard BL, Dey D, et al. Coronary flow impairment in asymptomatic patients with early stage type-2 diabetes: Detection by FFR (CT) [J]. Diab Vasc Dis Res, 2020, 17 (9): 1479164120958422.
- [21] Mickley H, Veien KT, Gerke O, et al. Diagnostic and clinical value of FFR (CT) in stable chest pain patients with extensive coronary calcification: the FACC study[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2022, 15 (6): 1046-1058.
- [22] Lee JM, Choi G, Koo BK, et al. Identification of high-risk plaques destined to cause acute coronary syndrome using coronary computed tomographic angiography and computational fluid dynamics [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2019, 12 (6): 1032-1043.
- [23] 乔红艳, 许棚棚, 卢佳庆, 等. 基于冠状动脉CT血管成像的斑块定量分析及血流储备分数预测斑块进展的研究[J]. 中华放射学杂志, 2020, 54 (10): 934-940.
- [24] Patel MR, Nørgaard BL, Fairbairn TA, et al. 1-Year Impact on Medical Practice and Clinical Outcomes of FFR (CT): The ADVANCE Registry[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2020, 13 (1 Pt 1): 97-105.
- [25] Ihsdayhid AR, Nørgaard BL, Gaur S, et al. Prognostic value and risk continuum of noninvasive fractional flow reserve derived from coronary CT angiography[J]. Radiology, 2019, 292 (2): 343-351.
- [26] Yongguang G, Yibing S, Ping X, et al. Diagnostic efficacy of CCTA and CT-FFR based on risk factors for myocardial ischemia[J]. J Cardiothorac Surg, 2022, 17 (1): 39.
- [27] Tsugu T, Tanaka K, Nagatomo Y, et al. Impact of ramus coronary artery on computed tomography derived fractional flow reserve (FFR (CT)) in no apparent coronary artery disease[J]. Echocardiography, 2023, 40 (2): 103-112.
- [28] Wu X, Wu B, He W, et al. Expanding the coronary tree reconstruction to smaller arteries improves the accuracy of FFR (CT) [J]. Eur Radiol, 2021, 31 (12): 8967-8974.
- [29] Michiels V, Andreini D, Conte E, et al. Long term effects of surgical and transcatheter aortic valve replacement on FFR (CT) in patients with severe aortic valve stenosis[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2022, 38 (2): 427-434.
- [30] Holmes KR, Fonte TA, Weir-McCall J, et al. Impact of sublingual nitroglycerin dosage on FFR (CT) assessment and coronary luminal volume-to-myocardial mass ratio[J]. Eur Radiol, 2019, 29 (12): 6829-6836.
- [31] Zhao N, Gao Y, Xu B, et al. Effect of coronary calcification severity on measurements and diagnostic performance of CT-FFR with computational fluid dynamics: results from CT-FFR CHINA trial[J]. Front Cardiovasc Med, 2021, 8: 810625.
- [32] Di Jiang M, Zhang XL, Liu H, et al. The effect of coronary calcification on diagnostic performance of machine learning-based CT-FFR: a Chinese multicenter study[J]. Eur Radiol, 2021, 31 (3): 1482-1493.
- [33] Li S, Chen C, Qin L, et al. The impact of iterative reconstruction algorithms on machine learning-based coronary CT angiography-derived fractional flow reserve (CT-FFR (ML)) values [J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2020, 36 (6): 1177-1185.
- [34] Cook CM, Petraco R, Shun-Shin MJ, et al. Diagnostic accuracy of computed tomography-derived fractional flow reserve: a systematic review[J]. JAMA Cardiol, 2017, 2 (7): 803-810.

(收稿日期: 2023-03-02) (校对编辑: 韩敏求)

(上接第168页)

3D SHINKEI序列评估臂丛神经损伤的不足: 由于缺乏对受损神经T2值的定量分析以及神经损伤后周围组织的干扰, 导致MRN分类中1a、1b及2类损伤特异性稍差, 但与手术相比总体一致性良好, 因此我们推荐在臂丛神经的影像报告中, 应具体描述神经的损伤类型, 这将有助于患者的病情评估, 或可对患者预后产生重要影响。

综上所述, MRN对臂丛神经损伤的定位与手术分型具有很高符合率, 其敏感度、准确度、阳性预测值均较高, 为临床早期诊断提供可靠参考。基于神经损伤影像表现的MRN分类, 与手术探查相比一致性良好, 为临床提供更多有效信息, 有望改善患者的治疗及预后。

参考文献

- [1] Noland S S, Bishop A T, Spinner R J, et al. Adult traumatic brachial plexus injuries[J]. The Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons, 2019, 27 (19): 705-716.
- [2] Marquez Neto O R, Leite M S, Freitas T, et al. The role of magnetic resonance imaging in the evaluation of peripheral nerves following traumatic lesion: where do we stand[J]. Acta Neurochirurgica, 2017, 159 (2): 281-290.
- [3] Wu K Y, Spinner R J, Shin A Y. Traumatic brachial plexus injury: diagnosis and treatment[J]. Current Opinion in Neurology, 2022, 35 (6): 708-717.
- [4] Chhabra A, Williams E H, Wang K C, et al. MR neurography of neuromas related to nerve injury and entrapment with surgical correlation[J]. AJNR American Journal of Neuroradiology, 2010, 31 (8): 1363-1368.
- [5] Yoneyama M, Takahara T, Kwee T C, et al. Rapid high resolution MR neurography with a diffusion-weighted pre-pulse[J]. Magn Reson Med Sci, 2013, 12 (2): 111-119.
- [6] Upadhyaya V, Upadhyaya D N, Kumar A, et al. MR neurography in traumatic brachial plexopathy[J]. European Journal of Radiology, 2015, 84 (5): 927-932.

- [7] 邵赛, 王姗姗, 王光彬, 等. MR三维神经鞘信号增高并背景抑制弛豫增强的快速采集成像序列在节后臂丛神经显示及临床应用的初步探讨[J]. 中华放射学杂志, 2017, 51 (1): 8-12.
- [8] 顾玉东. 臂丛神经损伤的分型与手术方案[J]. 中华手外科杂志, 2011, 27 (3): 131-133.
- [9] Howe F A, Filler A G, Bell B A, et al. Magnetic resonance neurography[J]. Magnetic Resonance in Medicine, 1992, 28 (2): 328-338.
- [10] Chhabra A, Belzberg A J, Rosson G D, et al. Impact of high resolution 3 tesla MR neurography (MRN) on diagnostic thinking and therapeutic patient management[J]. European Radiology, 2016, 26 (5): 1235-1244.
- [11] Elsakka T O, Kotb H T, Farahat A A, et al. Axial T2-DRIVE MRI myelography is highly accurate in diagnosing preganglionic traumatic brachial plexus injuries: why pseudomeningoceles should not be used as a primary diagnostic sign[J]. Clinical Radiology, 2022, 77 (5): 377-383.
- [12] Morisaki S, Kawai Y, Umeda M, et al. In vivo assessment of peripheral nerve regeneration by diffusion tensor imaging[J]. Journal of Magnetic Resonance Imaging: JMIR, 2011, 33 (3): 535-542.
- [13] 赵秋枫, 王嵩, 耿道颖, 等. 臂丛神经损伤的磁共振诊断及分型[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2011, 17 (6): 513-516.
- [14] 吴文骏, 孔祥泉, 刘定西, 等. 增强磁共振神经成像 (ceMRN) 在成人臂丛神经损伤术前评估中的价值[J]. 华中科技大学学报 (医学版), 2020, 49 (5): 618-622, 629.
- [15] Chappell K E, Robson M D, Stonebridge-Foster A, et al. Magic angle effects in MR neurography[J]. AJNR American Journal of Neuroradiology, 2004, 25 (3): 431-440.
- [16] Vargas M I, Gariani J, Delattre B A, et al. Three-dimensional MR imaging of the brachial plexus[J]. Seminars in Musculoskeletal Radiology, 2015, 19 (2): 137-148.
- [17] Belviso I, Palmeri S, Sacco A M, et al. Brachial plexus injuries in sport medicine: clinical evaluation, diagnostic approaches, treatment options, and rehabilitative interventions[J]. Journal of Functional Morphology and Kinesiology, 2020, 5 (2).
- [18] Vargas M I, Beaulieu J, Magistris M R, et al. [Clinical findings, electroneuromyography and MRI in trauma of the brachial plexus] [J]. Journal of Neuroradiology = Journal de Neuroradiologie, 2007, 34 (4): 236-242.

(收稿日期: 2023-03-22) (校对编辑: 韩敏求)