

主动脉夹层临床早期评价技术最新进展

温欢^{1,2} 张琼阁^{1,2,5} 刘金波^{1,2,5} 王宏宇^{1,2,3,4,5,6,7}

(1. 北京大学首钢医院血管医学中心, 北京 100144; 2. 北京市石景山区血管医学重点专科, 北京 100144; 3. 北京大学医学部血管健康研究中心 北京 100144; 4. 血管稳态与重构全国重点实验室(北京大学) 北京 100191; 5. 北京大学临床研究所心脏和血管健康研究中心, 北京 100191; 6. 成都医学院心脏和血管健康研究中心, 四川 成都 611730; 7. 北京大学健康医疗大数据国家研究院智慧化心脏和血管健康数字管理研究中心, 北京 100191)

【摘要】 主动脉夹层是一种严重的心血管急症, 其涉及主动脉壁结构和血流动力学改变, 死亡率极高。临床上早期监测血管功能并识别主动脉夹层, 对于改善患者的预后意义重大。目前主动脉夹层检测技术发展迅速, 为早期识别主动脉夹层, 并减少其潜在并发症的发生提供了可能。现就主动脉夹层的临床病理特点、影像学检查技术、生物标志物检查、血管功能检测技术的研究现状及进展予以综述。

【关键词】 主动脉夹层; 诊断; 影像学检查; 血管功能

【DOI】 10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2024.08.008

Early Clinical Evaluation Techniques for Aortic Dissection

WEN Huan^{1,2}, ZHANG Qiongg^{1,2,5}, LIU Jinbo^{1,2,5}, WANG Hongyu^{1,2,3,4,5,6,7}

(1. *Peking University Shougang Hospital Vascular Medical Center, Beijing 100144, China*; 2. *Beijing Shijingshan District Vascular Medicine Key Specialty, Beijing 100144, China*; 3. *Center for Vascular Health Research, Peking University School of Medicine, Beijing 100144, China*; 4. *National Key Laboratory of Vascular Homeostasis and Remodeling (Peking University), Beijing 100191, China*; 5. *Center for Heart and Vascular Health, Peking University Clinical Research Institute, Beijing 100191, China*; 6. *Heart and Vascular Health Research Center of Chengdu Medical College, Chengdu 611730, Sichuan, China*; 7. *Intelligent Heart and Vascular Health Digital Management Research Center, National Institute of Health Data Science at Peking University, Beijing 100191, China*)

【Abstract】 Aortic dissection is a serious cardiovascular emergency involving structural and hemodynamic changes in the aortic wall and a very high mortality rate. Early clinical monitoring of vascular function and identification of aortic dissection is of great significance for improving the prognosis of patients. At present, the rapid development of aortic dissection detection technology provides the possibility for early identification of aortic dissection and the reduction of its potential complications. This paper reviews the research status and progress of the clinicopathological characteristics, imaging examination technology, biomarker examination and vascular function detection technology of aortic dissection.

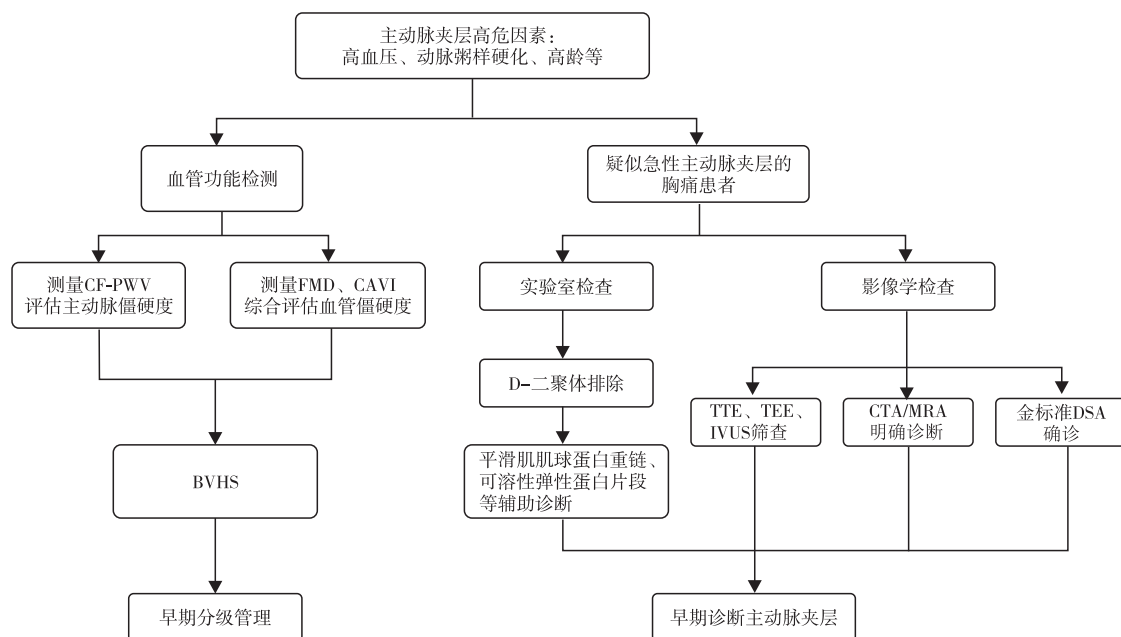
【Keywords】 Aortic dissection; Diagnosis; Imaging examination; Vascular function

主动脉夹层是心血管疾病的急危重症, 人类对主动脉夹层的认识可追溯到 18 世纪中期, 起初主动脉夹层被描述为血液通过主动脉裂隙形成的凸起^[1]。血液进入裂隙后可将主动脉血管壁分为真腔与假腔并进行顺行或逆行传播, 从而导致一系列致命并发症的发生。根据全球疾病负担项目^[2]报告, 主动脉瘤和主动脉夹层的全球总体死亡率为 2.78/10 万

人, 相较于女性, 男性更容易受到影响。急性主动脉夹层临床表现多样, 突发的剧烈胸痛是最常见的首发症状。临床上常根据主动脉夹层的起源与受累部位对主动脉夹层进行分型^[3], 主要包括 DeBakey 分型和 Stanford 分型。早期诊断对主动脉夹层患者而言至关重要, 故现对主动脉夹层的临床评价技术进行综述(图 1)。

基金项目: 首都卫生发展科研专项(自主创新)(首发 2020-2-6042); 临床重点项目建设项目(2019-Yuan-LC-01); 北京市石景山区血管医学重点专科项目(2020-2023)

通信作者: 王宏宇, E-mail: dr.hongyuwang@foxmail.com



注:CF-PWV,颈-股动脉脉搏波传导速度;FMD,血流介导的血管舒张功能;CAVI,心踝血管指数;BVHS,北京血管健康分级;TTE,经胸超声心动图;TEE,经食管超声心动图;IVUS,血管内超声;CTA,计算机体层血管成像;MRA,磁共振血管成像;DSA,数字减影血管造影。

图1 主动脉夹层早期临床评价技术流程图

1 影像学检查

1.1 计算机体层成像与计算机体层血管成像

数字减影血管造影(digital subtraction angiography, DSA)是诊断主动脉夹层的金标准^[4],但因其操作有创并且价格昂贵使用受到限制。相较于DSA而言,计算机体层成像(computed tomography, CT)操作简单并且经济实惠,可准确识别主动脉夹层、主动脉壁内血肿以及其余受累部位。计算机体层血管成像(computed tomography angiography, CTA)将静脉注射碘对比剂与CT联合运用,目前已成为评估主动脉夹层最常用的检测方法。CTA可更准确地测量主动脉环、主动脉根部、升主动脉和主动脉弓的直径与面积。CTA的敏感性和特异性均为100%,其诊断效果与DSA几乎相同^[5]。CTA还可用于主动脉夹层的治疗和治疗后评估,近年来有学者提出,将术前CTA纳入主动脉夹层术前计划中,将有利于患者外科手术的选择。Zhou等^[6]发现,基于CTA的深度学习算法,可自动预测急性主动脉夹层术后远端主动脉的重塑情况。但静脉对比剂的使用增加了患者过敏、甲状腺功能紊乱以及肾功能下降等风险。美国放射学会和国家肾脏基金会的共识^[7]声明,静脉碘对比剂使用后,肾功能下降的患者发生急性肾损伤的风险被高估。CTA也可出现假阳性结果,例如主动脉搏动的运动伪影可模拟内膜瓣或假通道。Budeanu等^[8]发现心电图门控CTA可消除部分运动伪影,改善急性主动脉夹层的诊断。三维卷积神经网络与基于金字塔场景

解析网络的二维卷积神经网络等算法,可避免发生内膜瓣的假阳性^[9]。近年来,生成对抗网络被证实可减少CTA过程中的运动伪影,但其在主动脉夹层患者CTA中的适用性有待进一步证实^[10]。

1.2 磁共振成像与磁共振血管成像

相较于CTA,磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)避免了碘对比剂的使用以及电离辐射。MRI可检测动脉血流的方向、流量与速度,帮助识别出并发症风险较高的患者,对主动脉夹层相关事件具有独立的预后价值^[11],其敏感性和特异性均为98%。四维相差磁共振成像(4D phase-contrast magnetic resonance imaging, 4D PC-MRI)相对于CTA和传统MRI,可显示整个心动周期中血流等信息^[12],适用于内脏血管灌注不良综合征和肾功能损害的患者^[13]。Kilinc等^[14]发现,压缩感应加速4D PC-MRI扫描主动脉夹层时间更短,具备临床应用潜力。Zhu等^[15]发现计算流体力学与4D PC-MRI相结合,可预测动脉夹层风险,为患者制定个体化治疗方案。但MRI由于检测环境具有幽闭性、空间分辨率较低、采集时间长,不利于对疑似急性主动脉病变患者的早期诊断。三维磁共振血管成像(3D magnetic resonance angiography, 3D MRA)利用血流流动特点对血管进行成像,其诊断主动脉夹层的敏感性与特异性与CTA相近,对碘对比剂过敏或肾功能不全而无法接受CTA检查的患者,美国放射学会适宜性标准推荐磁共振血管成像(magnetic resonance angiography, MRA)辅助评估主动

脉夹层^[16]。近年来 Kinner 等^[17]提出,动态 MRA 虽然图像质量不如 3D MRA 和 CTA,但可提供真假腔中血流流动方向、填充速度以及实质器官灌注情况等信息,可帮助制定治疗计划,但 MRA 对重症患者的病情诊断与评估意义还需进一步证实。

1.3 超声检查

目前广泛应用于临床诊断主动脉夹层的超声技术包括经胸超声心动图 (transthoracic echocardiography, TTE)、经食管超声心动图 (trans-esophageal echocardiography, TEE) 以及血管内超声 (intravascular ultrasound, IVUS) 等。TTE 可充分评估主动脉根部和近端升主动脉内膜瓣、心包积液、心脏压塞以及左心室功能等。联合主动脉夹层检测风险评估、D-二聚体、POC-TTE 的方案^[18]已被提出可作为主动脉夹层的高敏感性临床决策工具,TTE 对 A 型主动脉夹层的敏感性为 78% ~ 100% ,对 B 型主动脉夹层的敏感性为 31% ~ 55% ,且 TTE 阴性并不能排除主动脉夹层。TEE 克服了 TTE 在胸主动脉评估中的局限性,可明确主动脉夹层撕裂的位置、机制以及严重程度,为检测以及完成血管内治疗提供了可能性。Kim 等^[19]发现,TEE 可作为诊断主动脉夹层患者在心肺复苏期间心搏骤停原因的有效工具。但是,TEE 独

立诊断有误诊的可能性,可通过与 TTE 互补使用。IVUS 是一种新型的血管内成像技术,除可显示主动脉的大小、弯曲、斑块等征象外,还可识别血管内治疗的高危或禁忌证患者,为早期管理主动脉夹层患者并辅助进行血管内介入治疗提供了可能。Lortz 等^[20]发现,在 CT 图像质量较差的情况下,IVUS 对 B 型主动脉夹层的支架移植物尺寸的测量显示出对主动脉重塑的有益作用。根据最新研究^[21]表明,联合运用超声心动图与经腹血管超声,与 CTA 术中诊断主动脉夹层及分类具有高度一致性,为患者早期个体化治疗提供重要的临床意义。

2 生物标志物

主动脉夹层进展过程中伴随着一系列生物标志物的变化,表 1 总结了生物标志物在主动脉夹层病理发展、诊断及预后等方面的提示意义。生物标志物对诊断急性主动脉夹层有一定的价值与意义,但其敏感性以及特异性存在一定的局限性,单一的生物标志物难以准确鉴别主动脉夹层。虽然目前的研究表明蛋白多肽类、小分子 RNA、遗传诊断等多种生物标志物有助于主动脉夹层的早期诊断,但其临床可行性有待进一步探索。

表 1 生物标志物在主动脉夹层中的临床应用

作者	生物标志物	研究结论
Suzuki 等 ^[22]	血清 D-二聚体	血清 D-二聚体是目前用于提示急性主动脉夹层最可靠的生物标志物,对主动脉夹层检测的特异性为 40% ~ 100%。D-二聚体在急性主动脉夹层患者中显著升高,且用于排除肺栓塞的临界值 500 ng/mL 也可以可靠地排除主动脉夹层
Wang 等 ^[23]	sST2	sST2 可能是比 D-二聚体排除主动脉夹层更好的生物标志物
Peng 等 ^[24]	平滑肌肌球蛋白重链 可溶性弹性蛋白片段 PC1 D-二聚体	两种标志物的任意组合在诊断急性主动脉夹层患者上体现出高度敏感性 (94. 29%) 和特异性 (85. 37%)
Schillinger 等 ^[25]	C 反应蛋白	C 反应蛋白可作为急性主动脉夹层患者预后不良的预测因子
Du 等 ^[26]	血小板计数	血小板计数也被证实与主动脉夹层的预后相关
Takagi 等 ^[27]	MMP	MMP 可降解细胞外基质参与主动脉重塑,已被证实与急性主动脉夹层的存在有关
Song 等 ^[28]	TNF-α IL-1β CSF GF	大量炎症细胞因子包括 TNF-α、IL-1β、CSF、GF 等合成与释放,在调节主动脉夹层风险和病理发展方面的潜在作用受到广泛关注

注:sST2,可溶性生长刺激表达因子 2;PC1,多囊蛋白 1;MMP,基质金属蛋白酶;TNF-α,肿瘤坏死因子-α;IL-1β,白细胞介素-1β;CSF,集落刺激因子;GF,生长因子。

3 血管功能评估指标

近年来人们对心血管疾病的认知,已从诊断后进行治疗逐渐聚焦在早期识别危险人群并进行靶向干预的领域。AAD-RS 与 AORTAs 等急性主动脉夹层风险评分系统^[29]通过纳入家族病史、疼痛性质以及伴随

症状与体征等多项评分标准,可对急性主动脉夹层进行诊断评估。近来有研究数据^[30]表明,动脉僵硬是首次心血管事件发生的强而独立的危险因素。随着年龄的增加以及高血压的发生,人体血管硬化伴随着血管弹性功能下降,主动脉僵硬作为主动脉夹层的独立

危险因素参与主动脉夹层的进展^[31]。然而目前国际上存在的预测心血管疾病风险的评分系统,均未将直接评估血管结构与功能的指标纳入评价体系。检测并评估血管功能与僵硬,对早期识别主动脉夹层危险人群有重要意义。

3.1 肱动脉血流介导的血管舒张功能

血管内皮功能障碍与血管硬化的进展息息相关,一项对 633 例受试者的队列研究结果^[32]显示,相关激酶可通过影响血管内皮功能调控血管舒张状态,参与心血管疾病的进展。血流介导的血管舒张功能(flow-mediated dilation, FMD)是一种无创检测血管内皮功能早期异常的检查方法,可反映血流介导的内皮细胞释放一氧化氮引起的动脉扩张状态。其检测方法为,应用血管超声设备,通过检测基线及袖带阻断血流并释放后的肱动脉内径,计算肱动脉内径变化率为 FMD,即 $FMD = (\text{动脉反应性充血后内径} - \text{动脉基础内径}) / \text{动脉基础内径} \times 100\%$,一般正常值 $FMD > 10\%$ ^[33]。FMD 操作简单并可重复,2019 年 FMD 专家共识与循证建议^[34]表明, FMD 可作为识别心血管事件风险的检测工具。

3.2 脉搏波传导速度

动脉僵硬可导致靶器官结构与功能受损,从而增加心血管疾病的发病率与死亡率。脉搏波传导速度(pulse wave velocity, PWV)是动脉僵硬度的常用评估指标,可由血管超声设备或血管自动检测装置测量两个动脉节段之间的脉搏波传导距离和时间计算得到^[35]。一项纳入了 3 837 例受试者的前瞻性队列研究^[36],平均随访 10.3 年,发现主动脉 PWV 可作为评估心血管疾病风险的辅助风险标志物。欧洲心脏病学会指南^[37]证实,主动脉 PWV 是评估主动脉僵硬度的金标准,可作为预测心血管疾病的独立预测因子。PWV 可评估患者血管病变整体风险,有助于早期识别血管损伤。

3.3 心踝血管指数

2006 年 Hayashi 等^[38]首次提出,心踝血管指数(cardio-ankle vascular index, CAVI)作为评估动脉僵硬度和扩张性的检测方法,相较于 PWV 具有不受患者血压水平波动影响的优势。其检测方法为,通过仪器自动检测心踝脉搏波速度、双侧上下肢收缩压及舒张压,根据测绘仪器自动计算 CAVI,测定指标为 $CAVI = a \times [2p \times \ln(SBP/DBP) \times haPWV^2/PP] + b$ [a 和 b: 公式中的常数; p: 血液密度(常数); SBP: 收缩压; DBP: 舒张压; haPWV: 心踝脉搏波速度; PP: 脉压],正常值 < 9 ^[35]。一项多中心前瞻性队列研究^[39]表明, CAVI 作为预测因子,可评估具有心血管疾病危险因素的患者

未来心血管事件的风险。

3.4 北京血管健康分级与主动脉夹层

动脉僵硬作为心血管疾病的独立危险因素,参与了主动脉夹层等心血管事件的进展。通过检测评估血管功能与僵硬,为早期识别主动脉夹层危险人群并预防不良结局的发生提供了可能。2015 年北京大学医学部血管健康研究中心提出了北京血管健康分级(BVHS)^[40],纳入了 FMD、PWV、CAVI 等评估血管功能与结构的指标进行分级。I 级:结构与功能均正常; II 级:内皮功能障碍; III 级:动脉僵硬期; IV 级:结构性血管病变早期; V 级:结构性血管病变中期; VI 级:结构性血管病变晚期; VII 级:临床血管事件(需紧急住院)。相较于其他评分系统, BVHS 实现了对心血管疾病的早期识别与干预,帮助临床医生早期识别危险人群并根据血管健康情况对患者进行分级管理,从而降低心血管事件的发病风险,延缓疾病病程发展,提高患者预后与生活质量,有助于心血管事件预防、治疗和康复一体化, BVHS 对心血管疾病的早期干预与管理的临床实用性与成效有待进一步验证。

4 总结与展望

主动脉夹层是一种严重的心血管急症,具有高住院率、高死亡率的特点,其潜在致命并发症对患者的生存及预后产生了极大威胁,因此早期监测血管功能与早期识别主动脉夹层至关重要。随着对主动脉夹层的流行病学、病理生理以及分型等方面的认识不断深入,主动脉夹层的诊断手段以及血管功能检测手段迅速发展。影像检查技术是目前临床诊断主动脉夹层不可或缺的手段,早期监测血管功能为预防主动脉夹层引发的一系列的严重心血管事件提供了方向。相信未来会有更加有效的诊断技术及血管功能监测手段,造福更多临床主动脉夹层患者。

参考文献

- [1] Leonard JC, Thomas Beville Peacock and the early history of dissecting aneurysm [J]. *Br Med J*, 1979, 2(6184): 260-262.
- [2] Erbel R, Aboyans V, Boileau C, et al. 2014 ESC guidelines on the diagnosis and treatment of aortic diseases: document covering acute and chronic aortic diseases of the thoracic and abdominal aorta of the adult. The task force for the diagnosis and treatment of aortic diseases of the European Society of Cardiology (ESC) [J]. *Eur Heart J*, 2014, 35(41): 2873-2926.
- [3] Erbel R, Alfonso F, Boileau C, et al. Diagnosis and management of aortic dissection [J]. *Eur Heart J*, 2001, 22(18): 1642-1681.
- [4] Lyons J, Gershlick A, Norell M, et al. Intravenous digital subtraction angiography in the diagnosis and management of acute aortic dissection [J]. *Eur Heart J*, 1987, 8(2): 186-189.
- [5] Chen H, Yan S, Xie M, et al. Application of cascaded GAN based on CT scan in the diagnosis of aortic dissection [J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2022, 226: 107130.
- [6] Zhou M, Luo X, Wang X, et al. Deep learning prediction for distal aortic

- remodeling after thoracic endovascular aortic repair in Stanford type B aortic dissection[J]. *J Endovasc Ther*, 2023. DOI: 10.1177/15266028231160101.
- [7] Davenport MS, Perazella MA, Yee J, et al. Use of intravenous iodinated contrast media in patients with kidney disease; Consensus Statements from the American College of Radiology and the National Kidney Foundation[J]. *Radiology*, 2020, 294(3):660-668.
- [8] Budeanu RG, Broemmer C, Budeanu AR, et al. Comparing the diagnostic performance of ECG gated versus non-gated CT angiography in ascending aortic dissection: a GRRAS study[J]. *Tomography*, 2022, 8(5):2426-2434.
- [9] Lyu T, Yang G, Zhao X, et al. Dissected aorta segmentation using convolutional neural networks[J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2021, 211:106417.
- [10] Zhang L, Jiang B, Chen Q, et al. Motion artifact removal in coronary CT angiography based on generative adversarial networks[J]. *Eur Radiol*, 2023, 33(1):43-53.
- [11] Evangelista A, Pineda V, Guala A, et al. False lumen flow assessment by magnetic resonance imaging and long-term outcomes in uncomplicated aortic dissection[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2022, 79(24):2415-2427.
- [12] Allen BD, Aouad PJ, Burris NS, et al. Detection and hemodynamic evaluation of flap fenestrations in type B aortic dissection with 4D flow MRI: comparison with conventional MRI and CTA [J]. *Radiol Cardiothorac Imaging*, 2019, 1(1):e180009.
- [13] Chen CW, Tseng YH, Lin CC, et al. Aortic dissection assessment by 4D phase-contrast MRI with hemodynamic parameters: the impact of stent type[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2021, 11(2):490-501.
- [14] Kilinc O, Chu S, Baraboo J, et al. Hemodynamic evaluation of type B aortic dissection using compressed sensing accelerated 4D flow MRI[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2023, 57(6):1752-1763.
- [15] Zhu Y, Xu XY, Rosendahl U, et al. Advanced risk prediction for aortic dissection patients using imaging-based computational flow analysis[J]. *Clin Radiol*, 2023, 78(3):e155-e165.
- [16] Wang GX, Hedgire SS, Le TQ, et al. MR angiography can guide ED management of suspected acute aortic dissection [J]. *Am J Emerg Med*, 2017, 35(4):527-530.
- [17] Kinner S, Eggebrecht H, Maderwald S, et al. Dynamic MR angiography in acute aortic dissection[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2015, 42(2):505-514.
- [18] Hill A, Farrow R 2nd, Rusoja E, et al. Indirect signs of aortic dissection on POC-TTE despite an ADD-RS of 0 and D-dimer < 500 ng/mL [J]. *Am J Emerg Med*, 2021, 50:813. e1-813. e4.
- [19] Kim YW, Jung WJ, Cha KC, et al. Diagnosis of aortic dissection by transesophageal echocardiography during cardiopulmonary resuscitation[J]. *Am J Emerg Med*, 2021, 39:92-95.
- [20] Lortz J, Tsagakis K, Rammos C, et al. Intravascular ultrasound assisted sizing in thoracic endovascular aortic repair improves aortic remodeling in Type B aortic dissection[J]. *PloS One*, 2018, 13(4):e0196180.
- [21] Zhong W, Li K, Wang F, et al. The clinical value of echocardiography combined with transabdominal vascular ultrasound in the diagnosis of different types of aortic dissection[J]. *J Clin Ultrasound*, 2023, 51(8):1312-1317.
- [22] Suzuki T, Distant A, Zizza A, et al. Diagnosis of acute aortic dissection by D-dimer: the International Registry of Acute Aortic Dissection Substudy on Biomarkers (IRAD-Bio) experience [J]. *Circulation*, 2009, 119(20):2702-2707.
- [23] Wang Y, Tan X, Gao H, et al. Magnitude of soluble ST2 as a novel biomarker for acute aortic dissection[J]. *Circulation*, 2018, 137(3):259-269.
- [24] Peng W, Peng Z, Chai X, et al. Potential biomarkers for early diagnosis of acute aortic dissection[J]. *Heart Lung*, 2015, 44(3):205-208.
- [25] Schillinger M, Domanovits H, Bayegan K, et al. C-reactive protein and mortality in patients with acute aortic disease[J]. *Intensive Care Med*, 2002, 28(6):740-745.
- [26] Du R, Li D, Yu J, et al. Association of platelet to lymphocyte ratio and risk of in-hospital mortality in patients with type B acute aortic dissection[J]. *Am J Emerg Med*, 2017, 35(2):368-370.
- [27] Takagi H, Manabe H, Kawai N, et al. Circulating matrix metalloproteinase-9 concentrations and abdominal aortic aneurysm presence: a meta-analysis [J]. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*, 2009, 9(3):437-440.
- [28] Song J, Peng H, Lai M, et al. Relationship between inflammatory-related cytokines with aortic dissection[J]. *Int Immunopharmacol*, 2023, 122:110618.
- [29] Isselbacher EM, Preventza O, Hamilton Black J 3rd, et al. 2022 ACC/AHA guideline for the diagnosis and management of aortic disease: a report of the American Heart Association/American College of Cardiology Joint Committee on clinical practice guidelines[J]. *Circulation*, 2022, 146(24):e334-e482.
- [30] Andersson C, Naylor M, Tsao CW, et al. Framingham Heart Study: JACC focus seminar, 1/8 [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2021, 77(21):2680-2692.
- [31] Wang S, Wu J, Li X, et al. CXCR6 mediates pressure overload-induced aortic stiffness by increasing macrophage recruitment and reducing exosome-miRNA29b [J]. *J Cardiovasc Transl Res*, 2023, 16(2):271-286.
- [32] Kajikawa M, Noma K, Maruhashi T, et al. Rho-associated kinase activity is a predictor of cardiovascular outcomes[J]. *Hypertension*, 2014, 63(4):856-864.
- [33] 王宏宇. 血管衰老临床检测技术——重视血管内皮功能的评价与 Endo FIND 研究启示[J]. *中国心血管杂志*, 2021, 26(5):418-424.
- [34] Thijssen DHJ, Bruno RM, van Mil ACCM, et al. Expert consensus and evidence-based recommendations for the assessment of flow-mediated dilation in humans [J]. *Eur Heart J*, 2019, 40(30):2534-2547.
- [35] 中国医药教育协会血管医学专业委员会, 中华医学会北京心血管病学会血管专业学组, 北京大学医学部血管疾病社区防治中心. 中国血管健康评估系统应用指南(2018 第三次报告) [J]. *中华医学杂志*, 2018, 98(37):2955-2967.
- [36] Valencia-Hernández CA, Lindbohm JV, Shipley MJ, et al. Aortic pulse wave velocity as adjunct risk marker for assessing cardiovascular disease risk: prospective study[J]. *Hypertension*, 2022, 79(4):836-843.
- [37] Covic A, Siriopol D. Pulse wave velocity ratio: the new “gold standard” for measuring arterial stiffness[J]. *Hypertension*, 2015, 65(2):289-290.
- [38] Hayashi K, Yamamoto T, Takahara A, et al. Clinical assessment of arterial stiffness with cardio-ankle vascular index: theory and applications [J]. *J Hypertens*, 2015, 33(9):1742-1757.
- [39] Miyoshi T, Ito H, Shirai K, et al. Predictive value of the cardio-ankle vascular index for cardiovascular events in patients at cardiovascular risk[J]. *J Am Heart Assoc*, 2021, 10(16):e020103.
- [40] 蒋姗姗, 王宏宇. 基于北京血管健康分级指导的智能化全生命周期心脏和血管健康管理[J]. *中华临床医师杂志(电子版)*, 2019, 13(11):868-871.

收稿日期:2024-02-24