

基于影像的计算流体力学在主动脉缩窄评估中的研究进展



全文二维码

秦津洁^{1,2} 何玲^{1,2}

¹ 重庆医科大学附属儿童医院放射科, 重庆 400014; ² 儿童发育疾病研究教育部重点实验室, 国家儿童健康与疾病临床医学研究中心, 儿童发育重大疾病国家国际科技合作基地, 儿科学重庆市重点实验室, 重庆 400014

通信作者: 何玲, Email: Heling508@sina.com

【摘要】 主动脉缩窄是指胸主动脉降段一定程度狭窄, 是儿童较常见的先天性心脏病。现有多种诊断标准均基于计算影像学上主动脉不同层面直径之间的比例关系评估主动脉缩窄, 不能充分反映主动脉血流动力学状态, 不利于制定最佳的个体化手术方案。心导管测压虽然可以充分反映主动脉整体血流动力学变化, 但是一种侵入性检查, 不作为临床首选, 因此临床亟需一种无创方式可视化评估患儿复杂的血流动力学变化。近年来, 基于影像学资料的计算流体力学通过医工结合的方法计算血管的血流动力学指标, 在成人血管性疾病中已崭露头角, 有望为主动脉缩窄的诊断及治疗提供一种准确且无创的评价方法。本文将阐述基于影像的计算流体力学在主动脉缩窄无创评估中的研究进展。

【关键词】 主动脉缩窄; 计算流体力学; 壁剪切应力; 人工智能

基金项目: 重庆市科卫联合医学科研项目 (2020FYYX128); 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目 (CSTC2021jscx-gksb-N0018)

DOI: 10.3760/cma.j.cn101785-202201038-014

Research advances in assessing aortic coarctation by image-based computational fluid dynamics

Qin Jinjie^{1,2}, He Ling^{1,2}

¹ Department of Radiology, Affiliated Children's Hospital, Chongqing Medical University, Chongqing 400014, China; ² Ministry of Education Key Laboratory of Child Development & Disorders; National Clinical Research Center for Child Health & Disorders; China International Science & Technology Cooperation Base of Child Development & Critical Disorders; Chongqing Key Laboratory of Pediatrics, Chongqing 400014, China

Corresponding author: HE Ling, Email: heling508@sina.com

【Abstract】 Aortic coarctation (CoA) refers to a narrowing of descending thoracic aorta. Various existing diagnostic parameters have indicated that single geometric phenomena such as morphological diameter or proportion fails to reflect the full view of aorta and formulate an optimal surgical plan. Although cardiac catheterization may reflect the overall hemodynamic changes of aorta, such an invasive mode is not a first clinical choice. A non-invasive mode of visually evaluating complex hemodynamic changes is urgently needed. In recent years, computational fluid dynamics (CFD) has been widely applied in vascular diseases for its highly accurate and non-invasive hemodynamic evaluation based upon medical and engineering integration. Thus it is suitable for the severity assessment and treatment guidance of CoA. Here the latest researches of CFD in CoA was summarized along with other imaging studies in CoA.

【Key words】 Aortic Coarctation; Computational Fluid Dynamics; Wall Shear Stress; Artificial Intelligence

Fund program: Chongqing Kewei Joint Medical Research Project (2020FYYX128); Chongqing Municipal Technology Innovation & Application Development Special Key Project (CSTC2021jscx-gksb-N0018)

DOI: 10.3760/cma.j.cn101785-202201038-014

主动脉缩窄 (aortic coarctation, CoA) 是指胸主动脉降段的局限性狭窄, 多发生于主动脉峡部, 占所有先天性心脏病

的6%~8%^[1-2]。该病由胚胎发育异常所致,临床表现为上肢血压明显高于下肢血压、循环呼吸功能差、生长发育迟缓等,若诊治不及时,可出现难治性高血压、心力衰竭等多种严重并发症。手术前对主动脉解剖及病理状态的精准评估,有助于为主动脉缩窄患儿制定最佳个体化治疗方案,进而预防术后狭窄、主动脉瘤等。因此,早期准确评估主动脉缩窄的严重程度对保证患儿的治疗和预后尤为重要^[3]。

目前,主动脉缩窄有多种诊断标准,但均是基于超声、CT、MRI等影像检查方法的形态学诊断,而仅采用直径、比例等单一的几何指标,并不足以反映主动脉的全貌^[4]。当形态学诊断为主动脉缩窄,但患儿并无明显临床症状时,临床诊断标准与治疗指征的不一致对精准的个体化诊断和治疗提出了新的挑战。当合并室间隔缺损、动脉导管未闭及二叶主动脉瓣等其他心内畸形时,缩窄的主动脉可出现复杂的血流动力学改变。心导管测压虽然可以充分反映主动脉的整体血流动力学变化,但属于侵入性检查,且不足以给临床提供早期的评估资料,因此亟需一种无创的方式可视化评估主动脉的复杂血流动力学状态。近年来,计算流体力学基于影像学检查资料,通过医工结合的方法计算血管的血流动力学指标,在成人血管性疾病中已有较多研究,有望为主动脉缩窄的诊断及治疗提供一种准确且无创的评价方法。本文综述基于影像的计算流体力学在主动脉缩窄无创评估中的研究进展。

一、技术方法

计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)是一种新兴的计算机虚拟力学技术,现应用广泛,在医学领域(如颅内动脉瘤、动脉粥样硬化等血管疾病的诊断、治疗和随访等方面)已有一定研究。CFD基于静态的医学影像学图像进行三维重建,获取模拟流体流动的管道,无创模拟动态的血液流动,依据流体力学、热力学等控制流体流动的基本物理学原理,用数学方法求解连续性方程、动量方程和能量方程,得出流速、压力和应力等一系列参数^[5]。

该技术将胸部CTA或MRI等原始影像学图像导入图像处理软件,通过阈值分割和区域生长等自动算法,辅以手动调整,剔除主动脉以外的组织,三维重建出包括头臂干、左颈总动脉和左锁骨下动脉在内的主动脉模型。研究表明,在影像后处理工作站上手动测量的主动脉直径与重建模型的直径无显著性差异,因此重建模型的准确性得以保证^[6]。然后进一步对重建模型进行网格化、光滑处理,在流体软件中设置边界条件及流体相关参数。最终求解流动方程并使方程达到收敛,进一步后处理输出心动周期内不同时刻的血流动力学参数^[7]。值得注意的是,大多数研究将血液假设为层流和牛顿流体,将血管壁假设为无弹性的刚性壁^[8]。正常情况下血流虽然为层流或螺旋流,但当动脉狭窄时可产生湍流。由于病理条件下血液黏滞度增加和管腔狭窄等不良因素都可以引起血液偏离牛顿流体,因此CFD在评估血管狭窄远端复杂的血流运动时可能不准确,未来有必要进一步研究非牛顿流体情况下CFD计算出的血流动力学指标与临床的相

关性^[9]。

二、评估主动脉压力梯度

主动脉缩窄现有的诊断标准均基于经胸超声心动图(transthoracic echocardiography, TTE)、CT血管成像(computed tomography angiography, CTA)和心脏磁共振(cardiac magnetic resonance, CMR)等影像学检查方法,测量包括缩窄处在内的不同主动脉层面的内径^[10-11]。国内外多种形态学诊断标准将主动脉近弓、远弓及峡部Z值<-2作为临界值,但以上标准仅基于某一层面直径,不能反映主动脉的全貌,且直径、横截面积等测量指标均基于二维平面,没有考虑缩窄点的空间结构。学界对于主动脉缩窄的认识已从简单的血管梗阻发展到血管功能障碍、血流动力学改变^[2]。指南指出,目前临床对于主动脉缩窄的治疗指征不统一,除形态学评估以外,需要充分考虑主动脉缩窄的血流动力学特征以指导诊断和治疗^[4]。

欧洲心脏病学会指南中,心导管穿刺测量缩窄处收缩期峰值压力梯度(peak systolic pressure gradient, PSPG)>20 mmHg是CoA的血流动力学诊断标准,需要临床干预修复^[12]。心导管穿刺测压评估狭窄处压力梯度较上下肢袖带测量血压准确性更高,但该操作属于有创操作,且麻醉镇静以及导管置入对血流动力学均会产生影响,因此在早期评估血流动力学时,并不被临床首选。虽然超声可便捷测量主动脉压力,但有研究指出多普勒原理衍生出的伯努利方程夸大了压力梯度,亟需一种同样无创但准确性更高的手段来辅助诊断^[13]。MRI机器自带流体分析软件,但婴幼儿受心率影响,检查时间长,更多采用CTA。CFD基于CTA图像计算获取压力数据,属于无创操作,易于被患儿及家属接受。CFD的结果通过三维云图可视化,结合压力云图及流线图,可直观显示狭窄远端收缩期压力较低,且出现复杂流线,在弓部、弓部三分支血管和升主动脉近端压力明显较高,提供了从动力学解释上肢高血压、降主动脉后灌注不足以及狭窄后扩张(post-stenotic dilatation, PSD)等临床结果的有力依据,与单一的数据和曲线结果相比更直观。Rinaudo等^[14]使用CFD计算出2例患儿PSPG分别为40 mmHg和52 mmHg,侵入性心导管测得的压力梯度分别为42 mmHg和55 mmHg,两种方法的结果具有良好的一致性。婴幼儿出生后可能因严重狭窄,或合并动脉导管闭合后左心后负荷急剧增加,出现严重充血性心力衰竭,病死率极高,动力学评估重要性不言而喻。我国Zhu等^[6]纳入25例4个月至4岁的先心病患儿进行CTA建模,以患儿自身上下肢血压、TTE测得血流速度个性化精准定义边界条件,CFD压力梯度与心导管结果具有显著的相关性($R^2=0.918$, $P<0.001$, 平均偏差=1.405 mmHg),表明该技术无创、个体化评估婴幼儿患者动力学变化是可行和准确的。然而暂无CFD的大样本、多中心研究。此外,狭窄程度越重,血管内阻力越大,通过狭窄处的血流量明显减少,下肢灌注减少, Lu等^[15]通过CFD描述了由于主动脉局部狭窄引起该段主动脉内阻力增加,压力下降显著的关系,并基于Logistic回归建立了狭窄与阻力结合的诊断模型,曲

线下面积(area under curve, AUC)达 0.958。同时,待未来技术成熟,进一步基于机器学习算法建立结合形态学与动力学信息的合成队列,可显著提高临床诊断效率^[16-17]。Schubert 等^[18]利用患儿运动和静息状态下的 MRI 图像计算得出运动时压力梯度较安静状态下明显升高,提出 MRI 测功仪结合 CFD 可评估患儿运动过程中血流动力学,有替代药物负荷试验心导管检查的潜能。

三、指导手术预设计

主动脉缩窄以手术治疗为主,手术方式多样,包括球囊扩张术、支架置入术、端端/端侧吻合术和主动脉补片成形术等。在临床工作中,尽管在术前影像学上可以诊断主动脉缩窄,但有时仅通过松解主动脉或纠正室间隔缺损等畸形即可恢复主动脉的正常血流动力^[19]。因此,单纯依靠术前的形态学信息不足以为患儿提供选择最佳干预方式的依据。Goubergrits 等^[20]在重建模型上模拟了支架置入术,原狭窄处直径扩大、血管腔圆形截面恢复,分别对手术前后模型进行 CFD 计算,结果显示术后压力梯度显著较术前降低,为 (6.7 ± 5.58) mmHg,较术前有明显改善,证明该治疗方式有效。但成功干预后残余压力梯度理应接近 0,表明该模拟方案并非最佳。通常情况下,在主动脉狭窄部位前后的压力变化最为剧烈,因此可通过 CFD 的分布云图及具体数据明确产生压力变化的主动脉节段,不同程度扩大该节段主动脉管径,以模拟不同尺寸支架的置入术,对比血流动力学变化,能为最佳支架的选择提供参考依据,利于患儿恢复。此外,CFD 三维重建可深度挖掘更多的主动脉解剖参数,结合 3D 打印技术有助于医师及学生、患儿及家属在术前充分理解手术方式及细节,同时允许医师在模型上模拟手术处理,反复筛选手术路径及吻合方式,评估各术式前后血流动力学变化、形态学纠正结果^[21]。因此 CFD 有助于搭建计算机技术、3D 打印技术与传统医学、解剖学之间的桥梁,让手术设计更加精准和个体化,对于复杂先心病的术前评估和手术规划十分有利^[22-23]。

四、预测临床结果

主动脉缩窄可导致难治性高血压、术后再狭窄和动脉瘤等多种并发症,Gu 等^[24]建立了包括合并室间隔缺损、心功能不全和严重肺动脉高压等 9 个变量的预测不良临床事件的模型, AUC 达 0.82;曾洁敏等^[25]指出超声监测内皮功能,有助于预测及随访术后高血压;Zhao 等^[26]指出,狭窄后扩张(post-stenotic dilatation, PSD)进展为动脉瘤可能性大,其发生与缩窄程度显著相关,但更进一步其实是血流动力学的应力作用,以及狭窄后动脉后负荷增大导致。目前关于该病预后的研究多基于临床及形态学表现,血管类疾病的发生发展离不开血液流动的,使用 CFD 对其进行研究,将获得更多关于该病的细节。

从动力学层面认识该病,狭窄后动脉后负荷增大,缩窄段下游可发生 PSD,缩窄程度越重,发生 PSD 甚至动脉瘤的风险越高。Zhang 等^[27]使用经 CFD 计算得到的 λ_{ci} 强度评估主动脉内涡流强度, λ_{ci} 的强度顺序为 CoA > PSD > 正常,

术前 > 术后。同时,主动脉缩窄使血流受阻,引起流速紊乱形成集中的射流,血管壁受到不稳定壁面剪切应力(wall shear stress, WSS)作用^[28]。Nordahl 等^[29]关于颅内动脉瘤的研究指出, WSS 是致内皮重塑、动脉扩张的有害动力学变化,经信号转导等机制引起血管炎症、内皮增殖与凋亡失衡,管壁厚度不均,可引起主动脉重塑、扩张、动脉瘤或粥样硬化等,长期暴露于高 WSS,可出现严重的临床急症如主动脉破裂和夹层^[30]。因此,准确量化该指标对于预测高血压、动脉扩张或动脉瘤等不良后果具有重要意义。Perinajová 等^[31]对比基于 4D-flow MRI 和 CFD 计算得到的 WSS 值,两者在狭窄区域以外呈现良好的一致性,但在狭窄和弯曲部位结果不符,考虑可能是由于 MRI 在主动脉壁空间分辨率不足,不能捕捉到流速急剧变化区域内的 WSS 梯度。而 CFD 可得出空间上各点 WSS 的精确值,显然比前者可靠,可作为首选方法。现有研究已应用 CFD 验证了主动脉峡部缩小与 WSS 呈指数级变化关系,狭窄程度加重,冲击主动脉壁的流速增大,狭窄前后 WSS 差异越显著,准确量化 WSS 可为辅助诊断狭窄程度提供参考依据^[32-33]。术前 CFD 计算可获得整个主动脉弓模型内 WSS 的分布情况,准确量化该指标有望发挥其对高血压、再缩窄等不良临床后果的术前预测价值,改善疾病预后^[34]。

但现有的研究中,人工建模存在主观性,进一步结合人工智能是未来的一个研究方向^[9]。设置边界条件时,尽管使用病人的特异性血压,但患儿所处精神状态、血流状态等都可引起血压变化,从而模拟出不同的压力结果。因此,边界条件究竟是采用统一固定的血压值还是依据患者血压值进行个性化设置,仍需要探究对比两种条件下分别获取的压力梯度与金标准压力梯度。目前该技术尚在不断探索,合并动脉导管未闭、侧支循环等复杂结构性改变时,血流流向未知,无法对患儿体内的血流进行实况模拟,不能保证模拟的真实性,未来可基于动物实验获取真实血流流向,使模拟流动逼真最大化,从而获取最接近人体的血流动力学变化。计算流体力学评估该疾病的压力、流速等指标阐述的是疾病的动力学现象,但疾病的本质最终归结到病理学、基因学等基础医学,解释疾病的发生发展、增生与凋亡,若能将形态学、流体力学现象与基础研究的本质结果结合,对于快速获取患儿病理生理层面的改变以及尽早进行针对性、有效性治疗有重要的作用。

五、小结与展望

近年 CoA 影像学评估发展迅速,对该病的认识从形态学进步到动力学,计算流体力学基于无创获取的影像学图像进行计算,得到压力、流速、剪切力等多个血流动力学参数。诊断上有望取代有创的心导管穿刺操作,准确判断患儿是否存在动力学改变、改变的严重程度、干预指征,无创便捷,易被患儿及家属接受。治疗上着眼于结合最新的影像学技术与计算机技术、人工智能,有助于明确产生主要动力学变化的节段,为手术治疗提供干预范围的参考意见,通过提供不同模拟术式前后的血流动力学变化,对最优术式及路径提供参

考依据,提高手术效率,减小伤害。预后上建立压力、剪切力等参数与再缩窄、动脉瘤甚至主动脉夹层等各种并发症的关联,可有效预测并发症发生。总之,计算流体力学对于主动脉缩窄的诊断、治疗及预后都有着很强的指导作用,且该技术准确性高、无创,可应用多个参数从不同角度评估病理生理变化。但该技术仍需要不断探索与改良,应充分考虑动脉狭窄后各种可能出现的血流及组织状态、动力学变化,着眼于结合最新的影像学手段和数据模拟技术,将这些变化与个性化治疗方式结合,促进个体精准化治疗,将主动脉疾病的诊疗推向一个新的高度。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

作者贡献声明 文献检索、论文讨论分析为何玲、秦津洁

参 考 文 献

- [1] Mandell JG, Loke YH, Mass PN, et al. Altered hemodynamics by 4D flow cardiovascular magnetic resonance predict exercise intolerance in repaired coarctation of the aorta: an in vitro study[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2021, 23(1): 99. DOI: 10.1186/s12968-021-00796-3.
- [2] Ganigara M, Doshi A, Naimi I, et al. Preoperative physiology, imaging, and management of coarctation of aorta in children[J]. Semin Cardiothorac Vasc Anesth, 2019, 23(4): 379-386. DOI: 10.1177/1089253219873004.
- [3] Alvarez-Fuente M, Ayala A, Garrido-Lestache E, et al. Long-term complications after aortic coarctation stenting[J]. J Am Coll Cardiol, 2021, 77(19): 2448-2450. DOI: 10.1016/j.jacc. 2021.03.303.
- [4] 张海波, 李守军. 先天性心脏病外科治疗中国专家共识(十一): 主动脉缩窄与主动脉弓中断[J]. 中国胸心血管外科临床杂志, 2020, 27(11): 1255-1261. DOI: 10.7507/1007-4848.202008010.
Zhang HB, Li SJ. Chinese expert consensus on surgical treatment of congenital heart disease (XI): coarctation of the aorta and interrupted aortic arch[J]. Chinese Journal of Clinical Thoracic & Cardiovascular Surgery, 2020, 27(11): 1255-1261. DOI: 10.7507/1007-4848.202008010.
- [5] Mendieta JB, Fontanarosa D, Wang J, et al. The importance of blood rheology in patient-specific computational fluid dynamics simulation of stenotic carotid arteries[J]. Biomech Model Mechanobiol, 2020, 19(5): 1477-1490. DOI: 10.1007/s10237-019-01282-7.
- [6] Zhu Y, Chen R, Juan YH, et al. Clinical validation and assessment of aortic hemodynamics using computational fluid dynamics simulations from computed tomography angiography[J]. Biomed Eng Online, 2018, 17(1): 53. DOI: 10.1186/s12938-018-0485-5.
- [7] Zhang M, Liu J, Zhang H, et al. CTA-based non-invasive estimation of pressure gradients across a coarctation: a validation against cardiac catheterisation[J]. J Cardiovasc Transl Res, 2021, 14(5): 873-882. DOI: 10.1007/s12265-020-10092-7.
- [8] Aslan S, Mass P, Loke YH, et al. Non-invasive prediction of peak systolic pressure drop across coarctation of aorta using computational fluid dynamics[J]. Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc, 2020, 2020: 2295-2298. DOI: 10.1109/EMBC44109.2020.9176461.
- [9] Brüning J, Hellmeier F, Yevtushenko P, et al. Uncertainty quantification for non-invasive assessment of pressure drop across a coarctation of the aorta using CFD[J]. Cardiovasc Eng Technol, 2018, 9(4): 582-596. DOI: 10.1007/s13239-018-00381-3.
- [10] 吕莹, 陈欣, 田露, 等. CT评估主动脉缩窄患儿主动脉弓发育情况[J]. 中国医学影像技术, 2019, 35(1): 69-72. DOI: 10.13929/j.1003-3289.201805130.
- [11] Krupiński M, Irzyk M, Moczulski Z, et al. Morphometric evaluation of aortic coarctation and collateral circulation using computed tomography in the adult population[J]. Acta Radiol, 2020, 61(5): 605-612. DOI: 10.1177/0284185119877328.
- [12] Baumgartner H, Bonhoeffer P, De Groot NM, et al. ESC guidelines for the management of grown-up congenital heart disease (new version 2010)[J]. Eur Heart J, 2010, 31(23): 2915-2957. DOI: 10.1093/eurheartj/ehq249.
- [13] Itu L, Sharma P, Ralovich K, et al. Non-invasive hemodynamic assessment of aortic coarctation: validation with in vivo measurements[J]. Ann Biomed Eng, 2013, 41(4): 669-681. DOI: 10.1007/s10439-012-0715-0.
- [14] Rinaudo A, D'Ancona G, Baglini R, et al. Computational fluid dynamics simulation to evaluate aortic coarctation gradient with contrast-enhanced CT[J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2015, 18(10): 1066-1071. DOI: 10.1080/10255842.2013.869321.
- [15] Lu Q, Lin W, Zhang R, et al. Validation and diagnostic performance of a CFD-based non-invasive method for the diagnosis of aortic coarctation[J]. Front Neuroinform, 2020, 14: 613666. DOI: 10.3389/fninf.2020.613666.
- [16] Thamsen B, Yevtushenko P, Gundelwein L, et al. Synthetic database of aortic morphometry and hemodynamics: overcoming medical imaging data availability[J]. IEEE Trans Med Imaging, 2021, 40(5): 1438-1449. DOI: 10.1109/TMI.2021.3057496.
- [17] Fadil H, Totman JJ, Hausenloy DJ, et al. A deep learning pipeline for automatic analysis of multi-scan cardiovascular magnetic resonance[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2021, 23(1): 47. DOI: 10.1186/s12968-020-00695-z.
- [18] Schubert C, Brüning J, Goubergrits L, et al. Assessment of hemodynamic responses to exercise in aortic coarctation using MRI-ergometry in combination with computational fluid dynamics[J]. Sci Rep, 2020, 10(1): 18894. DOI: 10.1038/s41598-020-75689-z.
- [19] Padalino MA, Bagatin C, Bordin G, et al. Surgical repair of aortic coarctation in pediatric age: A single center two decades experience[J]. J Card Surg, 2019, 34(5): 256-265. DOI: 10.1111/jocs.14019.
- [20] Goubergrits L, Riesenkauff E, Yevtushenko P, et al. MRI-based computational fluid dynamics for diagnosis and treatment prediction: clinical validation study in patients with coarctation of aorta[J]. J Magn Reson Imaging, 2015, 41(4): 909-916. DOI: 10.1002/jmri.24639.
- [21] Meyer-Szary J, Wałdoch A, Sabiniewicz R, et al. Life-threatening complication of untreated coarctation of the aorta in a teenager solidified in a three-dimensional printed cardiovascular model[J]. Cardiol J, 2018, 25(3): 420-421. DOI: 10.5603/CJ.2018.0063.
- [22] Santoro G, Pizzuto A, Rizza A, et al. Transcatheter treatment of "Complex" aortic coarctation guided by printed 3D model[J]. JACC Case Rep, 2021, 3(6): 900-904. DOI: 10.1016/j.jaccas.

- 2021.04.036.
- [23] 冉启仁,金鑫,吴春,等. 儿童主动脉缩窄 3D 打印及模拟手术应用一例及文献复习[J]. 临床小儿外科杂志,2021,20(9): 895-897. DOI:10.12260/lxewkzz.2021.09.019.
- Ran QR, Jin X, Wu C, et al. Application of three-dimensional printing and simulated surgery for pediatric aortic coarctation; one case report with a literature review[J]. J Clin Ped Sur, 2020, 20(9): 895-897. DOI:10.12260/lxewkzz.2021.09.019.
- [24] Gu Y, Li Q, Lin R, et al. Prognostic model to predict postoperative adverse events in pediatric patients with aortic coarctation[J]. Front Cardiovasc Med, 2021, 8: 672627. DOI: 10.3389/fcvm.2021.672627.
- [25] 曾洁敏,黄萍,王红英,等. 主动脉缩窄患儿术后发生血压升高的机制研究[J]. 中华胸心血管外科杂志,2021,37(10): 579-585. DOI:10.3760/cma.j.cn112434-20210107-00003.
- Zeng JM, Huang P, Wang HY, et al. Mechanism of elevated blood pressure in children after surgery for CoA[J]. Chinese Journal of Thoracic & Cardiovascular Surgery, 2021, 37(10): 579-585. DOI:10.3760/cma.j.cn112434-20210107-00003.
- [26] Zhao Q, Shi K, Yang ZG, et al. Predictors of aortic dilation in patients with coarctation of the aorta: evaluation with dual-source computed tomography[J]. BMC Cardiovasc Disord, 2018, 18(1): 124. DOI:10.1186/s12872-018-0863-8.
- [27] Zhang X, Luo M, Fang K, et al. Analysis of the formation mechanism and occurrence possibility of Post-Stenotic Dilatation of the aorta by CFD approach[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2020, 194: 105522. DOI:10.1016/j.cmpb.2020.105522.
- [28] Corso P, Walheim J, Dillinger H, et al. Toward an accurate estimation of wall shear stress from 4D flow magnetic resonance downstream of a severe stenosis[J]. Magn Reson Med, 2021, 86(3): 1531-1543. DOI:10.1002/mrm.28795.
- [29] Nordahl ER, Uthamaraj S, Dennis KD, et al. Morphological and hemodynamic changes during cerebral aneurysm growth[J]. Brain Sci, 2021, 11(4): 520. DOI:10.3390/brainsci11040520.
- [30] Sun Y, Zhang B, Xia L. Effect of low wall shear stress on the morphology of endothelial cells and its evaluation indicators[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2021, 208: 106082. DOI: 10.1016/j.cmpb.2021.106082.
- [31] Perinajová R, Juffermans JF, Mercado JL, et al. Assessment of turbulent blood flow and wall shear stress in aortic coarctation using image-based simulations[J]. Biomed Eng Online, 2021, 20(1): 84. DOI:10.1186/s12938-021-00921-4.
- [32] Rafieianzab D, Abazari MA, Soltani M, et al. The effect of coarctation degrees on wall shear stress indices[J]. Sci Rep, 2021, 11(1): 12757. DOI:10.1038/s41598-021-92104-3.
- [33] Chen Z, Zhou Y, Wang J, et al. Modeling of coarctation of aorta in human fetuses using 3D/4D fetal echocardiography and computational fluid dynamics[J]. Echocardiography, 2017, 34(12): 1858-1866. DOI:10.1111/echo.13644.
- [34] Salmasi MY, Pirola S, Mahuttanatan S, et al. Geometry and flow in ascending aortic aneurysms are influenced by left ventricular outflow tract orientation: Detecting increased wall shear stress on the outer curve of proximal aortic aneurysms[J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2021, S0022-5223(21)00913-2. DOI:10.1016/j.jtcvs.2021.06.014.

(收稿日期:2022-01-20)

本文引用格式:秦津洁,何玲. 基于影像的计算流体力学在主动脉缩窄评估中的研究进展[J]. 临床小儿外科杂志, 2022, 21(8): 780-784. DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202201038-014.

Citing this article as: Qin JJ, He L. Research advances in assessing aortic coarctation by image-based computational fluid dynamics [J]. J Clin Ped Sur, 2022, 21(8): 780-784. DOI: 10.3760/cma.j.cn101785-202201038-014.

本刊关于综述论文撰写的几点要求

综述一定是亲自阅读了某一专题在一段时期内相当数量文献之后,经过分析,鉴别,评价,选取有关的文献信息,进行归纳整理,再做出综合性阐述的文章。

1. 综述可以述而不评,但不是文献材料的堆砌。

2. 综述是通过综合评述某一专题、某一领域的历史背景、前人工作、争论焦点、研究现状与发展前景等,而写成的严谨、系统的评论性、资料性科技论文,而不是手册或者讲座。

3. 综述论文通过对已发表材料进行归纳、综合和评价,以及对当前研究进展的考察,来澄清问题,阐明趋势,具有一定的指导性、先进性。

4. 综述可围绕以下方面展开写:对问题进行定义,总结以前的研究,使读者了解目前研究的成就与现状,辨明文献观点中的各种关系、矛盾、差距以及不一致之处,建议解决问题的后续步骤。论文内容是按照逻辑关系而不是按照研究进程组织。

5. 综述字数一般在 6 000 字左右,参考文献 30 条左右,外文文献不少于三分之一,5 年内文献约占三分之二以上。