

·实验研究 Experimental research·

维医沙疗下股动脉双向流固耦合脉动血流动力学研究

布热比·依明, 富荣昌, 阿达依·谢尔亚孜旦, 迪丽娜尔·马合木提

【摘要】 目的 研究流固耦合作用下室内维医沙疗对人体股动脉血流动力学的影响,探讨维医沙疗对动脉粥样硬化成因的作用机制及对血管破裂的影响。**方法** 在室内维医沙疗实验中对年轻健康受试者进行维医沙疗研究,对受试者心率、股动脉血流速度峰值及内径作统计学分析;重构人体股动脉三维流固耦合模型,将正弦函数作为初始条件,用 Fluent 软件分别对沙疗前后血液流动作非定场双向流固耦合模拟,分析维医沙疗对股动脉壁面切应力及 von Mises 等效应力的影响。**结果** 维医沙疗前后受试者心率平均值分别为 (76.32 ± 11.40) 次/min、 (92.69 ± 16.09) 次/min,差异有统计学意义 ($P < 0.05$);沙疗前后股动脉血流雷诺数分别为 1855.35、2518.43;沙疗对股动脉壁面切应力及 von Mises 等效应力增高的影响较为明显。**结论** 维医沙疗可增大股动脉血流雷诺数,改善人体股动脉血液流动状态,但沙疗后股动脉血流方式由层流变为紊流,很可能会导致血管瘤,因此对血管内壁较薄弱人群要控制埋沙时间、埋沙厚度及温度。维医沙疗可增高壁面切应力,对预防动脉壁增厚引起的动脉粥样硬化及血栓形成有一定的积极作用。维医沙疗后 von Mises 等效应力明显增加可加大股动脉在分叉部分破裂可能,沙疗时需谨慎。

【关键词】 维医沙疗; 血流动力学; 计算流体力学; 用户自定义函数; Fluent 双向流-固耦合; 脉动流; 壁面切应力; 血管破裂

中图分类号:R29 文献标识码:A 文章编号:1008-794X(2017)-01-0049-06

The effects of sand treatment in Uyghur medicine on the pulsatile hemodynamics of femoral artery bidirectional fluid-solid coupling YIMING·Burebi, FU Rong-chang, XIEERYAZIDAN·Adayi, MAHEMUTI·Dilinaer. School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, the Xinjiang Uyghur Autonomous Region, Urumqi 830047, China

Corresponding author: FU Rong-chang, E-mail: changrong2010@sina.com

【Abstract】 Objective To investigate the effects of Uyghur indoor sand therapy on the hemodynamics of femoral artery bidirectional fluid-solid coupling, and to discuss the influence of Uyghur indoor sand therapy on the formation of atherosclerosis as well as on the rupture of blood vessels. **Methods** This study of indoor Uyghur sand therapy was conducted in young healthy volunteers. The heart rate, peak value of femoral artery blood flow velocity and inner diameter were determined, and the results were statistically analyzed. Three dimensional fluid-solid coupling model of human femoral artery was reconstructed. Taking the sine function as the initial condition, the non-steady field bidirectional fluid-solid coupling simulation was conducted by using Fluent software, and the effect of indoor Uyghur sand therapy on femoral artery wall shear stress as well as on von Mises equivalent stress was evaluated. **Results** The average heart rates before and after indoor Uyghur sand therapy were (76.32 ± 11.40) beats per minute and (92.69 ± 16.09) beats per minute respectively, the difference was statistically significant ($P < 0.05$). The Renolds number of femoral artery before and after indoor Uyghur sand therapy was 1855.35 and 2518.4 respectively. The Uyghur sand therapy had more obvious influence on the increase of femoral artery wall shear stress and von Mises equivalent stress. **Conclusion** Uyghur sand therapy can increase Renolds number of femoral artery and improve the blood flow state of

DOI:10.3969/j.issn.1008-794X.2017.01.011

基金项目: 国家自然科学基金(31460245、81160458)、新疆维吾尔自治区自然科学基金(2014211A005)

作者单位: 830047 乌鲁木齐 新疆大学机械工程学院

通信作者: 富荣昌 E-mail: changrong2010@sina.com

human femoral artery, but after the treatment the femoral artery blood flow pattern changed from laminar flow to turbulence flow, which may lead to the formation of hemangioma, therefore, for patients whose inner wall of blood vessel are thinner the sand-buried time, burying-sand thickness and temperature should be strictly controlled. Uyghur sand therapy can also increase wall shear stress, which plays a certain positive role in preventing atherosclerosis and thrombosis caused by thickening of the arterial wall. After Uyghur sand therapy, the von Mises equivalent stress is remarkably increased, which can increase the possibility of angiorrhexis at femoral artery bifurcation, thus, full attention should be paid to patients during the performance of Uyghur sand therapy.(J Intervent Radiol, 2017, 26: 49-54)

[Key words] Uyghur sand therapy; hemodynamics; computational fluid dynamics; user defined function; fluent bidirectional fluid-solid coupling; pulsatile fluid; wall shear stress; angiorrhexis

维吾尔医学埋沙疗法,简称维医沙疗,是一种特殊的自然治疗方法。独特的气候条件、丰富的矿物质元素使得新疆吐鲁番地区维医沙疗拥有不同于其它地区沙疗的特性^[1-2],对人体不产生不良反应,无损伤,可扩张末梢血管,改善血液循环^[3-5],对风湿病的疗效更为显著^[6-7],但容易受到自然环境和气候的影响。刘龙等^[8]模仿吐鲁番实地沙场建立了不受时间、地点和气候影响的室内维医沙疗实验平台。卫荣等^[9]研究认为,风湿类疾病与血液循环障碍有关。迪丽娜尔等^[10]通过室内实验发现,维医沙疗能改善血液循环。Fu 等^[11]采用计算流体力学(CFD)技术进行室内维医沙疗实验,发现维医沙疗对膝关节周围动脉血流动力学有显著影响。此外,探究动脉粥样硬化、血栓形成等病因并进一步找到良好预防及治疗措施是生物力学研究热点,研究显示血管壁 von Mises 等效应力导致血管破裂^[12-13],血液流动是一种周期性非稳态流动^[14],血管壁面剪切应力在弹性血管壁明显小于刚性血管壁^[15-16]。本研究旨在探讨维医沙疗对人体血流动力学的作用及其机制,从而进一步探究其对动脉粥样硬化、血栓形成、血管破裂的影响。

1 材料与方法

1.1 实验器材

实验器材包括 CX50 型便携式彩色多普勒超声诊断仪(荷兰 Philips 公司)、便携式多参数监护仪(深圳迈瑞生物医疗公司)。

1.2 实验方法

本研究是将受试者实验数据代入周期性正弦函数并作为初始条件,采用 Fluent 软件宏命令编译此函数,ANSYS workBench 软件对人体股动脉作非稳态、非定常的双向流固耦合模拟计算,以对比维医沙疗前后股动脉壁面切应力及 von Mises 等效应

力,分析维医沙疗对血流动力学的影响及其临床意义。

选取 59 名 22~30 岁健康受试者在室内平台接受维医沙疗。沙疗前后,采用彩色超声分别检测受试者股动静脉、股浅动静脉、腘动静脉、胫前动静脉、胫后动静脉和足背动脉的血流速度峰值、血管内径和阻力指数(RI),多参数监护仪检测受试者心率、血压氧饱和度(表 1)。根据雷诺数计算公式—— $Re = \rho v d / \mu$,分别计算维医沙疗前后雷诺数,式中 v 为血流速度峰值均值, d 为检测所得股动脉内径均值,血液黏度及密度均为 $\mu = 4 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}$ 和 $\rho = 1.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ^[15]。

表 1 维医沙疗前后股动脉血流数值比较 (n=59)

参数	维医沙疗前	维医沙疗后	P 值
速度/(cm/s)	92.51±8.87	122.51±16.98	<0.05
内径/cm	0.76±0.11	0.78±0.11	>0.05
心率/(次/min)	76.32±11.40	92.69±16.09	<0.05
雷诺数	1 855.35	2 518.43	
流动形式	层流	紊流	

1.3 数值仿真

将血管壁视为各项同性的线弹性材料,取血管弹性模量为 5 mPa,泊松比为 0.45,密度为 1 150 kg/m³^[16]。血液与血管壁接触面上考虑流-固耦合的边界条件^[17]: $\sigma_y^t = \tau_y^t$, $V_i^t = v_i^t$, 式中 V_i 为股动脉壁速度分量, v_i 为血液流场速度分量, σ 为股动脉壁正应力分量, τ 为流场切应力分量, t 为流-固耦合 t 时刻的值。血液和血管壁相接触的耦合面上壁面切应力和股动脉壁正应力相等,流场速度和股动脉壁速度分量相等。

1.4 初始条件和边界条件设定

入口初始条件:根据心率和流动频率关系, $T = \frac{60}{\text{心率}}$,心率为维医沙疗前后心率均值心动周期为: $T_{\text{before}} = \frac{60}{76} = 0.789$, $T_{\text{after}} = \frac{60}{93} = 0.6516$ 。维医沙疗前后心动周期分别为 0.8 s、0.65 s。入口速度使用周期性函数

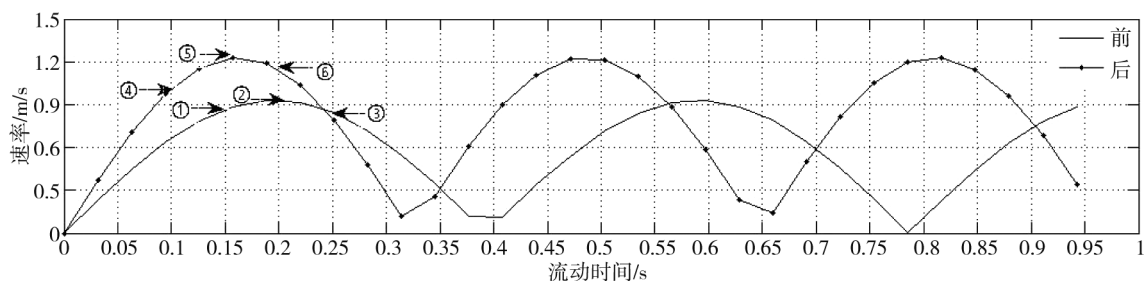


图 1 速度入口边界条件图

$v_{in}=v_{max}\sin(\omega t)$, v_{max} 为股动脉血流速度峰值均值, $\omega=\frac{2\pi}{T}$ [18], 因此维医沙疗前后入口速度函数为: $v_{in(before)}=0.93\sin(7.99t)$, $v_{in(after)}=1.23\sin(9.70t)$, 函数值随时间变化的曲线如图 1 所示。分别计算维医沙疗前后 2 个心动周期血液流动过程, 时间步长设为 0.01, 通过几次反复计算得到稳定的收敛结果。

出口条件: 出口血液流动已稳定, 出口压力设为零 [19-20]。

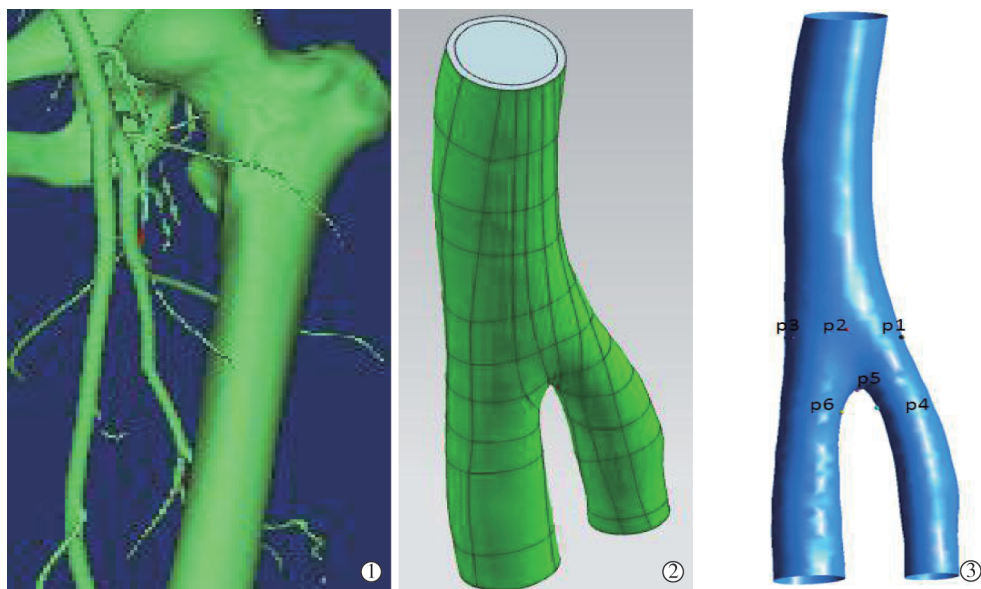
边界条件: 管壁视为无渗透, 无滑移边界。

维医沙疗前雷诺数 $<2\ 300$, 沙疗后 $>2\ 300$ (表

1), 沙疗后股动脉内流动由层流变为紊流, 模拟计算时维医沙疗前采用层流模型, 沙疗后采用标准 $K-\varepsilon$ 模型。

1.5 股动脉流固耦合模型构建

对 1 名成年健康男性受试者下肢进行 CT 断层扫描, 利用所获得的数据, 结合 Mimics 10.01 医学图像处理软件和 Geomagic Studio 12.0 逆向工程软件构建股动脉流固耦合模型。该模型股动脉壁厚设为 1 mm, 与张梅等 [21] 报道的股动脉壁厚一致, 用 UG NX 8.0 软件装配血液-血管壁 (图 2①②)。



①Mimics 软件提取; ②重构模型; ③特征点位置

图 2 股动脉流固耦合构建图

1.6 统计学分析

采用 SPSS 19.0 软件作两独立样本 t 检验, 以均值 \pm 标准差 ($\bar{x} \pm s$) 描述, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

选取维医沙疗前 0.15、0.20、0.25 s (分别用 1、2、3 表示) 3 个时间点和维医沙疗后 0.10、0.15、0.20 s (分别用 4、5、6 表示) 3 个时间点, 查看股动脉壁面切应力分布 (图 1); 拟合出 6 个点特征点 (p1~

p6) 在 0.3 s 内的壁面切应力随时间变化曲线 (图 2 ③)。

2.1 股动脉壁面切应力

维医沙疗前后股动脉壁面切应力最小值出现在分叉处附近, 右边分支外侧。沙疗前低壁面切应力在右侧分支外侧较为明显, 沙疗后在分叉处上方较为明显; 沙疗后各特征点壁面切应力, 尤其是沙疗前时间点 2 和 3 出现了低壁面切应力 ($<0.4\text{ P}$) [22], 而沙疗后 3 个时间点均未出现低壁面切应力 (图

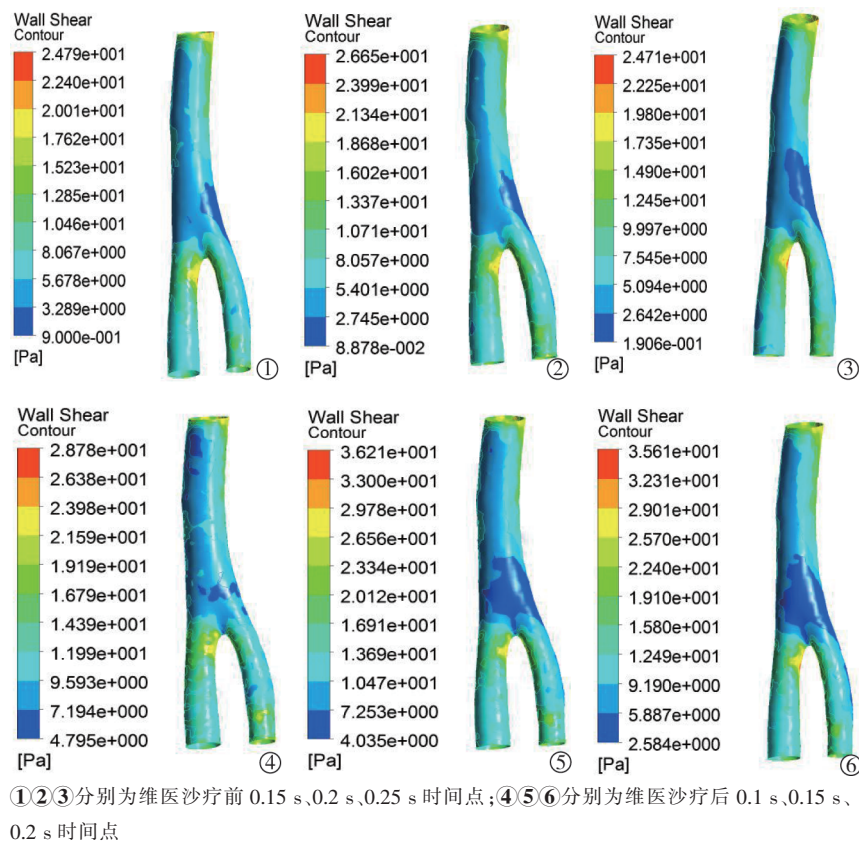


图3 股动脉壁面切应力分布图

3)。动脉粥样硬化导致动脉堵塞、斑块破裂,加快血栓化速度。Caro 等^[23]研究认为剪切依赖型血液和血管壁间质量传输是动脉粥样硬化发生的原因。从低壁面切应力角度出发解释,维医沙疗后切应力增大,可促进人体血液和血管壁之间质量传输,加快营养物质摄取,促进杂物排除,预防血管壁变厚、动脉粥样硬化及血栓形成进一步发展^[24-26]。

维医沙疗前,p1、p2、p3 特征点的壁面切应力值在 0.3 s 内处于较低(1~4.5 Pa)。p1、p2、p3 点所处位置相对其它部分的模型形状比较规则,且沙疗前血液流动形式为层流,因此随时间变化的壁面切应力比较平稳;p4、p5、p6 点壁面切应力值明显高于 p1、p2、p3 点值,p4 和 p6 点值相近;p5 点股动脉形状的复杂性使分叉处出现二次流、回流等复杂血液流动状态,血流速度减慢,最终引起壁面切应力降低(图 4①)。沙疗后点 p1、p2、p3 点壁面切应力相对于沙疗前波动较大,其中 p3 点波动较为明显,p4 点壁面切应力值明显低于沙疗前 p4 点值(图 4②)。沙疗后股动脉血液流动雷诺数明显增大并变为湍流,雷诺数增加在某种程度上可改善人体血液流动状态,但湍流使得在复杂血管中的血液流动变得更为复杂,引起模型上某些特征点血流速度降低,使得壁面切应力降低;p5 和 p6 点壁面切应力明显高于沙疗前,

p5 点处于分叉处,p6 点处在股动脉左侧分支,几何形状看其直径>左侧分支直径,使得分叉处血流速度加快,引起切应力增高。

维医沙疗后股动脉壁上某些点壁面切应力明显高于沙疗前,而有些点沙疗后没有明显增高,甚至某些点明显低于沙疗前;可以推知,初始条件不是影响壁面切应力的唯一因素,研究壁面切应力变化时人体血管的复杂性及不规则性是忽略的因素;因此,应用维医沙疗改善人体血液流动状态,得到更健康的血管,取决于患者患病位置。

2.3 股动脉 von Mises 等效应力

Von Mises 应力是判断各向同性材料受到复杂载荷时是否会出现屈服的标准,是正向应力和剪切应力的组合,常用于描绘联合作用的复杂应力状态,可清晰描述整个模型中的力学变化情况,从而应用于快速定位模型中的危险区域。

股动脉管壁 von Mises 等效应力分布显示,维医沙疗前后分叉处的等效应力高于其它部位(图 5 ①②);由沙疗前后等效应力随时间变化趋势可知,沙疗后等效应力明显高于沙疗前,且波动较大(图 5 ③);等效应力分布位置受初始条件和约束条件影响,不过在同等约束条件下沙疗前后等效应力分别为 93.42 kPa、119.48 kPa,沙疗后比沙疗前增高

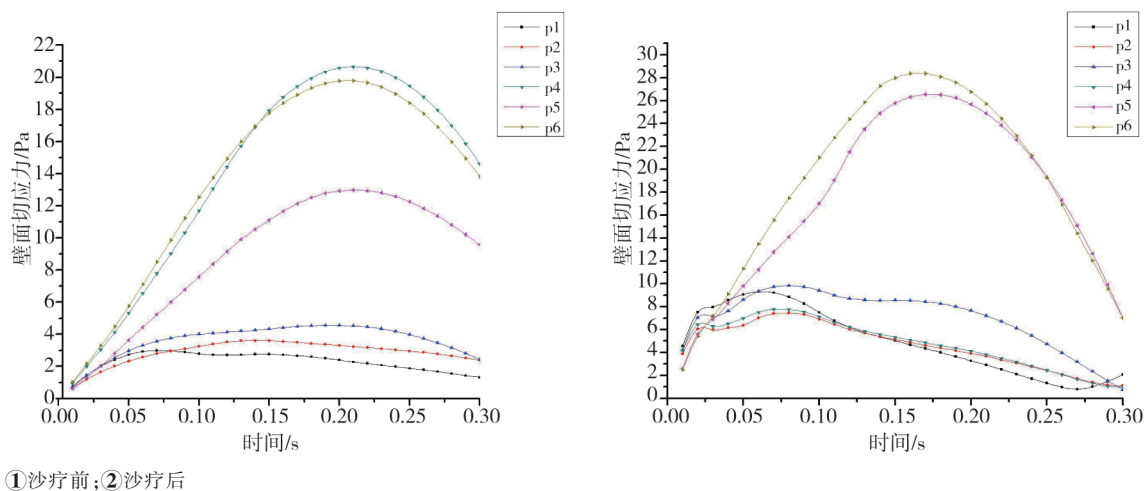


图 4 特征点维医沙疗前后股动脉壁面切应力随时间变化趋势

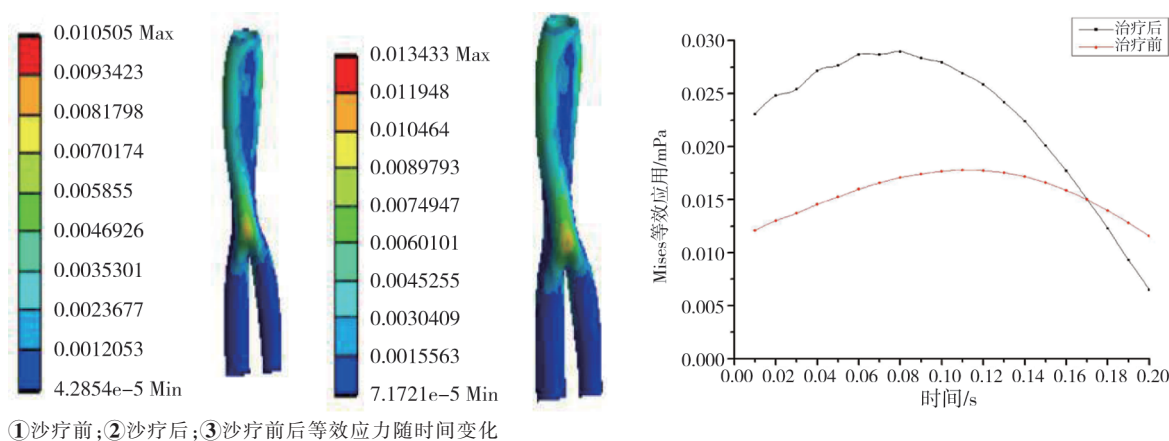


图 5 血管壁 von Mises 等效应力分布

26.06%。从力学角度解释,等效应力增高破坏人体血管壁在正常生理状态下所受的力,刺激血管壁并引起病情加重,甚至导致血管壁破裂。因此,对血管壁较为薄弱患者施行维医沙疗需谨慎。

3 结论

统计学分析结果显示,维医沙疗增大雷诺数,加快心脏输入输出,改善股动脉血液循环,从而预防和治疗血液循环不良所致血管疾病;沙疗后血流速度明显增强,血流量增大益于人体血液循环,预防动脉粥样硬化、血栓等,同时改善人体生理状态。不过,沙疗后股动脉内血流由层流变为紊流,很可能会导致血管瘤,且模拟计算结果可知,沙疗后 von Mises 等效应力增高对部分人群起反作用,可加重病情,因此对血管内壁较薄弱人群埋沙时需谨慎,尽量减少埋沙时间、埋沙厚度和温度。

本研究采用脉动入口的血流速度,以双向流固耦合分别对维医沙疗前后股动脉血流动力学作对比研究,CT 扫描提取下肢血管并用逆向处理方法生成

血管壁,将正弦函数作为速度入口边界条件分别计算沙疗前后股动脉内血液在弹性血管内流动情况,使得结果更加接近人体真实生理血流动力学^[27-28]。当然本研究一些假设条件有一定局限性,血液流动原本是血细胞和血浆组成的多相流动,而本研究将血液视为连续性流体来处理;流体黏度在很大程度上也取决于所处温度,通常温度升高血液黏度会下降,沙疗中温度起主要作用,而本实验条件为沙体温度介于 45~50℃,沙疗前后血液黏度均采纳前人研究结果,使得计算结果和真实情况有所差别。今后将进一步研究维医沙疗与血液成分特点的关系,采用更多研究方法与技术作相关参数验证^[29-30],为患者提供无损伤、价格便宜、不受限制的维医沙疗环境,提高维医沙疗应用价值。

[参考文献]

- [1] 迪丽娜·马合木提,卫荣,张学学. 维医沙疗皮肤组织的热效应分析[J]. 中华物理医学与康复志, 2005, 27: 398-401.
- [2] 阿不都沙拉木·赛都拉,沙地尔·卡地尔,吾斯曼·牙生,等. 维

- 医沙疗与其他区域沙疗的沙子特性对比研究[J]. 中国民族医药杂志, 2013, 19: 39-40.
- [3] 努尔亚·艾尼外尔江, 迪丽娜尔·马合木提. 非药物治疗对血液流变学和血流动力学的影响[J]. 新疆科大学学报, 2015, 38: 649-651.
- [4] 尼牙孜·艾山. 新疆吐鲁番沙疗治疗风湿类疾病的研究[J]. 中国民族医药杂志, 2002, 8: 21-23.
- [5] 卫 荣, 迪丽娜尔·马合木提, 哈木拉提·吾甫尔. 维医沙疗传热效应抗炎作用实验研究[J]. 中南大学学报·医学版, 2009, 34: 1-7.
- [6] 迪丽娜·热夏提, 王春耀. 微量元素及生物传热与维医沙疗[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2003.
- [7] 卫 荣, 迪丽娜尔·马合木提, 杨少玲, 等. 维医沙疗对兔膝关节关节炎血液流变学和血流动力学影响[J]. 科技导报, 2009, 27: 83-86.
- [8] 刘 龙, 迪丽娜尔·马合木提, 富荣昌, 等. 室内沙疗对人体股动脉血流动力学影响的实验研究[J]. 新疆医科大学学报, 2014, 37: 29-31.
- [9] 卫 荣, 肖明霞, 迪丽娜尔·马合木提. 维吾尔医辨证分型骨性关节炎埋沙治疗效果观察[J]. 新疆医科大学学报, 2012, 35: 1328-1332.
- [10] 迪丽娜尔·马合木提, 穆合塔尔, 富荣昌. 生物力学与维医沙疗[J]. 中国民族医药杂志, 2000, 6: 24-25.
- [11] Fu RC, Mahmut D, Tiypujiang RA, et al. Effect studies of Uyghur sand therapy on the hemodynamics of the knee-joint arteries[J]. Biomed Mater Eng, 2014, 24: 2381-2388.
- [12] 刘 莹, 章德发, 殷艳飞, 等. 颈动脉双向流固耦合模型非稳态血流数值分析[J]. 介入放射学杂志, 2015, 24: 885-889.
- [13] 彭应龙, 宋 莉, 佟小强, 等. 颈动脉支架成形术血流动力学改变的影响因素分析[J]. 介入放射学杂志, 2013, 22: 535-539.
- [14] 高 巍. 血流动力学数值计算与模拟[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- [15] Perktold K, Rappitsch G. Computer simulation of local blood flow and vessel mechanics in a compliant carotid artery bifurcation model[J]. J Biomech, 1995, 28: 845-856.
- [16] Liu GY, Wu JH, Ghista DN, et al. Hemodynamic characterization of transient blood flow in right coronary arteries with varying curvature and side-branch bifurcation angles[J]. Comput Biol Med, 2015, 64: 117-126.
- [17] 范小弄. 心血管血液动力学数值模拟研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [18] 刘有军, 乔爱科, 主海文, 等. 颈动脉分支的血流动力学数值模拟[J]. 计算力学学报, 2004, 21: 475-480.
- [19] Shahcheraghi N, Dwyer HA, Cheer AY, et al. Unsteady and three-dimensional simulation of blood flow in the human aortic arch[J]. J Biomech Eng, 2002, 124: 378-387.
- [20] 杨金有, 俞 航, 刘 静, 等. 基于 CT 图像胸主动脉夹层与正常胸主动脉内血流动力学模拟对比分析[J]. 生物医学工程与临床, 2010, 14: 390-393.
- [21] 张 梅, 张 运, 高月花. 颈动脉及股动脉内膜-中膜层厚度正常值的对比研究[J]. 中国医学影像技术, 2002, 18: 32-33.
- [22] Liu GY, Wu JH, Ghista DN, et al. Hemodynamic characterization of transient blood flow in right coronary arteries with varying curvature and side-branch bifurcation angles[J]. Comput Biol Med, 2015, 64: 117-126.
- [23] Caro CG, Fitz-Gerald JM, Schroter RC. Atheroma and arterial wall shear. Observation, correlation and proposal of a shear dependent mass transfer mechanism for atherogenesis[J]. Proc R Soc Lond B Biol Sci, 1971, 177: 109-159.
- [24] Tang BT, Cheng CP, Draney MT, et al. Abdominal aortic hemodynamics in young healthy adults at rest and during lower limb exercise: quantification using image-based computer modeling[J]. Am J Physiol Heart Circ Physiol, 2006, 291: H668-H676.
- [25] Chandran KB (邓小燕, 孙安强, 刘肖等译). 生物流体力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 159-161.
- [26] Omodaka S, Sugiyama S, Inoue T, et al. Local hemodynamics at the rupture point of cerebral aneurysms determined by computational fluid dynamics analysis[J]. Cerebrovasc Dis, 2012, 34: 121-129.
- [27] Rayz VL, Bousset L, Acevedo-Bolton G, et al. Numerical simulations of flow in cerebral aneurysms: comparison of CFD results and in vivo MRI measurements[J]. J Biomech Eng, 2008, 130: 051011.
- [28] 李 艳, 傅津津, 李 科, 等. 经颅多普勒对高脂血症患者脑血流动力学的分析[J]. 中南大学学报·医学版, 2012, 37: 256-259.
- [29] 王 嵩, 夏 爽, 李 牧, 等. 联合 CTA、CT 灌注成像评价颅内血管搭桥前后脑血流动力学的变化[J]. 中国老年学杂志, 2012, 32: 827-828.
- [30] 罗永超, 李克强, 陶庆林, 等. 128 层螺旋 CT 脑灌注成像联合 CT 血管造影对超早期脑梗死区域血流动力学研究[J]. 现代诊断与治疗, 2013, 24: 1941-1942.

(收稿日期:2016-07-24)

(本文编辑:边 佑)