

# 运动与分岔血管剪切力及血液流变指标的变化

田桂玲(枣庄科技职业学院, 山东省枣庄市 277500)

## 文章亮点:

1 利用实验和理论分析相结合的方法,研究了运动方式对血液流变指标的影响。利用有限元法分析运动方式对血管剪切力的影响。  
2 结果提示一次性力竭运动后易导致血液粘度增高,容易诱发冠状动脉性心脏病、动脉粥样硬化等心血管疾病;系统运动使全血及血浆粘度降低,血流速度加快,静脉血栓、动脉硬化发生的概率减少,从而起到预防心血管疾病的作用。

## 关键词:

组织构建; 组织工程; 主动脉分岔血管; 有限元; 血管剪切力; 血液流变指标; 一次性力竭运动; 系统运动; 安静状态

## 主题词:

血液流变学; 运动; 血管

## 基金资助:

山东省教育科学“十二五”规划2013年度规划课题(2013GG208)

田桂玲,女,1981年生,山东省菏泽市人,汉族,2007年徐州师范大学毕业,硕士,主要从事运动生物力学及生理学研究。

doi:10.3969/j.issn.2095-4344.2014.29.009  
[http://www.crter.org]

中图分类号:R318

文献标识码:B

文章编号:2095-4344

(2014)29-04642-05

稿件接受:2014-05-06

## 摘要

**背景:**运动后血液流变的异常是产生运动疲劳的原因之一,也是运动诱发心血管疾病的危险因素之一。

**目的:**分析运动方式对血液流变指标和血管动力学的变化规律。

**方法:**建立血管模型并采用有限元法分析一次性力竭运动和系统运动两种运动模式下分叉血管剪切力分布,检测30名健康大学生志愿者血液流变指标。在查阅文献的基础上,通过实验和理论分析运动方式对血液流变性的影响,及运动方式与血管剪切力之间的相关关系。

**结果与结论:**一次性力竭运动能使机体血液流变性明显发生不良变化,而长期规律的系统运动后明显改变血液流变性均有向好方向发展的趋势。一次性力竭运动后,分叉血管剪切力在分岔处小于0.6 Pa;系统运动后,血管处剪切力为0.6-1 Pa。因此,一次性力竭运动后易诱发血管疾病;系统运动起到预防血管疾病的作用。

田桂玲.运动与分岔血管剪切力及血液流变指标的变化[J].中国组织工程研究,2014,18(29):4642-4646.

## Changes of blood rheology indexes and bifurcation shearing force after exercise

Tian Gui-ling (Zaozhuang Vocational College of Science & Technology, Zaozhuang 277500, Shandong Province, China)

## Abstract

**BACKGROUND:** The abnormal blood rheology after exercise is one of the leading causes of exercise fatigue, and also a risk factor of exercise-induced cardiovascular disease.

**OBJECTIVE:** To analyze the effect of exercise on blood rheology indexes and vascular dynamics.

**METHODS:** The blood vessel models were established. The bifurcation shearing force was analyzed in the exercise modes of one-time exhaustive exercise and systemic exercise. The blood rheology indexes among 30 healthy volunteers were detected. Based on the consulting literatures, we observed the effect of exercise mode on blood rheology through experiment and theoretical analysis, and investigated the correlation between exercise mode and bifurcation shearing force.

**RESULTS AND CONCLUSION:** One-time exhaustive exercise had adverse effects on blood rheology, while system exercise significantly changed blood rheology. The bifurcation vascular shear stress was less than 0.6 Pa after one-time exhaustive exercise, and about 0.6-1.0 Pa after system exercise. Therefore, one-time exhaustive exercise induces vascular disease; system exercise can prevent vascular diseases.

**Subject headings:** hemorheology; movement; blood vessel

**Funding:** the Education Science Project of Shandong Province during the Twelfth Five-year Plan, No. 2013GG208

Tian Gui-ling, Master,  
Zaozhuang Vocational College  
of Science & Technology,  
Zaozhuang 277500, Shandong  
Province, China

Accepted: 2014-05-06

Tian GL. Changes of blood rheology indexes and bifurcation shearing force after exercise. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2014;18(29):4642-4646.

## 0 引言 Introduction

血液流变学是生物流变学中一个十分活跃的分支,是研究血液的流动性、凝固性和黏滞性、血液中有形成分(主要是红细胞和血小板)的聚集性和变形性,以及血管弹性的科学。近年来血液流变学发展十分迅速,在生物学科、基础医学、预防医学和临床医学等领域已获得广泛的应用<sup>[1]</sup>。研究认为,运动可导致血液流变性的改变,包括红细胞压积、红细胞数、红细胞变形能力、血红蛋白浓度、红细胞渗透脆性、血小板、血液黏度等指标的改变<sup>[2-5]</sup>。1988年Eichner等对长期运动员的血液特征进行了分析研究,明确提出了“运动员血液”的概念。

运动员血液应具备以下特点:①血容量增加。②纤维蛋白溶解作用增加。③血液黏度降低。④红细胞变形能力增加。运动员血液是指经过长期良好训练使血液的性状发生了适应性的改变<sup>[6]</sup>。研究表明,一次性运动后血液流变性会降低,降低运动员的运动能力。一次性运动后,血液流变性呈现以下几个特征:①全血黏度、血浆黏度、红细胞压积显著升高,血液流变性下降<sup>[7-8]</sup>。②血小板黏附率和最大聚集率有明显增加<sup>[9]</sup>。③引起凝血和纤溶能力亢进,作用是暂时的<sup>[10]</sup>。④红细胞变形能力下降<sup>[12-13]</sup>。

运动疲劳后迅速恢复一直是体育科研的一大热点,也是运动实践中急需解决的一大难点。运动后血液流变的异常是产生运动疲劳的原因之一,也是运动诱发心血管疾病的危险因素之一。研究血液流变性质在运动中的改变,对于揭示循环功能障碍和发病机制的理论研究,特别是心血管疾病的早期诊断和预防具有非常重要的意义<sup>[13-14]</sup>。

血液动力学的多个因素如血流速度、血管壁的张应力、湍流、剪切力等均认为与动脉粥样硬化的产生有关,其中剪切力与动脉粥样硬化之间的关系研究较多<sup>[15-16]</sup>。临床研究发现动脉粥样硬化好发于动脉开口、分叉和弯曲等血管剪切力变异较大的部位<sup>[17-18]</sup>,血管剪切力在动脉重构及粥样硬化进程中作用重大<sup>[19-20]</sup>。研究发现,低剪切应力动脉区域血管内皮细胞抗动脉粥样硬化基因表达受抑,而促动脉粥样硬化基因表达明显增加,从而加速动脉粥样硬化形成。在血管分叉处的内侧壁上,易形成单向的高的剪切力,高水平剪切力则会对抗动脉粥样硬化的发生<sup>[21-22]</sup>。

为了研究运动方式对血液流变性的影响,本研究在实验的基础上,建立血管模型并采用有限元法分析一次性力竭运动和系统运动两种运动模式下分叉血管剪切力分布,宏观血液流变学指标的变化与相关可能机制的角度来阐述运动方式对血液流变性的影响与机制,旨在进一步阐明运动方式与血管剪切力之间的相关关系。

## 1 对象和方法 Subjects and methods

**设计:** 单一样本观察。

**时间及地点:** 实验于2013年3至6月在枣庄科技职业学院完成。

**对象:** 30名健康大学生志愿者(枣庄科技职业学院在校大学生,高中阶段参加过规律的体育训练),其中男24名,女6名;年龄18-22岁,平均为20.5岁;平均运动年限2.1年;平均身高为174.3 cm;平均体质量为68.3 kg;平均心率为64次/min;平均舒张压为74 mm Hg(1 mm Hg=0.133 kPa),平均收缩压为120 mm Hg。

**方法:**

**数值计算的有限元模型:** 主动脉分岔血管入口段,其半径约0.65 cm,血管分岔后,其中一段为粗血管,半径为0.55 cm,另一段血管为细血管,其半径为0.4 cm。几何模型见图1<sup>[23]</sup>。

**血液流变检测方法:** 30名学生在清晨空腹抽血4 mL进行血液流变学检测。

**一次性力竭运动:** 早晨运动(2 h)结束后抽血4 mL。30名学生参加15 min的热身运动,然后进行跑步运动,判断标准:主观疲劳等级量表值达到19或20级,心率达到最大值90%左右(理论上男生最大心率为200次/min,女生最大心率为188次/min)。

**规律的系统运动:** 进行为期3个月的系统运动,周一至周五每天早晨运动1 h,下午运动2 h,进行中等强度的武术训练,男女没有区别。周六、周日休息。每次抽血后立即把血液加入到含有125 U烘干的肝素抗凝管内混合防止凝固,并在抽血后4 h内全部测定完毕。

利用FASCO-3010全自动血液流变快测仪等仪器观察一次性力竭运动和系统运动对血液流变指标的影响。在此基础上,利用有限元法建立主动脉分岔血管模型,计算和分析运动方式对主动脉分岔血管剪切力的影响。

**对主动脉分岔血管的边界条件计算的假设<sup>[24-26]</sup>:** ①血液为不可压缩的非牛顿流体。②血管壁为无渗透的刚性管,不考虑血管的弹性对血液流动的影响,其壁面在X, Y, Z 3个方向的血液流速为零:  $v_x=v_y=v_z=0$ 。③血管的出口压力在X, Y, Z 3个方向均为零:  $P_x=P_y=P_z=0$ 。

**主要观察指标:** ①血液流变指标检测结果。②利用有限元法建立主动脉分岔血管模型,计算和分析运动方式对主动脉分岔血管剪切力的影响。

## 2 结果 Results

**2.1 参与者数量分析** 纳入健康大学生30名,无脱落,全部进入结果分析。

**2.2 血液流变指标检测结果** 在安静状态、一次性力竭运动和系统运动后,30名健康大学生的3组血液流变指标检测结果见表1。结果显示:一次性力竭运动后的血液流变特性与安静状态相比较,人体血液的黏度、血浆的黏度、红细胞刚性指数、红细胞电泳时间、卡松屈服切力均有较大程度的增加,红细胞压积和红细胞聚集指数虽有增加,但增加幅度较小,红细胞变形能力下降。系统运动的血液流变特性与安静状态相比较,人体血液的黏度、血浆的黏度、

表 1 健康大学生志愿者 30 名一次性力竭运动和系统运动两种运动模式下血液流变特性比较

Table 1 Comparison of blood rheology indexes among 30 healthy volunteers after one-time exhaustive exercise and system exercise

运动模式	全血高切黏度 (mPa·s)	全血中切黏度 (mPa·s)	全血低切黏度 (mPa·s)	血浆黏度 (mPa·s)	红细胞压积 (L)	高切还原黏度 (mPa·s)	中切还原黏度 (mPa·s)	低切还原黏度 (mPa·s)
安静状态	4.61	5.53	11.17	1.37	0.47	7.63	9.64	21.63
一次性力竭运动后	4.86	5.82	11.68	1.44	0.49	8.02	10.19	22.86
系统运动后	4.37	5.31	10.74	1.31	0.46	7.32	9.24	20.65

运动模式	红细胞聚集指数(AI)	红细胞变形指数(TK)	红细胞刚性指数(IR)	红细胞电泳时间(s)	卡松屈服切力(MPa)	血沉方程 K 值	血沉(mm/h)	卡松黏度
安静状态	8.2	0.81	5.04	17.25	11.36	10.7	2.8	2.16
一次性力竭运动	8.3	0.8	5.28	18.22	12	13.7	3.77	2.29
系统运动后	8.8	0.85	5.01	18.64	10.9	12.38	3.5	2.06

表注：结果显示一次性力竭运动能使机体血液流变性明显发生不良变化，而长期规律的系统运动后这些指标均有向好方向发展的趋势。

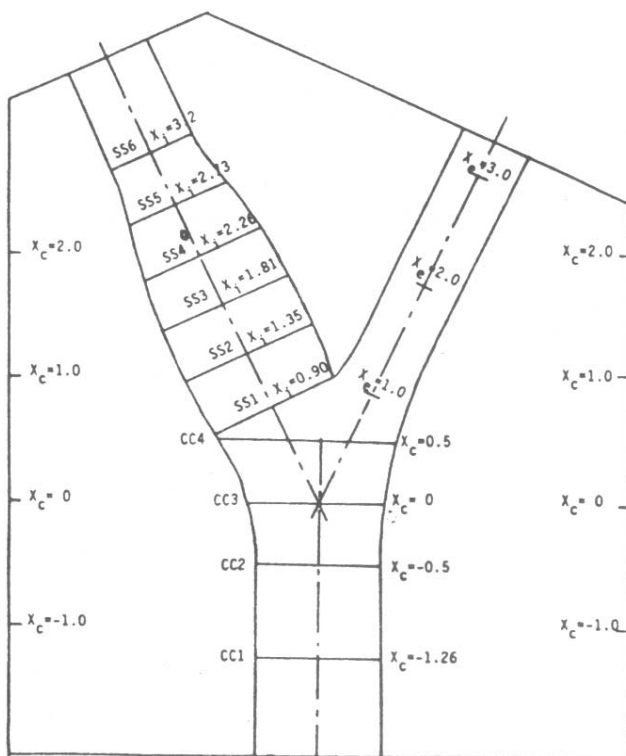


图 1 主动脉分岔血管几何模型

Figure 1 Geometric model of aorta bifurcation

红细胞压积、红细胞刚性指数、卡松屈服切力均有一定程度的减小；红细胞变形能力、红细胞聚集指数和红细胞电泳时间有一定程度的增加。因此，一次性力竭运动能使机体血液流变性明显发生不良变化，而长期规律的系统运动后这些指标均有向好方向发展的趋势。

**2.3 血管剪切力分布** 从最大剪切力分布来看，一次性力竭运动与系统运动相比较，剪切力均有不同程度的降低，而且系统运动比一次性力竭运动降低幅度要大一些。一次性力竭运动后，血管分岔处的剪切力小于0.6 Pa，在系统运动后，血管剪切力都比较大，血管分叉处的剪切力在0.6-1 Pa。

### 3 讨论 Discussion

血液流变学检测是医学科学中一种重要的监测手段。它的各项指标，对于许多疾病的病因研究、诊断、鉴别诊断、疾病发展和预后的判断、治疗和预防等有极其重要的作用，并且可以为研究微循环提供资料，有利于血流调节机制和血液中细胞结构和功能的关系的阐明，同时也可能对某些疾病的发病机制提出新的看法，如动脉粥样硬化的形成、血栓的形成机制，更重要的是，对血液及血管之间的作用、变化规律进行分析，能较全面地判断病情<sup>[22, 27-29]</sup>。

**3.1 一次性力竭运动对血液流变特性的影响** 由表1可知，一次性力竭运动后的血液黏度与安静状态相比较，血液黏度和红细胞压积增大。这是因为：首先，由于运动应激反应，交感神经兴奋刺激儿茶酚氨增多，脾脏内 $\alpha$ -受体激动导致红细胞输出，血液中红细胞数量增多<sup>[30]</sup>；其次，由于运动使血流加快，边缘池的红细胞进入循环池所致，从而导致红细胞压积和血液黏度增高<sup>[2]</sup>；再次，运动过程中的体液减少和无机盐丢失。血浆量减少和血液黏度增加，心输出量及有氧能力都将下降，会引起一系列连锁反应，如清除代谢产物、调节体温、运送养料等机能都将减弱，使疲劳很快出现，同时，能诱发冠状动脉性心脏病、动脉粥样硬化等血管疾病的发生<sup>[31]</sup>。

从表1可知，一次性力竭运动后与安静状态相比较，红细胞计数增加了2%；全血还原黏度有了一定程度的增加，高切、中切和低切全血还原黏度分别增加了5.1%、5.7%和5.6%。结果显示：一次性力竭运动后的结果与安静状态相比，红细胞聚集指数增加了1%，主要由于运动应激反应，交感神经兴奋使容量血管收缩，储备血液入循环，使循环血量增加；红细胞刚性指数增加了5%；红细胞电泳时间增加了6%；卡松屈服切力也增加了5.6%，但红细胞变形指数减少了1%，从而使红细胞变形能力降低。红细胞变形性降低可使血液流变性降低，并影响组织供氧和使心脏负荷加重，会使人体的运动能力下降。红细胞的变形性对于提高和维持人体的运动

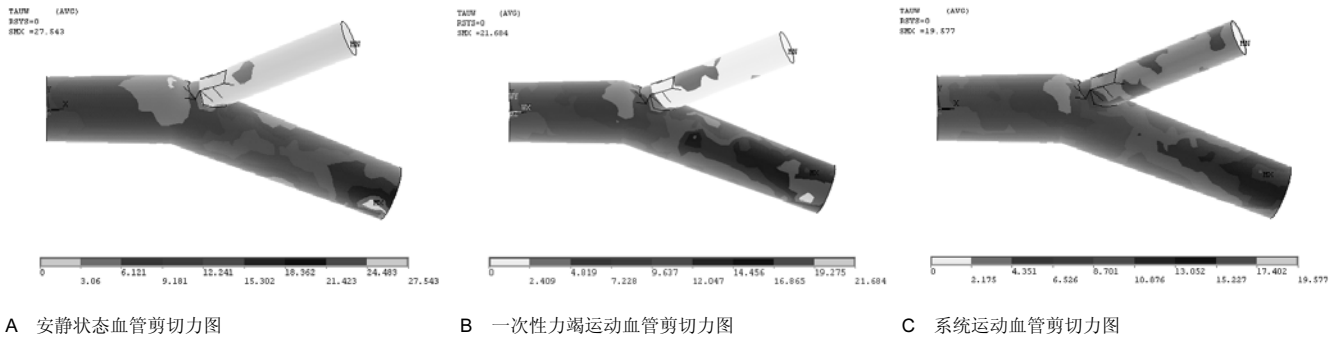


图2 体内血管模型

Figure 2 *In vivo* model of blood vessels

能力具有重要的作用,其功能的下降是导致运动性疲劳的原因之一<sup>[30]</sup>。也有研究表明,急性高强度运动后大量产生的自由基,是导致受试者血液流变性变坏的主要原因<sup>[32]</sup>。

**3.2 系统运动对血液流变特性的影响** 系统运动对血液流变性质的影响很早就被运动医学界所重视,许多资料表明,运动员血液具有与普通人不同的血液流变性质,包括红细胞压积较低、血红蛋白浓度较低等,在这些方面运动员有良好的体现<sup>[6]</sup>。这是因为长期的运动训练会增加人体的血容量,并且以血浆容量增加较多,而红细胞的增加较少,这样就会出现红细胞压积减少,单位容积内血红蛋白减少的结果<sup>[2]</sup>。

从表1试验结果可知,系统运动可使血液黏度在一定范围内适当下降,这是因为长期的训练或有氧锻炼使体内安静状态下血浆容量增加,血液相对稀释,则血液黏度降低了。系统运动使血浆容量增加,红细胞数量和压积相对减少,血液流变性得到改善,微循环也得到改善,系统运动加快了身体的散热,有利于体温调节,降低了运动时血浆水分转移而造成的血液浓缩程度,有利于维持运动时血液运输功能,粘滞性不致过高;经过长时间系统运动安静时红细胞数量比安静状态较高,这是运动引起的高血浆容量反应,这已被多数专家的实验所证实<sup>[1, 33-34]</sup>。

另外,经过3个月的系统运动后,细胞变形能力与安静状态比较有了一定的增加,具体表现为红细胞刚性指数显著降低,红细胞刚性指数减小,红细胞软化程度越高,红细胞变形性就越好。研究认为是运动训练降低了红细胞膜中丙二醛的含量,而提高了超氧化物歧化酶含量和活性以及 $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{ATP}$ 酶的活性,增强了红细胞抵御超氧自由基的能力,提高了红细胞膜的流动性,增强红细胞的变形能力<sup>[2, 32]</sup>。而也有研究认为是长期锻炼加速了红细胞的更新速度,降低了红细胞的刚性,增加了膜的弹性<sup>[6]</sup>。

系统运动使红细胞压积降低、电聚集增高,反映了系统运动使人体的机能代谢和物质代谢水平提高。通过以上的分析,可见系统运动对血液流变性质的影响与前人研究成果相一致<sup>[6, 35-36]</sup>。一次性力竭运动和系统运动的血液流变特性与安静状态相比较,除了红细胞聚集指数均升高外,其他血液流变特性的结果恰恰相反。

**3.3 运动方式对血管剪切力的影响** 血液是一种有黏稠度的液体,在血管流动的过程中必然会对血管壁产生力的作用,血液顺着流动的方向作用于管腔侧壁单位面积上的力就称为血管剪切力(shear stress, 符号 $\tau$ )。近年来,血管剪切力与运动方式相关性已经成为国内外研究的热点。运动方式与血管剪切力的相关性研究,对于血管疾病(特别动脉粥样硬化等)的早期预防和治疗有积极的作用。目前的研究多支持低剪切力学说,低剪切力有利于血管壁对氧化低密度脂蛋白的摄取<sup>[37-38]</sup>,诱导动脉粥样硬化的发生及斑块的成长,一定范围的高水平剪切力则有抗动脉粥样硬化作用,且对狭窄血管呈正性重塑作用粥样斑块形成与分布主要取决于低血管剪切力状态<sup>[39]</sup>。因此通过可靠的体内血管模型(图2),明确血管剪切力与运动方式之间的关系,从而为更好的预防动脉粥样硬化疾病的发生提供理论基础。

从最大剪切力分布来看,一次性力竭运动与系统运动相比较,剪切力均有不同程度的降低,而且系统运动比一次性力竭运动降低幅度要大一些。一次性力竭运动后,血管分岔处的剪切力小于 $0.6 \text{ Pa}$ ,这时就易发生动脉粥样硬化,局部低剪切力有利于动脉粥样斑块的形成,这是因为在血管分叉处,血流异常产生的血管剪切力变化,血管内皮细胞感受血管剪切力变化,通过跨膜蛋白、信号转导和基因表达等途径将力学信息传递到细胞内,再经级别放大作用将信息作用于相应的靶细胞,从而参与动脉粥样硬化的形成过程<sup>[38]</sup>。但随着斑块的进展,局部剪切力也逐渐增加,血管平滑肌细胞蛋白合成受到抑制,细胞凋亡增加,斑块易于破裂<sup>[20, 39]</sup>。在系统运动后,血管剪切力都比较大,血管分叉处的剪切力在 $0.6 - 1.0 \text{ Pa}$ 。有实验结果表明,高剪切力可使紧密连接表达增加,降低通透性。紧密连接百分率及条数明显减少<sup>[39]</sup>,因此这时血管不易发生动脉粥样硬化,对动脉硬化具有一定的阻碍作用。

从壁面剪切力分布来看,在入口处,其剪切力较大,在直血管阶段,随着X坐标的增加,其剪切力变得较小,到达血管分岔处,其剪切力变得几乎最小,在大血管和小血管的连接处其剪切力也非常小,低于主动脉分岔血管的前端,随着X坐标的进一步增加,小血管的剪切力较小,而大血管的剪切力比分岔处大一些,这符合以前研究的分布规律。

**结论:** 通过以上研究, 可得到如下结论: ①一次性力竭运动与安静状态血液参数相比较, 血液黏度、全血还原黏度、卡松黏度、血浆黏度、红细胞计数、红细胞刚性指数、红细胞电泳时间以及卡松屈服应力, 有一定的提高。但红细胞变形指数减少了。②系统运动与安静状态比较, 血液黏度、全血还原黏度、卡松黏度、血浆黏度、红细胞计数以及卡松屈服应力与安静状态血液参数相比较, 有一定的减小。但红细胞变形指数、红细胞刚性指数和红细胞电泳时间有一定的提高。③一次性力竭运动血管剪切力在分岔处小于0.6 Pa; 系统运动后血管处剪切力为0.6-1.0 Pa。④一次性力竭运动后易导致血液黏度增高, 容易诱发冠状动脉性心脏病、动脉粥样硬化等心血管疾病; 系统运动使全血及血浆黏度降低, 血流速度加快, 静脉血栓、动脉硬化发生的概率减少, 从而起到预防心血管病的作用。

**作者贡献:** 作者负责实验过程、数据分析, 并完成论文写作。

**利益冲突:** 文章及内容不涉及相关利益冲突。

**伦理要求:** 没有与相关伦理道德冲突的内容。

**学术术语:** 剪切力-指血流与血管内皮间的摩擦力, 是引起压疮的另一个原因。病理研究证实, 动脉粥样硬化病变发生的部位为低剪切力处动物实验表明, 高剪切力能防止粥样病变的发生。另外血流动力学的切应力指血流作用于血管壁单位面积的力, 也称为剪切力。

**作者声明:** 文章为原创作品, 无抄袭剽窃, 无泄密及署名和专利争议, 内容及数据真实, 文责自负。

#### 4 参考文献 References

- [1] 王海滨, 孙海涛. 不同运动方式对人体血液流变学的影响分析[J]. 河南教育学院学报:自然科学版, 2008, 17(1):88-90.
- [2] 陈德权, 李伟, 李慧, 等. 运动对血液流变学的影响及相关机制[J]. 漳州师范学院学报:自然科学版, 2010, 3:146-149.
- [3] 于基国. 运动和运动训练对红细胞的影响[J]. 中国运动医学杂志, 1997, 16(2):146-147.
- [4] 陈英杰. 不同强度的规则运动对血小板功能的影响及其机理的探讨[J]. 连云港职业技术学院学报, 2003, 16(2):60-62.
- [5] 洪平. 力竭性大强度耐力训练对优秀竞走运动员红细胞渗透脆性的影响[J]. 北京体育大学学报, 1997, 20(4):29-34.
- [6] 任建生. 长期运动训练对血液流变学的影响[J]. 中国运动医学杂志, 1996, 15(4):280-282.
- [7] 赵民, 杨国蕾, 冬云珊, 等. 运动对于血液流变学某些参数的影响[J]. 体育科研, 1991, 2:25.
- [8] 陈吉棣, 李可基, 霍卓平, 等. 运动员贫血的研究[J]. 中国运动医学杂志, 1990, 9(4):193.
- [9] Rainhart WH. Impaired red cell filterability with elimination of old red cells during a 100-km race. JAppl Physio. 1983;54(3):827-830.
- [10] 伊藤朗. 从运动生化到运动处方[M]. 北京:北京体育学院出版社, 1989:123-126.
- [11] 黄益民, 陈英杰, 钟伟, 等. 运动延迟性损伤系列研究之二大负荷运动后大鼠血液流变学的动态研究[J]. 中国运动医学杂志, 1996, 15(3):230-233.
- [12] 李可基, 陈吉棣, 陈志民, 等. 运动负荷中红细胞流变性的初步研究[J]. 中国运动医学杂志, 1989, 8(1):1-5.
- [13] 彭莉, 李焕春, 肖国强. 力竭性运动影响血液流变性的相关因素分析[J]. 西南师范大学学报, 2006, 31(3):72-76.
- [14] 陈绍芬. 急性心肌梗塞的血液流变学变化的临床意义[J]. 医学综述, 1996, 2(2):85-86.
- [15] Glagov S, Zarins C, Giddens DP, et al. Hemodynamics and atherosclerosis: insights and perspectives gained from studies of human arteries. Arch Pathol Lab Med. 1988; 112:1018-1031.
- [16] Cunningham KS, Gotlieb AI. The role of shear stress in the pathogenesis of atherosclerosis. Lab Invest. 2005; 85:9-23.
- [17] 刘有军, 刁越, 高松. 血液动力学与动脉粥样硬化(一)[J]. 北京生物医学工程, 2004, 23:293-295.
- [18] Augst AD, Ariff B, McG Thom SA, et al. Analysis of complex flow and the relationship between blood pressure wall. Physiol Heart Circ. 2007; 293(2):H1031-1037.
- [19] Li YS, Hags JH, Chien S. Molecular basis of the effects of shear stress on vascular endothelial cells. J Biomech. 2005; 38(10):1949-1971.
- [20] 孙涛, 王颖, 马志勇, 等. 兔颈总动脉不同形式剪切力及动脉粥样硬化模型的构建[J]. 2011, 49(2):62-66.
- [21] 王家权. 动脉粥样硬化的流体力学机制的理论研究和数值模拟研究[D]. 北京:北京工业大学, 2002.
- [22] 马桂清. 血液流变学检验及临床应用分析[J]. 中国保健营养, 2013, 1:458.
- [23] 陶祖莱. 生物力学导论[M]. 天津:天津翻译出版社, 2001.
- [24] 乔爱科, 刘有军. ANSYS和MATLAB在血流动力学可视化中的应用[J]. 北京工业大学学报, 2003, 29(1):87-93.
- [25] 乔爱科, 刘有军, 伍时桂. 弯曲动脉的血流动力学数值分析[J]. 计算力学学报, 2003, 20(2):155-163.
- [26] 蔺嫦燕, 吴广辉, 李冰一, 等. II型轴流VAD的CAD及流场分析[J]. 透析与人工器官, 2005, 16(3):18-23.
- [27] 毛江洪, 汪青山, 钮心怡, 等. 临床血液流变学的研究现状[J]. 中国优生与遗传杂志, 2013, 5:148-151.
- [28] 蒋灵霓. 血液流变学检验影响因素及临床应用探讨[J]. 国际检验医学. 2012, 33(5):633-635.
- [29] 林汉锋. 血液流变学检验及临床应用[J]. 中国医药指南, 2011, 9(20):39-40.
- [30] 马丽君, 梁丽珍. 关于一次性运动对运动员血液流变学影响的探讨[J]. 考试周刊, 2009, 27(下卷):150-151.
- [31] 任建生. 一次性运动对血液流变学的影响[J]. 中国运动医学杂志, 1996, 3:211-215.
- [32] 武宝爱, 吴丽君. 不同运动形式对人体血液流变性及血小板功能的影响[J]. 成都体育学院学报, 2012, 38(4):81-85.
- [33] Mitchell A, Collins W. Plasma volume change during heavy-resistance weight lifting. Eur J Physiolatry. 1986, 55:44.
- [34] Coyle EF, Hopper MK, Coggan AR. Maximal oxygen uptake relative to plasma volume extension. Int J Sports Med. 1990; 11(2):116
- [35] 李发琪, 杨瑞芳, 蒋稼欢, 等. 大鼠运动力竭后肠系膜毛细血管血流动力学变化的研究[J]. 中国运动医学杂志, 1999, 18(1):34-35.
- [36] 肖明冬. 血液流变学在运动医学研究中的应用[J]. 吉林体育学院学报, 2006, 22(2):75-78.
- [37] 陈伟华, 吴纪饶. 运动影响血液流变学[J]. 中国临床康复, 1999, 9(16):187-189.
- [38] 薛蕴善, 高培毅, 代成波. 颈动脉分叉血液动力状态的计算流体力学初步研究[J]. 中华放射学杂志, 2006, 40(6):638-642.
- [39] 秦海强, 王拥军. 局部血液动力学与颈动脉粥样硬化性斑块[J]. 中国卒中杂志, 2008, 1(3):65-69.