

·临床研究·

运动控制训练治疗慢性腰痛的临床疗效研究*

冯玉珠¹ 董继革² 陈雪丽^{3,4} 唐佳¹

摘要

目的:探讨运动控制训练(motor control exercise, MCE)对慢性腰痛(chronic low back pain, CLBP)的临床治疗效果。

方法:选择2021年1—8月CLBP患者37例,并随机分为试验组(n=18)和对照组(n=19)。两组训练均为每周3天,每天1次,每次60min。对照组均进行核心肌力训练(2组),试验组核心肌力训练(1组)后进行运动控制训练(1组)。共6周。分别在两组患者训练前、训练6周后进行疼痛视觉模拟评分(visual analogue scale, VAS)、Roland-Morris功能障碍调查表(Roland-Morris disability questionnaire, RMDQ)、静态平衡测试评估。

结果:治疗6周后,两组患者VAS、RMDQ治疗前后均有显著性差异($P<0.05$),试验组睁眼运动椭圆面、闭眼静态平衡指标、睁眼/闭眼长度较治疗前有显著差异($P<0.05$);治疗6周后,试验组VAS、RMDQ、睁眼静态平衡指标、闭眼左右方向平均运动速度、运动椭圆面积较对照组显著改善($P<0.05$)。

结论:MCE对CLBP患者来说能缓解疼痛,改善功能障碍,提高姿势稳定性,进一步提高本体感觉。

关键词 运动控制训练;慢性腰痛;姿势控制

中图分类号:R87,R493 文献标识码:A 文章编号:1001-1242(2023)-01-0068-06

Clinical effects of motor control exercise on chronic low back pain/FENG Yuzhu, DONG Jige, CHEN Xueli, et al./Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2023, 38(1): 68—73

Abstract

Objective: To investigate the clinical effect of motor control exercise(MCE) on chronic low back pain(CLBP).

Method: Thirty-seven patients with CLBP from January to August 2021 were selected and randomly divided into experimental group (n=18) and control group (n=19). Both groups received 60 minutes of training once a day, 3 days a week. The control group received core muscle strength training (2 groups), and the experimental group received motor control exercise (1 group) after core muscle strength training (1 group). A total of 6 weeks, visual analogue scale (VAS), Roland-Morris disability questionnaire (RMDQ), static balance test were evaluated before and 6 weeks after training, respectively.

Result: After 6 weeks of treatment, there were significant differences in VAS, RMDQ between 2 groups before and after treatment($P<0.05$). There were significant differences in ellipse area of open eye movement, static balance index of closed eye and length of open eye/closed eye in experimental group compared with before treatment($P<0.05$). After 6 weeks of treatment, VAS, RMDQ, static balance index of eyes opening, average movement speed of left and right direction and ellipse area of eyes closing in the experimental group were significantly improved compared with the control group($P<0.05$).

Conclusion: MCE can relieve pain, improve functional dysfunction, improve postural stability, and further improve proprioception in CLBP patients.

Author's address Tianjin University of Sport, 301617

Key word motor control exercise; chronic low back pain; postural control

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2023.01.012

*基金项目:2021年度北京市医院管理中心“扬帆”计划重点医学专业(ZYLX202133)

1 天津体育学院,天津市,301617; 2 中国中医科学院望京医院; 3 北京老年医院; 4 通讯作者
第一作者简介:冯玉珠,女,初级治疗师; 收稿日期:2021-10-21

腰痛(low back pain, LBP)是公共卫生中最常见的肌肉骨骼问题,在人群中,其终生患病率高达80%。虽然在大多数情况下LBP可在没有任何医疗干预的情况下恢复,但复发率很高^[1]。慢性腰痛(chronic low back pain, CLBP)定位于第12肋骨下侧面和臀下皱襞之间的区域,包含疼痛时间超过3个月的持续症状^[2]。

CLBP目前有多种治疗方案,运动疗法、物理治疗、中医传统治疗等都在临床被广泛应用。其中,运动疗法是当前被广泛推荐的一种治疗方法。2019年,我国多位专家联合发表《运动疗法治疗腰痛专家共识》^[3],依据中国特色制定了运动疗法治疗腰痛的规范和推荐建议。其中,运动控制训练被列为治疗CLBP的强推荐(A级)运动。

运动控制(motor control, MC)指控制姿势和运动的运动、感觉和中枢过程^[4]。CLBP患者的运动控制能力降低或控制障碍会引起疼痛。各种研究假设运动控制缺陷属于LBP的一个大的亚组,可以从特定的运动中获益^[5]。此亚组为运动控制障碍(movement control impairment, MCI)亚组,为Dewitte V^[6]等提出的五大亚组之一,高达1/3的腰痛患者可能属于运动控制障碍亚组^[7]。

本试验针对运动控制障碍亚组患者进行运动控制训练(motor control exercise, MCE)。MCE是以腰-骨盆区域的神经肌肉控制为目标,重点是招募和控制参与保护脊柱和骨盆的关键肌肉^[8],旨在恢复脊柱的最佳控制,以满足躯干的功能需求^[9]。因此,本研究通过Huber 360(法国LPG公司)对CLBP患者进行运动控制训练,旨在观察对疼痛和功能障碍的改善以及平衡与本体感觉功能的恢复状况,为CLBP的康复治疗提供新方法。

1 资料与方法

1.1 一般资料

研究对象为2021年1—8月在北京老年医院康复科门诊收治的CLBP患者37例。所有患者均符合北美脊柱协会NASS2020版腰痛临床诊疗指南^[10]中CLBP诊断标准。

纳入标准:①确定为运动控制障碍者(《腰痛运动控制障碍筛查测验》^[11]≥2项不正确);②30岁≤年

龄<70岁者;③初次发病或反复发作者,疼痛≥3个月;④2分≤疼痛视觉模拟评分(visual analogue scale, VAS)<6分者;⑤神志清楚,可配合查体、无严重认知功能障碍者;⑥签署知情同意书者。

排除标准:①脊柱或下肢患有肿瘤、结核、骨折或有外科手术者;②既往有癫痫病史,有严重的心、肺、肝、肾等重要脏器功能衰竭或患有神经系统疾病者;③严重的认知、交流障碍、情绪障碍、烦躁等不能配合者;④严重骨质疏松者;⑤妊娠期及哺乳期妇女者;⑥之前参加过腰痛的康复训练者;⑦无前庭功能障碍及视觉障碍者。

剔除和脱落标准:①不能坚持完整治疗周期者;②因其他原因无法配合全程康复治疗者。

通过随机数字表法将37例受试者分为试验组18例,对照组19例(表1)。两组患者一般资料比较无显著性差异($P>0.05$),病例无脱落。本研究经过北京老年医院伦理委员会批准(批号:2021-008)。试验过程中无不良事件发生。

表1 一般资料

组别	例数	年龄(岁)	性别(例)		BMI
			男	女	
试验组	18	52.33±11.67	8	10	23.31±3.71
对照组	19	53.26±12.71	10	9	23.83±2.54
χ^2/t 值		-0.231	0.248		-0.497
P 值		>0.05	>0.05		>0.05

1.2 研究方法

两组受试者均进行相同理疗(中频+超短波)。每组训练前均进行热身活动:步行或踏车训练10min。两组运动训练均为每周3天,每天1次,每次60min。对照组均进行核心肌力训练(2组),试验组核心肌力训练(1组)后进行运动控制训练(1组)。共6周。

1.2.1 运动控制训练(采用法国LPG公司Huber[®]360进行训练,每组30min):该设备是一个椭圆形的电动平台,它执行旋转,振幅和速度可变的振荡运动。它包括一个配有力传感器的手柄系统。平台干扰了受试者的平衡,受试者必须通过用手臂用力推拉来不断调整姿势。更具体地说,该设备通过视觉反馈提供姿势和肌肉适应。一套4个程序,用于4种不同的使用级别,使系统能够适应不同的用户配置文件^[12]。在10min热身后,开始训练模式(20min)。

第一阶段(5min):选择 posture and balance 模块(身体姿势按照屏幕上的指定动作,上肢不参与运动,只双下肢在不稳定平台上进行活动,以保持身体平衡,共训练6周。此模块共分6级,难度由低到高,从低难度开始训练,最终评分>90%即为合格,可进入下一级别训练)。第二阶段(15min):采用Huber中剩余三大模块进行训练,按照模块难度有序进行,难度逐渐递增。最终评分>90%即为合格,本模块中所有训练完全合格可提前进行下一模块训练。受试者姿势要求:受试者按照屏幕上的指定姿势进行训练,即通过各种手和脚的组合姿势,并在手柄上形成低——高的力量水平,受试者训练中平衡被干扰,必须通过手臂用力推拉来不断调整姿势以维持平衡。

1.2.2 核心肌力训练(每组30min):在10min热身后开始训练,臀桥+膝手位平衡训练+四点支撑+俯卧位支撑训练,除臀桥外,每个动作坚持时间依据患者身体情况,大约坚持20—40s。每个动作各训练5min,共20min。因腰痛种类多样,若受试者不适用于此训练动作,需及时调整,可相应延长其他训练动作时间或替换其他适合动作,训练总时间不变。

1.3 评定指标

1.3.1 主要指标:疼痛视觉模拟评分(VAS):按0—10分来评估受试者的疼痛程度。

1.3.2 次要指标:①Roland-Morris 功能障碍调查表(Roland-Morris disability questionnaire, RMDQ):通过24个问题来调查受试者的功能障碍,每题0—1分,分数越高,障碍程度越严重。②静态平衡测试(Tecnobody PK252 意大利):进行双足睁眼、闭眼测试,每次30s,共1min。电子倾斜板上有S1到S8共8个区域,要求双足第二脚趾对着A2、A8线,双脚并拢于A5线。内踝前3cm在电子倾斜板A3/A7线上。主要选取前后方向平均运动速度(mm/s):前后方向偏移的快慢程度;左右方向平均运动速度(mm/s):左右方向偏移的快慢程度;运动椭圆面积(mm²):测试时间内身体压力中心轨迹的总面积;运动长度(mm):测试时间内身体压力中心的总长度;Romberg值,包括闭眼轨迹面积/睁眼轨迹面积、闭眼轨迹长度/睁眼轨迹长度。其中,Romberg值指站立重心摇动时闭眼、睁眼差别的检查,可检查视觉代偿,反映视觉对姿势控制的调节作用。

1.4 统计学分析

采用SPSS 23.0进行统计学处理,对计数资料采用 χ^2 检验,计量资料进行正态性检验后采用独立样本t检验进行组间分析,配对样本t检验进行组内分析,结果以均数±标准差表示。若不符合正态性分布,则采用秩和检验。统计结果P<0.05为有显著性差异。

2 结果

2.1 两组患者治疗前后VAS、RMDQ结果比较

试验组和对照组中VAS、RMDQ治疗前后均有显著性差异;治疗6周后组间对比,VAS、RMDQ均有显著性差异,且具有临床意义(表2)。

2.2 两组患者治疗前后静态平衡结果比较

试验组治疗前后睁眼运动椭圆面积、闭眼情况下4项指标、闭眼/睁眼长度均有显著性差异,对照组治疗前后均无显著性差异;治疗6周后组间对比,试验组睁眼情况下4项指标、闭眼左右方向平均运动速度、闭眼运动椭圆面积均有显著性差异(表3—4)。

表2 两组患者治疗前后VAS、RMDQ结果比较 ($\bar{x}\pm s$, 分)

组别	VAS	RMDQ
试验组		
治疗前	4.22±1.06	15.44±5.29
治疗6周后	1.17±0.86 ^①	4.33±2.61 ^①
对照组		
治疗前	3.68±1.25	12.05±5.15
治疗6周后	2.53±0.84 ^①	8.05±2.46 ^①
t值	-4.868	-4.460
P值	0.000	0.000

注:组内结果,各组分别与治疗前比较,①P<0.05;表中所列t值、P值均为组间结果。

3 讨论

本研究首次引入国外运动控制障碍筛查测验,此测验已被证实其可靠性^[13]。它通过6项主动运动测试来评估LBP患者的运动控制障碍,其中,≥2项测试结果异常便可以认定为运动控制障碍患者。Meier ML^[14]等通过此项筛查测验对运动控制障碍患者进行针对性训练,结果表明患者的运动控制能力、功能障碍都有显著改善,然而此次试验缺乏对照组。Saner J^[15]等研究中也使用了此筛查测验进行了随机对照研究,结果表明,运动控制训练与一般运动相比可减轻患者的残疾情况,并再次证实了此项筛

表3 两组患者治疗前后睁眼与闭眼下静态平衡结果比较

($\bar{x}\pm s$)

	对照组		试验组		t值	P值
	治疗前	治疗6周后	治疗前	治疗6周后		
睁眼前后平均运动速度(mm/s)	13.00±7.83	11.79±4.05	10.78±5.08	9.11±2.61	-2.376	0.023
左右平均运动速度(mm/s)	9.68±4.24	9.11±2.36	8.89±2.85	7.50±2.04	-2.213	0.034
运动椭圆面积(mm ²)	368.89±384.37	328.32±157.60	351.72±156.82	230.67±104.69 ^①	-2.207	0.034
运动长度(mm)	539.00±264.87	498.42±137.49	471.06±170.07	401.61±94.56	-2.482	0.018
闭眼前后平均运动速度(mm/s)	19.42±9.57	17.05±9.50	19.44±9.66	13.11±4.47 ^①	-1.629	0.115
左右平均运动速度(mm/s)	13.00±7.94	13.53±6.51	15.50±7.35	9.67±3.68 ^①	-2.203	0.034
运动椭圆面积(mm ²)	805.26±555.97	752.68±560.78	860.33±560.76	458.22±256.89 ^①	-2.071	0.049
运动长度(mm)	781.11±372.81	762.32±342.74	817.89±380.26	545.39±169.08 ^①	-2.052	0.050

注:组内结果,各组分别与治疗前比较,①P<0.05;表中所列t值、P值均为组间结果。

表4 两组患者治疗前后静态平衡Romberg结果比较

($\bar{x}\pm s$)

	对照组		试验组		t值	P值
	治疗前	治疗6周后	治疗前	治疗6周后		
闭眼/睁眼面积	305.95±244.80	214.58±97.92	292.83±245.34	227.72±138.17	0.335	0.739
闭眼/睁眼长度	154.74±61.72	143.11±45.44	177.56±59.23	136.50±35.54 ^①	-0.491	0.627

注:组内结果,各组分别与治疗前比较,①P<0.05;表中所列t值、P值均为组间结果。

查测验的可靠性。

本研究将运动控制训练与常规核心肌力训练结合,与单纯常规核心肌力训练作对比,结果也进一步证实运动控制训练对于CLBP的疼痛和功能障碍的改善作用,并且试验组治疗前后VAS与RMDQ的结果差异分别大于2^[16]和5^[17],变化超过它们各自的最小临床重要性差异(minimal clinically importance difference, MCID),这表明本试验疼痛与功能障碍改善结果同时具有临床意义。

有研究指出,与健康人相比,腰痛患者的平衡能力下降。当人体暴露在意外载荷下时,肌肉应该迅速做出反应,以保持平衡和对抗载荷的姿势,但是腰痛患者的反应时间延迟,引起的腰椎节段性不稳定会导致躯干灵活性和平衡能力下降,这是姿势调整受损和肌肉活动能力下降导致的^[18]。此外,由于组织的创伤性损伤、肌肉疲劳和/或伤害感受器的激活,本体感觉信息可能会减少或中断,从而干扰运动控制^[19]。

本试验运动控制训练所采用的Huber机器提供视觉反馈与姿势反馈,可缓解疼痛并在舒适条件下提高患者的肌肉灵活性、关节灵活性和肌肉力量^[20],并使患者在固定姿势条件下对单块肌肉进行针对性训练,对腰痛患者来说可以进一步强化多裂肌、腰方肌、腹内外斜肌等,提高深层脊柱的稳定力量。Letatfatkar A^[21]等通过随机对照试验证实了这点。Huber可为运动控制障碍患者提供针对性训练,并且与

其他运动控制训练相比在运动前提供前馈姿势调整,为单块肌肉的增强训练做好充足准备。

本研究针对患者的姿势稳定性进行静态平衡评估。是因为有研究指出,目前对姿势稳定性控制的研究绝大多数还是集中在对不同直立位下静息时的姿势控制^[22],LBP患者在短时间站立(<90s)期间姿势控制发生改变。一般来说,在安静站立期间,CLBP患者在前后(A-P)方向摇摆较多,在平衡约束下,姿势控制适应性较差^[23]。从动作难度方面考虑,前后方向平均移动速度、左右方向平均移动速度、运动椭圆面积、运动长度这4个反映静态平衡能力及人体压力中心移动轨迹的指标,它们的数值越大,则表示人体的静态平衡能力越差^[24]。

本研究结果表明,试验组与对照组相比,在训练6周后静态平衡结果总体有显著性变化(P<0.05),尤其是在睁眼和闭眼情况下运动椭圆面积均有显著性改变(P<0.05),这说明试验组的姿势稳定性较训练前显著改善。平衡系统利用来自3个主要感官来源(视觉、前庭和本体感觉)的信息来产生维持平衡的肌肉反应。在CLBP患者中,受损的本体感觉结构可能导致错误的肌肉反应,可能导致姿势控制、躯干重新定位和平衡方面的缺陷^[25]。感官重估理论表明,如果3个主要感官输入中的一个发生改变或减少,神经系统会更多地依赖其他平衡系统来进行调整,以维持平衡^[26]。

研究报道CLBP患者本体感觉缺失,这可能导

致他们平衡控制受损,最终可能更依赖视觉输入来控制平衡^[27],因此,当视觉输入被改变或移除时,不太可能保持平衡。本研究测试了CLBP患者睁眼与闭眼下的静态平衡情况,结果表明6周后试验组Romberg比值与对照组相比并无显著变化,但是,闭眼情况下试验组与对照组相比左右平均运动速度与运动椭圆面积均有显著性差异($P<0.05$),而且试验组闭眼情况下治疗前后4项指标均有显著性差异($P<0.05$),这说明在无视觉输入的情况下平衡功能也提高了,试验组CLBP患者的本体感觉功能有明显进步。

本试验尚有不足之处,研究样本量相对较少,之后还需进一步扩大研究;LBP为易复发性疾病^[28],之后还需要进一步随访观察。总的来说,运动控制训练对CLBP患者来说可缓解疼痛,改善功能障碍,提高姿势稳定性,进一步提高本体感觉。

参考文献

- [1] Sheikhhoseini R, O'Sullivan K, Alizadeh MH, et al. Altered motor control in athletes with low back pain: a literature review[J]. *Ann Appl Sport Sci*, 2016, 4(4): 43—50.
- [2] Markman JD, Czerniecka-Fox K, Khalsa PS, et al. AAPT diagnostic criteria for chronic low back pain[J]. *J Pain*, 2020, 21(11—12): 1138—1148.
- [3] 王雪强,陈佩杰,矫玮,等.运动疗法治疗腰痛的专家共识[J]. *体育科学*, 2019, 39(3): 19—29.
- [4] Hides JA, Donelson R, Lee D, et al. Convergence and divergence of exercise-based approaches that incorporate motor control for the management of low back pain[J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2019, 49(6): 437—452.
- [5] Roshini PD, Aseer PAL. Motor control training in chronic low back pain[J]. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, 2019, 13(4): YC01—YC05.
- [6] Dewitte V, De Pauw R, De Meulemeester K, et al. Clinical classification criteria for nonspecific low back pain: a Delphi-survey of clinical experts[J]. *Musculoskelet Sci Pract*, 2018(34): 66—76.
- [7] Luomajoki H, Hannu. Movement control impairment as a possible sub-group of non specific Low Back Pain[J]. *International Musculoskeletal Medicine*, 2010, 32: 88.
- [8] Mendis MD, Hides JA. Effect of motor control training on hip muscles in elite football players with and without low back pain[J]. *J Sci Med Sport*, 2016, 19(11): 866—871.
- [9] Halliday MH, Ferreira PH, Hancock MJ, et al. A randomized controlled trial comparing McKenzie therapy and motor control exercises on the recruitment of trunk muscles in people with chronic low back pain: a trial protocol[J]. *Physiotherapy*, 2015, 101(2): 232—238.
- [10] Kreiner DS, Matz P, Bono CM, et al. Guideline summary review: an evidence-based clinical guideline for the diagnosis and treatment of low back pain[J]. *Spine J*, 2020, 20(7): 998—1024.
- [11] Luomajoki H, Kool J, de Bruin ED, et al. Movement control tests of the low back: evaluation of the difference between patients with low back pain and healthy controls [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2008(9): 170.
- [12] Couillandre A, Duque Ribeiro MJ, Thoumie P, et al. Changes in balance and strength parameters induced by training on a motorised rotating platform: a study on healthy subjects[J]. *Ann Readapt Med Phys*, 2008, 51(2): 59—73. English, French.
- [13] Jeong UC, Sim JH, Kim CY, et al. The effects of gluteus muscle strengthening exercise and lumbar stabilization exercise on lumbar muscle strength and balance in chronic low back pain patients[J]. *J Phys Ther Sci*, 2015, 27(12): 3813—3816.
- [14] Meier ML, Vrana A, Schweinhardt P. Low back pain: the potential contribution of supraspinal motor control and proprioception[J]. *The Neuroscientist*, 2019, 25(6): 583—596.
- [15] Saner J, Luomajoki H, Sieben JM, et al. Movement control exercise versus general exercise to reduce disability in patients with low back pain: randomized controlled multicentre study[J]. *Physiotherapy*, 2015, 101: E917—E918.
- [16] Zheng YL, Wang XF, Chen BL, et al. Effect of 12-week whole-body vibration exercise on lumbopelvic proprioception and pain control in young adults with nonspecific low back pain[J]. *Med Sci Monit*, 2019(25): 443—452.
- [17] Scott DIC, McCray DG, Lancaster PG, et al. Validation of the musculoskeletal health questionnaire(MSK-HQ) in primary care patients with musculoskeletal pain[J]. *Semin Arthritis Rheum*, 2020, 50(5): 813—820.
- [18] Luomajoki H, Kool J, de Bruin ED, et al. Reliability of movement control tests in the lumbar spine[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2007(8): 90.
- [19] Luomajoki H, Kool J, de Bruin ED, et al. Improvement in low back movement control, decreased pain and disability, resulting from specific exercise intervention[J]. *Sports Med Arthrosc Rehabil Ther Technol*, 2010(2): 11.
- [20] Carmen Liliana G, Mariana C, Ovidiu Cristian C. Rehabilitation of muscle strength by means of the Huber 360 platform in lumbar radiculopathy[J]. *Physical Education, Sport and Kinetotherapy Journal*, 2019, 12: 76—79.

- [21] Letafatkar A, Nazarzadeh M, Hadadnezhad M, et al. The efficacy of a HUBER exercise system mediated sensorimotor training protocol on proprioceptive system, lumbar movement control and quality of life in patients with chronic non-specific low back pain[J]. *J Back Musculoskelet Rehabil*, 2017, 30(4): 767—778.
- [22] 罗春, 王宁华. 腰痛患者姿势稳定性的研究进展[J]. *中国康复医学杂志*, 2008, 23(1): 90—93.
- [23] Lafond D, Champagne A, Descarreaux M, et al. Postural control during prolonged standing in persons with chronic low back pain[J]. *Gait Posture*, 2009, 29(3): 421—427.
- [24] 刘丹, 陆阿明. 双重认知任务介入对人体静态稳定性的影响[J]. *湖北体育科技*, 2019, 38(10): 903—909.
- [25] Berenshteyn Y, Gibson K, Hackett GC, et al. Is standing balance altered in individuals with chronic low back pain? a systematic review[J]. *Disabil Rehabil*, 2019, 41(13): 1514—1523.
- [26] Meier ML, Stämpfli P, Vrana A, et al. Neural correlates of fear of movement in patients with chronic low back pain vs. pain-free individuals[J]. *Front Hum Neurosci*, 2016, 10: 386.
- [27] Mok NW, Brauer SG, Hodges PW, et al. Hip strategy for balance control in quiet standing is reduced in people with low back pain[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2004, 29(6): E107—E112.
- [28] da Silva T, Mills K, Brown BT, et al. Recurrence of low back pain is common: a prospective inception cohort study[J]. *J Physiother*, 2019, 65(3): 159—165.

(上接第67页)

- thelial cells to physiologically-modeled, variable shear stress[J]. *PLoS One*, 2013, 8(2): e57004.
- [24] Rodríguez I, González M. Physiological mechanisms of vascular response induced by shear stress and effect of exercise in systemic and placental circulation[J]. *Front Pharmacol*, 2014, 5: 209.
- [25] Resnick N, Yahav H, Shay-Salit A, et al. Fluid shear stress and the vascular endothelium: for better and for worse[J]. *Prog Biophys Mol Biol*, 2003, 81(3): 177—199.
- [26] Peiffer V, Sherwin SJ, Weinberg PD. Does low and oscillatory wall shear stress correlate spatially with early atherosclerosis? A systematic review[J]. *Cardiovasc Res*, 2013, 99(2): 242—250.
- [27] Chiu JJ, Chien S. Effects of disturbed flow on vascular endothelium: pathophysiological basis and clinical perspectives[J]. *Physiol Rev*, 2011, 91(1): 327—387.
- [28] Irace C, Cortese C, Fiaschi E, et al. Wall shear stress is associated with intima-media thickness and carotid atherosclerosis in subjects at low coronary heart disease risk[J]. *Stroke*, 2004, 35(2): 464—468.
- [29] Green DJ. Exercise training as vascular medicine: direct impacts on the vasculature in humans[J]. *Exerc Sport Sci Rev*, 2009, 37(4): 196—202.
- [30] Kim B, Lee H, Kawata K, et al. Exercise-mediated wall shear stress increases mitochondrial biogenesis in vascular endothelium[J]. *PLoS One*, 2014, 9(11): e111409.
- [31] Phillips SA, Mahmoud AM, Brown MD, et al. Exercise interventions and peripheral arterial function: implications for cardio-metabolic disease[J]. *Prog Cardiovasc Dis*, 2015, 57(5): 521—534.
- [32] Thijssen DH, Dawson EA, Black MA, et al. Brachial artery blood flow responses to different modalities of lower limb exercise[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2009, 41(5): 1072—1079.
- [33] McCormick ME, Tzima E. Pulling on my heartstrings: mechanotransduction in cardiac development and function[J]. *Curr Opin Hematol*, 2016, 23(3): 235—242.
- [34] Iring A, Jin YJ, Albarrán-Juárez J, et al. Shear stress-induced endothelial adrenomedullin signaling regulates vascular tone and blood pressure[J]. *J Clin Invest*, 2019, 129(7): 2775—2791.