

挤压疗法在血管病中的应用及研究进展

魏佳男^{1,2}, 王亚伟^{1,2}, 刘雪松^{1,2}, 王峻华^{1,2}, 樊瑜波^{1,2,3}

(1. 北京航空航天大学 生物与医学工程学院, 生物力学与力生物学教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京航空航天大学 生物医学工程高精尖创新中心, 北京 102402; 3. 民政部国家康复辅具研究中心, 北京 100176)

摘要:包括心脑血管疾病和下肢外周血管疾病在内的血管病严重威胁着人民生命健康,挤压疗法的出现对有效地预防和治疗这些血管病具有重要意义,其临床效果已经得到许多研究成果的证实。挤压疗法是一类通过挤压装置实现的无创物理疗法,典型的挤压治疗装置有:用于治疗多种缺血性疾病的体外反搏装置、用于治疗多种下肢外周血管疾病的间歇气动加压装置、用于治疗深静脉血栓等的逐级加压袜等。总结这几种典型的挤压疗法及其在心脑血管病和下肢外周血管病中的临床应用,并对其优势与局限性进行相应的分析,探讨开展生物力学研究的必要性和意义。

关键词:挤压疗法; 心脑血管疾病; 下肢外周血管疾病

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2020.01.023

Applications of Compression Therapy in Vascular Diseases and its Research Progress

WEI Jianan^{1,2}, WANG Yawei^{1,2}, LIU Xuesong^{1,2}, WANG Junhua^{1,2}, FAN Yubo^{1,2,3}

(1. School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Advanced Innovation Centre for Biomedical Engineering, Beihang University, Beijing 102402, China; 3. National Research Center for Rehabilitation Technical Aids, Beijing 100176, China)

Abstract: Vascular diseases including cardiovascular and cerebrovascular diseases and peripheral vascular diseases of the lower extremities are serious threats to human health. The emergence of compression therapy is of great significance for the effective prevention and treatment of these vascular diseases and the therapeutic value of compression therapy has been confirmed by many research results at present. Compression therapy is a non-invasive physical therapy implemented through a series of compression therapy devices, including external counterpulsation for the treatment of various ischemic diseases, intermittent pneumatic compression for the treatment of some peripheral vascular diseases in the lower extremities, graduated compression stockings for the treatment of deep vein thrombosis, and so on. This review summarizes clinical applications of these typical compression therapies in cardiovascular and cerebrovascular diseases and peripheral vascular diseases of the lower extremities, analyzes their advantages and limitations, and discusses the necessity and significance of biomechanical research on compression therapies.

Key words: compression therapy; cardiovascular and cerebrovascular diseases; lower extremity peripheral vascular diseases

挤压疗法是一类通过加压人体不同部位以治疗疾病的物理疗法,目前已被广泛地应用于心脑血管疾病以及下肢外周血管疾病的预防和治疗^[1]。挤压疗法需要借助相应的医疗器械来完成,目前临床上广泛应用的典型器械有间歇式气动压缩装置(intermittent pneumatic compression, IPC)、逐渐加压袜(graduated compression stockings, GCS)和增强型体外反搏装置(enhanced external counterpulsation, EECP)等。大量临床研究证实,挤压疗法可以改善血流、减缓疼痛、预防或治疗溃疡和坏疽、抑制疾病进展、防止心血管并发症等。目前,挤压疗法改善局部血流的具体生物力学机制尚未得到充分研究,限制了相关医疗器械的改进和推广。本文对当前典型挤压疗法及相关医疗器械的临床应用及研究进展情况进行综述,为深入研究挤压疗法的生物力学机理及相关器械的改进提供参考。

1 挤压疗法在心脑血管疾病方面的应用及研究进展

随着我国社会结构的快速老龄化,心脑血管疾病所带来的社会负担日益突出^[2]。在当前无创疗法中,EECP在缺血性心脑血管疾病的康复治疗中有很好的应用前景。EECP不仅可以提高舒张期动脉血压,增加冠状动脉、大脑和肾动脉的舒张期血流,还能促进血管舒张因子或与血管生成有关的因子的释放,增强静脉回流和心输出量,增加侧支灌注,能有效降低心绞痛发作次数和硝酸盐类药物的使用频率,延长运动诱发的缺血时间,增加运动耐受,并改善症状性稳定型心绞痛患者的生活质量,有望成为心脑血管病患者康复治疗的首选方案之一。

1.1 EECP在缺血性心血管疾病中的应用及研究进展

EECP研发的初衷是替代有创的主动脉内球囊技术,用于急性心肌梗死和心源性休克患者的辅助治疗,后来逐渐在冠状动脉粥样硬化性心脏病(冠心病)、稳定型心绞痛患者的治疗中发挥重要作用。2002年,EECP被美国心脏病学会/美国心脏协会正式纳入冠心病心绞痛的临床治疗指南^[3]。以郑振声教授为代表的国内外学者对体外反搏治疗冠心病和心绞痛的经验进行了大量报道^[4-5]。国内外

EECP多中心随机对照研究表明,EECP能改善稳定性心绞痛患者的心肌缺血,改善其治疗1年后的临床预后;可促进冠心病患者冠脉侧支血管形成等,对EECP疗法临床反应良好的心绞痛患者,获益可维持长达5年^[5-7]。EECP治疗还有助于促进左心室功能恢复,是治疗心力衰竭的有效方式。对临床稳定型轻度至中度心衰患者和左心室功能障碍患者,EECP治疗可以增加峰值吸氧量,改善运动能力和功能状态,从而改善患者的生活质量,而收缩性和舒张性心力衰竭者均可获益^[7]。对轻、中度稳定型老年心衰患者,EECP能够提高高峰耗氧量;对于心功能II~III级(按照纽约心脏病协会NYHA分级)的慢性收缩性心衰患者,标准治疗联合EECP治疗能进一步延长病人的运动时间^[8]。

缺血性心血管疾病是目前EECP疗法的主要适应症,其效果已被大量的临床数据证实,但也存在一些禁忌症,如中至重度的主动脉关闭不全、夹层动脉瘤、肺动脉高压、未控制的高血压、心率失常、活动性静脉血栓等^[6]。这些禁忌症以及现有体外反搏装置体积较大、噪声高的缺点,是限制体外反搏疗法进一步推广的主要临床和技术原因。

1.2 EECP在缺血性脑卒中治疗中的应用

尽管EECP的设计初衷是用于缺血性冠心病,但越来越多的证据表明EECP还可以通过升高血压来改善缺血性脑卒中脑灌注和侧支血液供应。香港中文大学黄家星教授课题组的相关研究显示,EECP治疗急性脑卒中患者期间颈动脉灌注增强,EECP治疗后脑灌注有所改善,临床结果表现良好^[9]。研究发现,EECP可以降低脑卒中患者的血压变异性,显著增加收缩压和舒张压,改善受损的脑自动调节^[9-10]。Xiong等^[11]提出通过测量脑血流增强指数评估急性缺血性脑卒中后EECP引起的脑血流增加效应与临床结果之间的相关性,发现EECP治疗的持续时间是EECP治疗缺血性卒中患者良好功能预后的重要预测因子;脑卒中患者的脑血流增强指数仅与患侧的平均血压变化有关。此外,EECP还有助于改善脑卒中患者的血压和脑血流速度的关系,提高动脉壁剪切应力,对缺血性脑卒中患者脑血管闭塞性疾病和中度神经功能缺损的恢复有益^[9,12-13]。

EECP治疗急性脑卒中患者的有效性和安全性

还需要更大样本量的随机对照试验来进一步确定。后续的临床研究重点包括了解其临床益处的机制、明确治疗时效,对可能从 EECF 治疗中获益的缺血性脑卒中患者进行分类,以及避免引发禁忌症等不良临床反应。

2 挤压疗法在下肢外周血管疾病方面的应用及研究进展

外周血管疾病是导致每年大量患者住院的主要因素之一,目前最常见的外周动脉疾病是间歇性跛行和严重肢体局部缺血,而下肢静脉疾病的发病率更高,且病理机制更复杂^[14-15]。以 GCS、IPC 及弹力绷带为代表的挤压疗法,是大多数慢性下肢静脉疾病是基本治疗手段^[15]。2008 年《国际血管学杂志》发表的《基于循证医学证据的下肢慢性静脉疾病治疗指南》指出:挤压治疗是深静脉血栓形成后综合征的 A 级推荐,是静脉水肿的 B 级推荐和淋巴水肿的 C 级推荐^[16]。

2.1 挤压疗法在慢性静脉功能不全中的应用及研究进展

慢性静脉功能不全是慢性下肢静脉疾病中最常见的一种疾病,包括下肢深静脉瓣膜功能不全、下肢慢性静脉溃疡、下肢浅静脉曲张等。目前,临床上广泛应用于治疗慢性静脉功能不全的治疗手段有逐渐加压弹力袜和间歇式气动压缩^[17]。这两种挤压疗法可以有效减少静脉扩张和静脉淤滞,增加深静脉内的血流,增加剪切应力、降低静脉血压、减少间质性肿胀等,从而达到预防静脉高压,治疗小腿水肿、静脉曲张等慢性静脉功能不全疾病的功效。

挤压疗法是静脉溃疡护理的金标准^[15],可显著提高溃疡的愈合速率。在符合标准的患者中,采用压力治疗 6 个月约 75% 静脉溃疡可以愈合,治疗 1 年可达到 90%^[17]。GCS 对静脉功能的改善效果取决于在踝关节处施加的压力水平,理想情况下,踝部压力为 3.99~5.32 kPa (30~40 mmHg, 1 mmHg = 0.133 kPa) 的 GCS 效果最佳,可增加静脉流量、减少行走时的瓣膜反流、增加小腿肌肉泵的功效。Liu 等^[18]研究认为,采用轻度和中度压力水平的 GCS 对肢体实现梯度加压,能有效减少静脉扩张和积液,改善下肢静脉回流,即可满足大多数临床应用,

更适合于日常工作中长期不活动的受试者。

IPC 也被证实可有效消除水肿,改善氧气输送和溃疡愈合,缩短治疗时间,减少抗生素的使用,增强患者舒适度。Nikolovska 等^[19]对比两种 IPC 治疗对下肢静脉溃疡的治疗效果,发现快速通气-短期维持压缩-快速缓解的 IPC 治疗更快速有效。研究还表明,高达 5.32 kPa (40 mmHg) 压力的非弹性绷带有助于改善混合动脉-静脉溃疡患者的静脉泵送功能,而不阻碍动脉血流^[20]。Cochrane 系统评价数据库^[21]指出加压可增加溃疡愈合率;多层系统比单层系统更有效;高压比低压更有效,但是不同类型的高压力 IPC 之间其效果没有明显的差异。

加拿大安大略省注册护士协会 (Registered Nurses' Association of Ontario, RNAO) 指南建议,挤压疗法在治疗下肢静脉溃疡时,强压迫是治疗的首选,但用于存在糖尿病、关节炎、感染和轻度动脉疾病的患者或老年人时,压力大小应予以改变,要充分考虑患者的身体状况(心脏和肾脏功能)和对疼痛的耐受性,且只有在没有非控制性充血性心力衰竭等动脉疾病时才适用^[22]。目前还没有证据表明挤压治疗可以防止静脉溃疡的复发。

2.2 挤压疗法在深静脉血栓形成中的应用及研究进展

由于手术、创伤、恶性肿瘤、住院、年龄增长、下肢瘫痪等各种危险因素,深静脉血栓形成的发病率和死亡率依然居高不下,常发生于下肢静脉,容易引发下肢深静脉血栓形成后综合征,更严重者会引起肺栓塞。有研究表明,GCS 可有效预防手术或固定后深静脉血栓形成,使一般患者术后深静脉血栓形成的相对风险降低 64%,髋关节置换术患者相对风险降低 57%^[23-24]。根据欧洲标准化委员会提出的压力分级,患者在卧位和行走时可分别使用 I 级和 II 级 GCS 预防深静脉血栓形成^[25]。此外,挤压疗法还被用于降低产前和产后静脉血栓形成的风险,促进股浅静脉血流量增加。例如,英国《血栓预防相关的临床指南》建议对高危女性(孕产妇)使用血压预防措施(如 GCS),有助于减少深静脉系统中的淤滞,改善静脉功能^[26]。

1972 年,IPC 首次被报道可有效降低非癌症患者术后亚临床深静脉血栓形成的患病率,随后多项研究证实 IPC 治疗能够阻止深静脉血栓形成及其

在手术固定过程中的发展,有效降低住院患者静脉栓塞并发症的发生率^[27]。在妇科手术患者中,常规使用IPC(维持5 d或直到自由活动)可以降低深静脉血栓的形成风险,但短期的IPC使用(离开恢复室或在术后24 h)不能产生有效的预防效果,这表明IPC的持续时间会影响IPC预防的疗效^[28]。除此之外,有关使用IPC预防由不同疾病引发的深静脉血栓形成的研究结果之间存在较大差异。尽管目前仍缺乏足够的证据来明确IPC是否可以有效预防全髋关节置换术后静脉血栓,但英国的研究人员通过实验证实^[29],将IPC应用于不能移动的中风患者是安全的,可以降低近端深静脉血栓形成、症状性深静脉血栓形成(近端或小腿)的发生风险。在接受骨科或神经外科手术的患者中,仅用IPC预防的效果与药物血栓预防相当。

综上所述,尽管大部分研究表明IPC和GCS具有抗血栓作用,有助于预防深静脉血栓形成或术后静脉血栓,但是其预防效果受到使用时间、频次、个体差异等多种因素的影响难以估计,少有研究考虑到临床相关结局以及禁忌情况,故需要进一步研究和实验证明挤压疗法对深静脉血栓形成发生率的影响。

2.3 挤压疗法在下肢外周动脉疾病中的应用及研究进展

Delis等^[30]的多项研究表明,IPC对小腿动脉流入有一定影响,可显著提高动脉血流量和血流速度,有利于侧支循环的发展,改善间歇性跛行,可用于对药物治疗反应不佳或不适合手术的远端外周血管疾病患者。对比应用于足部(IPC_{foot})、小腿(IPC_{calf})和同时应用于两者($IPC_{\text{foot+calf}}$)的3种间歇性气动压缩的使用效果,发现 $IPC_{\text{foot+calf}}$ 能够更好地增加小腿血流流入,改善跛行者的步行能力和外周血流。

由于IPC治疗成本低、易于使用,它有望部分替代外周动脉疾病的其他治疗方法,但需要大量有效的前瞻性随机对照实验进行验证。同时,IPC应用具有一定的限制。深静脉血栓(deep venous thrombosis, DVT)和腿部感染是禁忌症,且IPC不应直接应用于搭桥术后的吻合口和手术伤口,对组织愈合产生不良影响。此外,尽管IPC有助于提高跛行距离,但是IPC不具有锻炼的系统性好处,例如

改善氧气消耗和代谢调节、减轻体质量等,故不能替代运动锻炼。因此,未来需要对IPC和运动联合使用的治疗效果进行研究和评估。

2.4 挤压疗法在糖尿病足中的应用及研究进展

糖尿病足溃疡是糖尿病的主要并发症之一,IPC已经被用于辅助治疗糖尿病足溃疡,具有无创、价格低廉、简单易操作等特点,是一项临床可行的治疗手段。目前,仅有几项随机试验对IPC治疗糖尿病足溃疡的治疗效果进行研究,结果显示接受IPC治疗的患者水肿症状显著缓解,伤口愈合速度加快^[31]。

EECP具有改善冠心病患者外周动脉功能和一氧化氮的生物利用度、降低促炎症标志物的循环浓度的优点,可用于改善空腹血糖、胰岛素浓度和葡萄糖耐量,降低葡萄糖耐量异常患者未来心血管疾病的发生风险^[32]。Martin等^[33]评估了葡萄糖耐量异常患者接受EECP治疗后阻力动脉功能的变化,结果显示前臂的阻力动脉功能显著改善,但小腿的阻力动脉功能改善并不明显,在冠心病患者中观察到微血管功能有类似的改善。这在生物学和临床上都具有重要意义,为EECP介导的血糖控制改善的作用机制提供了额外证据。

负压伤口治疗(negative pressure wound therapy, NPWT)也是一种治疗糖尿病足溃疡的挤压治疗设备,能够通过去除过多的细胞外液和组织水肿、变形引起伤口收缩、维持伤口环境稳定等促进血流量增加和伤口愈合、诱导细胞增殖和血管生成,对慢性腿部溃疡和创伤后溃疡有效^[35]。研究显示,使用NPWT治疗糖尿病足溃疡可以使伤口愈合改善20%^[36]。与传统绷带治疗方法相比,NPWT能更加有效地减少伤口的深度和体积,加速大尺寸伤口的闭合,有助于避免组织的自由转移,其疗效和安全性均优于标准伤口护理,有助于更简单地解决复杂的伤口问题。

然而,在恶性肿瘤或骨髓炎未经治疗的情况下,临床上通常禁止将NPWT装置直接应用在暴露的器官或血管上;在活动性出血或正在服用抗凝剂的患者中,NPWT的使用效果未知。因此,在进行NPWT之前仍然需要进行充分的随机对照试验,并充分考虑各种不良情况。

3 挤压疗法作用机制的研究进展

EECP 治疗不同器官缺血性疾病的机理不尽相同,且涉及从宏观的系统和器官到微观的血管内皮细胞等多个层面。在循环系统和缺血器官层面,目前的作用机制研究还停留在定性分析和局部的临床观测方面,如认为 EECP 可以同时驱返反搏部位的动脉血和静脉血,达到动脉血重新分配和回心血量增加的作用,从而起到类似运动的效果^[4,6];以及采用心脏彩超等工具监测心脏血灌注量变化、采用经颅多普勒彩超监测大脑中动脉血流变化量等^[8-10,13]。然而目前针对人体反搏部位在周期性挤压过程中的生物力学响应、反搏对循环系统整体运行状态的影响,以及循环系统整体运行状态变化(血流速度、血压等)对斑块和血栓的影响,是目前尚未得到充分研究的基础科学问题。在微观的细胞生物学层面,已有动物实验和临床实验证实反搏促进血管内皮生长因子、血管活性因子(α -肌动蛋白、血管性血友病因子)和血管扩张剂(NO)的释放,从而改善内皮细胞功能,促进血管生成和侧支循环形成等功能,但具体的力学生物学机理还需更深入的研究。

IPC 和 GCS 也存在类似的问题,即已开展了大量的临床应用研究;积累了丰富的临床监测数据,但其治疗相关疾病的生物力学机理尚未得到定量的阐释。典型的问题包括:挤压过程中受压部位的血液是如何转移的?不同水平压力挤压时有多少血液会转移出来?转移出来的血液血氧含量有没有变化?不同水平的压力挤压时哪些血管会发生塌陷?对可能存在的斑块和血栓具体产生什么样的影响?此类问题都尚未得到深入的研究,使得目前临床使用的装置和疗法的安全性和精确性欠缺,限制了这些装置的进一步推广应用。

4 挤压疗法中生物力学问题的有限元研究

针对挤压疗法开展生物力学研究是提高安全性和优化设计方案的必要途径,然而开展这类研究也存在一定困难,主要包括:①受压部位解剖结构复杂,涉及皮肤、肌肉、脂肪、骨和血管等多种组织,这些组织具有复杂的非线性生物力学特性,尤其是动静脉血管在挤压过程中的生物力学问题是多尺

度的非线性多场耦合问题;②实验验证难以开展,实时的在体观测不仅需要高时空分辨率的医疗成像设备,还需要具备熟练专业技能的实验人员。这些方面的困难,是目前相关研究缺乏的主要原因。

目前,针对挤压疗法的生物力学研究主要以低水平压力对静脉的影响为主,通常采用简化的二维有限元模型进行分析,以磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)实验进行验证。Dai 等^[37]在 ABAQUS 软件中建立了小腿截面的二维有限元模型,计算施加周向对称和周向不对称的外部分布压力时腿部横截面积和血流量的变化,并分析外部压缩模式对静脉血管壁应变和壁面剪切应力的影响。Narracott 等^[38]使用 MRI 图像生成小腿横截面的个性化有限元模型,将仿真得到的袖带压迫小腿变形与磁共振图像进行对比验证,发现小腿内软组织材料特性的准确度是影响仿真结果的主要因素之一。Avril 等^[39]也建立了基于 MRI 图像的个性化小腿有限元模型,但未深入研究深静脉的塌陷问题。Wang 等^[40]同样基于医学图像开发了小腿的个性化二维有限元模型,并重点评估模型预测深静脉受压塌陷的能力,但该模型存在 MRI 图像分辨率不足、难以在横截面处准确识别小腿外轮廓的问题,导致位移边界条件出现失调误差。

由此可见,针对挤压疗法开展深入的生物力学机制研究,首先要解决受压部位高精度生物力学模型和在体实验验证方面的难题,这将是下一步研究工作的重点。

5 总结与展望

挤压疗法是心脑血管病和外周血管病领域中少有的无创物理疗法,具有重要的临床应用价值和显著的康复推广潜力。但因其具体的生物力学机制尚未得到深入研究,导致这一类疗法在安全性和精准性方面还存在一些明显的不足。本文针对目前临床中广泛使用的挤压类疗法及其应用研究现状进行简要介绍,总结了当前已开展的生物力学机制研究,指出阻碍生物力学机制研究推进的主要难点,在此基础上提出一些值得关注的生物力学问题,希望能为心脑血管病和外周血管病康复领域的研究人员提供参考。

参考文献:

- [1] 王茂斌. 康复医学[M]. 北京:人民卫生出版社, 2009: 478-480.
- [2] 马丽媛, 吴亚哲, 王文, 等. 《中国心血管病报告 2017》要点解读[J]. 中国心血管杂志, 2018, 23(1): 3-6.
- [3] GIBBONS RJ, ABRAMS J, CHATTERJEE K, *et al.* ACC/AHA 2002 guideline update for the management of patients with chronic stable angina. Summary article: A report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on practice guidelines (Committee on the Management of Patients With Chronic Stable Angina) [J]. *Circulation*, 2003, 107(1): 149-158.
- [4] ZHENG ZS, LI T, KAMBIC H, *et al.* Sequential external counterpulsation (SECP) in China [J]. *TransAmSoc Artif Intern Organs*, 1983, 29: 599-603.
- [5] LAWSON WE, HUI JC, COHN PF. Long-term prognosis of patients with angina treated with enhanced external counterpulsation: five-year follow-up study [J]. *Clin Cardiol*, 2000, 23(4): 254-258.
- [6] 伍贵富, 杜志民. 增强型体外反搏: 理论与实践[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2012: 10-11.
- [7] ARORA RR, CHOU TM, JAIN D, *et al.* The multicenter study of enhanced external counterpulsation (MUST-EECP): effect of EECP on exercise-induced myocardial ischemia and anginal episodes [J]. *J Am Coll Cardiol*, 1999, 33(7): 1833-1840.
- [8] VAHID GA, FARZAD M, KAVEH H, *et al.* Effects of enhanced external counter-pulsation therapy on qt dispersion in patients with heart failure [J]. *J Heart Cardiol*, 2017, 3(2): 1-4.
- [9] LIN W, XIONG L, HAN J, *et al.* External counterpulsation augments blood pressure and cerebral flow velocities in ischemic stroke patients with cerebral intracranial large artery occlusive disease [J]. *Stroke*, 2012, 43(11): 3007-3011.
- [10] TIAN G, XIONG L, LIN W, *et al.* External Counterpulsation reduces beat-to-beat blood pressure variability when augmenting blood pressure and cerebral blood flow in ischemic stroke [J]. *J Clin Neurol*, 2016, 12(3): 308-315.
- [11] XIONG L, LIN W, HAN J, *et al.* Enhancing cerebral perfusion with external counterpulsation after ischaemic stroke: How long does it last? [J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2016, 87: 531-536.
- [12] 王怀阳, 郑振声. 体外反搏对脑动脉血流量影响的建模和仿真研究[J]. 医用生物力学, 2007, 22(1): 55-58.
WANG HY, ZHENG ZS. Modeling and simulation of effect on cerebral arterial blood flow with external counterpulsation [J]. *J Med Biomech*, 2007, 22(1): 55-58.
- [13] 王怀阳, 郑振声, 周少春, 等. 体外反搏对急性缺血犬动脉剪切应力影响的实验研究[J]. 医用生物力学, 2000, 15(4): 204-207.
WANG HY, ZHENG ZS, ZHOU SC, *et al.* An experiment study of therapeutic mechanism on myocardial ischemia with external counterpulsation in dogs [J]. *J Med Biomech*, 2000, 15(4): 204-207.
- [14] LAYDEN J, MICHAELS J, BIRMINGHAM S, *et al.* Diagnosis and management of lower limb peripheral arterial disease: Summary of NICE guidance [J]. *Brit Med J*, 2012, 345(6): 42-45.
- [15] 中华医学会外科分会血管外科学组. 慢性下肢静脉疾病诊断与治疗中国专家共识[J]. 中华普通外科杂志, 2014, 29(4): 246-252.
- [16] NICOLAIDES AN, ALLEGRA C, BERGAN J, *et al.* Management of chronic venous disorders of the lower limbs: Guidelines according to scientific evidence [J]. *Int Angiol*, 2008, 27(1): 1-59.
- [17] MONETA GL, NICOLOFF AD, PORTER JM. Compression treatment of chronic venous ulceration: A review [J]. *Phlebology*, 2000, 15(3): 162-168.
- [18] LIU R, LAO TT, KOWK YL, *et al.* Effects of graduated compression stockings with different pressure profiles on lower-limb venous structures and haemodynamics [J]. *Adv Ther*, 2008, 25(5): 465-478.
- [19] NIKOLOVSKA S, PAVLOVA L, PETROVA N, *et al.* The efficacy of intermittent pneumatic compression in the treatment of venous leg ulcers [J]. *Mac Med Rev*, 2002, 16(5): 56-59.
- [20] MOSTI G, PARTSCH H. High compression pressure over the calf is more effective than graduated compression in enhancing venous pump function [J]. *Eur J Vasc Endovasc Surg*, 2012, 44(3): 332-336.
- [21] O' MEARA S, CULLUM N, NELSON EA, *et al.* Compression for venous leg ulcers [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2009, 11(1): CD000265.
- [22] Registered Nurses' Association of Ontario (RNAO). Nursing best practice guideline: Assessment and management of venous leg ulcers [R]. Toronto: RNAO, 2004.
- [23] COOKE EA, BENK T, O'CONNELL BM, *et al.* The effect of graduated compression stockings on lower limb venous haemodynamics [J]. *Phlebology*, 1996, 11(4): 141-145.
- [24] AGU O, HAMILTON G, BAKER D. Graduated compression stockings in the prevention of venous thromboembolism [J]. *Br J Surg*, 1999, 86(8): 992-1004.
- [25] REGINALD SA, DEBRA H. Graduated compression stockings (20-30 mmHg) do not compress leg veins in the standing position [J]. *Anz J Surg*, 2004, 74(7): 581-585.
- [26] JAMIESON R, CALDERWOOD CJ, GREER IA. The effect

- of graduated compression stockings on blood velocity in the deep venous system of the lower limb in the postnatal period [J]. *BJOG*, 2007, 114 (10): 1292-1294.
- [27] DOMEIJ-ARVERUD E, LABRUTO F, LATIFI A, *et al.* Intermittent pneumatic compression reduces the risk of deep vein thrombosis during post-operative lower limb immobilization: A prospective randomised trial of acute Achilles tendon ruptures [J]. *Bone Joint J*, 2015, 97-B (5): 675.
- [28] FENG JP, XIONG YT, FAN ZQ, *et al.* Efficacy of intermittent pneumatic compression for venous thromboembolism prophylaxis in patients undergoing gynecologic surgery: A systematic review and meta-analysis [J]. *Oncotarget*, 2016, 8 (12): 20371-20379.
- [29] MARTIN D, PETER S, GORDON M, *et al.* Does intermittent pneumatic compression reduce the risk of post stroke deep vein thrombosis? The CLOTS 3 trial: Statistical analysis plan [J]. *Trials*, 2013, 14 (1): 1-6.
- [30] DELIS KT, SLIMANI G, HAFEZ HM, *et al.* Enhancing venous outflow in the lower limb with intermittent pneumatic compression. A comparative hemodynamic analysis on the effect of foot vs. calf vs. foot and calf compression [J]. *Eur J Endovasc Surg*, 2000, 19(3): 250-260.
- [31] BUCKLEY E, DOCTER S, MORONA J, *et al.* Prevention, identification and management of foot complications in diabetes: Technical report [R]. Adelaide: Adelaide Health Technology Assessment (AHTA), 2011.
- [32] BRAITH RW, CONTI CR, NICHOLS WW, *et al.* Enhanced external counterpulsation improves peripheral arteryflow-mediated dilation in patients with chronic angina: A randomized sham-controlled study [J]. *Circulation*, 2010, 122(16): 1612-1620.
- [33] MARTIN JS, BECK DT, BRAITH RW. Peripheral resistance artery blood flow in subjects with abnormal glucose tolerance is improved following enhanced external counterpulsation therapy [J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2014, 39 (5): 596-599.
- [34] ULUSAL AE, SAHIN MS, ULUSAL B, *et al.* Negative pressure wound therapy in patients with diabetic foot [J]. *Acta Orthop Traumatol Turc*, 2011, 45(4): 254-260.
- [35] NOBLE-BELL G, FORBES A. A systematic review of the effectiveness of negative pressure wound therapy in the management of diabetes foot ulcers [J]. *Int Wound J*, 2008, 5(2): 233-242.
- [36] THIRIET M, NAILI S, LANGLET A, *et al.* Flow in thin-walled collapsible tubes [M]. USA: Gordon & Breach, 1997.
- [37] DAI G, GERTLER JP, KAMM RD. The effects of external compression on venous blood flow and tissue deformation in the lower leg [J]. *J Biomech Eng*, 1999, 121 (6): 557-564.
- [38] NARRACOTT AJ, JOHN GW, MORRIS RJ, *et al.* A validated model of calf compression and deep vessel collapse during external cuff inflation [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2009, 56(2): 273-280.
- [39] AVRIL S, BOUTEN L, DUBUIS L, *et al.* Mixed experimental and numerical approach for characterizing the biomechanical response of the human leg under elastic compression [J]. *J Biomech Eng*, 2010, 132(3): 657-672.
- [40] WANG Y, DOWNIE S, WOOD N. Finite element analysis of the deformation of deep veins in the lower limb under external compression [J]. *Med Eng Phys*, 2013, 35 (4): 515-523.