

# 血流限制训练在膝关节功能康复中的应用现状

苏明莉<sup>1</sup> 刘西纺<sup>2,5</sup> 张葆欣<sup>3</sup> 杨佳丽<sup>4</sup> 朱平<sup>1</sup> 谢尊艳<sup>1</sup>

股四头肌肌力下降是膝关节损伤所致膝关节功能障碍患者最常见的临床问题,并成为影响其功能恢复的关键因素。因此,股四头肌肌力训练是促进其功能恢复的重要途径。美国运动医学会(ACSM)建议,在进行以增强肌力为目的的抗阻训练时,阻力负荷至少应达到单次重复最大负荷(1-repetition maximum, 1RM)的60%—70%以上,而要增加肌肉体积的阻力负荷应达到70%—85% 1RM<sup>[1]</sup>。但这一高负荷对患有膝骨性关节炎及膝关节术后早期的患者难以实现。而血流限制训练(blood flow restriction training, BFRT)作为肌力康复的一种新方法,结合低负荷阻力训练(30%1RM)便可达到高负荷阻力训练相似的效果<sup>[2]</sup>,成为近年来研究的热点,并且有报道BFRT对膝关节术后及老年膝骨性关节炎患者有效<sup>[3-4]</sup>。然而,由于目前所报道的研究较少,方案不一致,结果参差不齐。因此,本文就BFRT的作用原理及其在膝关节功能障碍相关疾病的临床应用现状进行综述,进一步探讨BFRT在膝关节功能障碍康复中的训练参数、临床效果及不良反应。

## 1 BFRT的起源

血流限制训练(BFRT)又称加压训练(Kaatsu训练)或缺血性训练,即使用加压袖带在肢体近端进行充气加压至一定压力值,同时结合低负荷抗阻训练,以达到增强肌肉功能的一种训练方式。20世纪70年代,日本Yoshiaki Soto博士发现长时间跪坐后导致的下肢肿胀和不适感与提踵训练后的感觉相似,以此为灵感发明了肢体近端进行加压限制部分静脉血流达到训练目的的方法并称之为血流限制训练,并于20世纪80年代发明出最早的BFRT装置,开始在人群中推广使用。随后,Shinohara等<sup>[5]</sup>于1998年首次报道了通过BFRT可提升肌肉力量的现象。对于血管阻塞的模式,一开始使用简单的绳索和束带。至1984年发明了第一代电子止血带系统,直到2000年代初开发了第三代止血带系统之后,血流限制训练才得以精确而安全地进行。近年来,血流限制训练已成为健康人、老年患者、关节术后等人群提高肌肉质量和力

量的传统疗法的辅助手段<sup>[3-4,6]</sup>。

## 2 BFRT的主要参数

压力值和阻力负荷的确定是BFRT方案的重点。训练方式、训练量、持续时间、间歇时间和训练频率也是影响功能恢复的主要因素。此外,专家意见建议BFRT方案的设计与其训练目标有关<sup>[7]</sup>。以下为BFRT使用的关键参数及训练方案的制定方法。

### 2.1 压力设置

BFRT的压力设置要求保持正常动脉流入的同时,限制局部肢体部分静脉回流<sup>[8]</sup>。有相关研究使用单一的绝对压力值范围对应上肢为50—260mmHg(袖带宽3cm)<sup>[9-10]</sup>,下肢为160—260mmHg(袖带宽4cm)<sup>[11]</sup>。然而,由于血流限制程度受袖带类型、袖带宽度、肢体围度、性别、年龄等多方面因素影响,因此,使用绝对压力值进行BFRT并不适宜。因此,有学者通过研究力求不同袖带类型对血流限制程度的标准方法。其中,使用充气袖带的研究为避免个体间血流限制压力的差异,使用静息动脉闭塞压(arterial occlusion pressure, AOP)(又叫肢体闭塞压, limb occlusion pressure, LOP)的百分比以衡量血流限制程度<sup>[12]</sup>。即通过袖带对大腿近端进行加压,同时采用彩色多普勒超声测量足背动脉血流,当足背动脉被阻断时的压力值即为该测量对象的肢体动脉压。有研究显示采用40%—80%的静息肢体闭塞压进行BFRT安全且有效<sup>[13]</sup>。而使用弹性袖带的研究由于无法量化外部压力, Wilson等<sup>[14]</sup>提出采用感知压力这一主观量化方法进行量化。该研究认为,针对弹性袖带进行BFRT的压力标准可采用无疼痛和不适感下的7级主观压力(共10级)。并有后续的研究证明了此方法对提高肌肉质量和力量的有效性<sup>[15-16]</sup>。此外,对于下肢训练所使用的袖带宽度,有学者建议采用5—10.5cm宽度袖带进行训练<sup>[17-18]</sup>。

### 2.2 阻力负荷

阻力负荷是影响训练效果的另一重要因素。单次重复最大负荷(1RM)是BFRT相关研究最常用的负荷指标。针

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2021.03.025

1 西安体育学院研究生院,陕西省西安市,710000; 2 西安交通大学附属红会医院中医骨科神经脊柱病区; 3 西安体育学院运动与健康科学学院; 4 甘肃省康复中心医院神经康复科; 5 通讯作者

第一作者简介:苏明莉,女,硕士研究生; 收稿日期:2020-01-04

对BFRT的荟萃分析显示,血流限制结合20%—40%1RM的低强度抗阻训练可有效增加肌肉体积和力量,达到高强度抗阻训练相似的效果<sup>[2]</sup>。而更高的阻力负荷并未产生更加显著的增益效果,并且会增加训练肢体动脉受阻的风险。有研究发现,50%1RM和30%1RM的BFRT在急性反应和肌肉肥大方面的差异没有显著性意义<sup>[19]</sup>。另外两项研究分别采用80%1RM<sup>[20]</sup>和70%1RM<sup>[21]</sup>阻力负荷进行BFRT,其结果显示,对肌肉体积和力量无显著性意义。针对膝关节相关疾病的BFRT,有专家建议采用≤30%1RM阻力负荷进行训练<sup>[7]</sup>。

压力值是BFRT的核心参数,而BFRT中低阻力负荷的有效性是其相较于传统肌力训练的优势所在。考虑到个体差异原因,绝对压力值范围和主观感知压力等级对于临床患者缺乏客观性和安全性。因此,采用肢体闭塞压的百分比,同时结合低负荷阻力进行肌力训练,对膝关节功能障碍康复更加安全有效。

### 2.3 不同训练目标的训练方案

针对不同训练目标,应采取不同训练方案。大量研究表明血流限制结合低强度抗阻训练可减轻肌肉萎缩,提升肌力<sup>[22]</sup>。此外,已有证据显示血流限制结合低强度耐力训练不仅可以改善肌肉耐力、增加心肺功能,同时在增加肌肉体积

和力量方面也有一定作用<sup>[23-25]</sup>。因此,要减轻肌肉萎缩、增加肌力还是改善耐力功能,其所对应的BFRT方案的阻塞压力、阻力负荷、每次训练的组数和重复次数、持续时间及训练频率均有差异。在关节术后早期,通常需要一定时间进行组织愈合或需要对移植物进行保护,如前叉韧带重建术后,这种情况下的BFRT主要以预防或减轻肌肉萎缩为目标,而增加肌肉体积和强度通常处于术后愈合的重塑阶段。Takarada等<sup>[26]</sup>将BFRT应用于前叉韧带重建术后早期康复中发现,BFRT可有效减轻术后早期股四头肌萎缩程度。也有研究以血流限制结合30%1RM负荷对膝骨性关节炎患者进行干预,结果显示,股四头肌肌力和横截面积、膝关节功能均明显改善。同时,低负荷血流限制训练还能够改善疼痛,减轻关节压力,患者接受度更高<sup>[27]</sup>。此外,血流限制结合低强度耐力训练还能有效增加其心肺功能。Abe等<sup>[24]</sup>报告称,对年轻的受试者(平均23岁)进行24次血流限制耐力训练(以VO<sub>2</sub>max的40%进行15min骑行)可使肌肉力量和肌肉肥大分别增加7.7%和5.1%,VO<sub>2</sub>max增加6.4%,这表明BFRT能引起代谢加快,以增强运动诱导的适应能力。

针对BFRT方案,有专家通过荟萃分析相关BFRT的大量研究,根据不同目标建议采用不同的BFRT方案<sup>[7,28]</sup>(表1)。

表1 不同目标下的血流限制训练(BFRT)方案

| 目标     | 压力值         | 阻力负荷                     | 训练方式           | 间歇时间   | 组数/每组次数                               | 频率     | 持续时间  | 充气状态           |
|--------|-------------|--------------------------|----------------|--------|---------------------------------------|--------|-------|----------------|
| 改善肌肉萎缩 | 个体化, 80%LOP | 无阻力或抵抗自身重力               | 等长收缩或抗自身重力等张收缩 | 30—60s | 4组(30/15/15/15)                       | 3—6次/周 | 6—12周 | 持续充气,但不超过30min |
| 增强肌肉力量 | 个体化, 80%LOP | 20%—40% 1 RM             | 抗阻力;等张收缩       | 30—60s | 4组(30/15/15/15)                       | 3—6次/周 | 6—12周 | 持续充气,但不超过30min |
| 增强心肺耐力 | 个体化, 80%LOP | 约40% VO <sub>2</sub> max | 步行或骑车          | —      | 骑车15—30min;步行(4—6 km/h, 2—3min, 2—5组) | 5—6次/周 | 6周以上  | 持续充气,但不超过30min |

注:BFRT:血流限制训练;LOP:肢体闭塞压;1RM:单次重复最大负荷;VO<sub>2</sub>max:最大摄氧量。

### 3 BFRT作用机制

几项随机对照试验和系统评价显示,低强度BFRT与高强度抗阻训练产生相似的肌肉肥大反应,这种类似的肌肉肥大反应可能是由于两种训练方法激活了相似的生理分子机制所致<sup>[23,29]</sup>。在高强度运动训练中,骨骼肌内的供氧量和需氧量不匹配。骨骼肌细胞需氧量的增加是通过增加肌肉的血流量来满足的,尽管骨骼肌血流量增加,但骨骼肌代谢产物(如乳酸)仍在短时间内产生并积累<sup>[30]</sup>。BFRT通过在肢体近端放置加压袖带或弹性带人为地减少流向活动骨骼肌的血流量来模拟高强度运动中缺血缺氧的肌肉环境。当血流受限与低负荷运动相结合时,会导致高水平的代谢应激和机械张力<sup>[23]</sup>。代谢应激水平的增加目前被认为是BFRT的主要机制。研究表明,间歇性BFRT期间肌内代谢物和pH值的变化介于单独的低强度训练和高强度训练之间。持续性BFRT期间肌内代谢产物、pH值的变化表现出与高强度抗阻训练

相同的肌肉代谢水平<sup>[31]</sup>。而代谢产物(如乳酸)的产生和随后骨骼肌肌酸的酸化会刺激生长激素分泌增多,进而刺激胰岛素样生长因子1(IGF-1)的释放来促进骨骼肌肥大和潜在的增生<sup>[32]</sup>。同时,运动引起的肌肉氧张力降低可加速快速糖酵解肌纤维的募集。快速糖酵解纤维是两种主要纤维亚型中较大的一种,占肌肉质量的大部分,在某些肌肉中,代表所有纤维类型中最大的一部分。这些纤维还具有丰富的可收缩细丝,可产生较强的收缩力,对肌力的增加产生直接的影响<sup>[33]</sup>。此外,有学者提出,BFRT引起的急性细胞肿胀可能是引起肌肉肥大的另一潜在机制。由于BFRT中代谢产物的累积和机械应力的增加所产生的压力差,引起急性细胞肿胀,进而促进蛋白质合成并抑制蛋白质的水解<sup>[34]</sup>。但目前对这方面的机制研究较少,需要更多的研究来验证细胞肿胀对BFRT增肌作用的益处。另外,关于BFRT相关分子机制的报道显示,骨骼肌所受机械应力的变化还可诱导肌肉蛋白合

成通路的激活,进一步促进肌肉肥大<sup>[35-36]</sup>。Fujita等<sup>[37]</sup>测量了6例年轻男性受试者在20%1RM阻力负荷、200mmHg袖带压力下进行BFRT后肌肉合成蛋白的mTOR相关信号通路和核糖体S6激酶1(S6K1)磷酸化状态发现,mTOR信号通路的激活似乎是一种重要的细胞机制,可能有助于解释BFRT期间肌肉蛋白合成的增加。此后,Fry等<sup>[35]</sup>的研究进一步证实了mTOR1信号通路的激活不仅可以促进肌蛋白合成,同时可抑制蛋白酶体和肌肉生长抑制素的分泌,进而预防肌肉萎缩,促进肌肉肥大。

综上有限的证据表明,对于BFRT的机制尽管已有多种解释,但仍未统一。目前主要认为与低氧环境下代谢应激水平和机械应力增加有关。代谢水平的增加导致激素浓度升高、急性细胞肿胀、快肌纤维的募集增多。而机械应力的增加则有助于引起细胞肿胀以及肌蛋白合成通路的激活,两者最终都通过对蛋白质的合成和抑制的调节进而影响肌肉质量(图1)。

#### 4 在膝关节功能康复中的临床应用

患有膝关节功能障碍的患者常常无法承受高负荷训练(70%—85%1RM),导致本就存在的下肢肌肉萎缩、肌力下降的问题持续性加重,进一步影响了患者的功能恢复。已被证明的血流限制结合低负荷训练(20%—40%1RM)对肌肉功能的有效性使得BFRT在膝关节功能康复中发挥了特有的优势,不仅增强了肌肉功能,加速了患者的功能恢复,降低了不良预后和再次损伤的几率,而且避免了高负荷训练带来的潜在风险。到目前为止,BFRT主要应用于慢性膝骨性关节炎、髌股关节痛、关节镜常规检查、膝关节韧带重建、半月板修复以及膝关节置换等膝关节术后的临床康复中。

##### 4.1 BFRT与膝骨性关节炎

膝骨性关节炎(knee osteoarthritis, KOA)是骨性关节

炎中最常见的类型,被认为是老年人肌肉骨骼疼痛、功能独立性降低的主要原因<sup>[38]</sup>。股四头肌无力被认为是膝骨性关节炎的重要生物力学因素<sup>[39]</sup>。多项研究表明,增加股四头肌强度不但可减轻膝骨性关节炎患者的疼痛,也能防止膝骨性关节炎的发生<sup>[40-41]</sup>。而想要增加股四头肌强度原则上必须通过增加阻力负荷达到肌肉超负荷,但这同时会导致关节超负荷,从而会加重患者疼痛。因此,寻求患者更易接受的科学有效的肌力训练方法非常必要。Segal等<sup>[4]</sup>在42例有膝骨性关节炎风险男性中进行了为期3周的低负荷(30%1RM)BFRT的随机对照研究,其结果显示,血流限制组和对照组下肢肌力均得到改善,但组间无差异,而血流限制组较对照组膝关节疼痛有明显改善。而与上述结果相反的是,同一作者<sup>[42]</sup>在执行了相同研究方案的女性膝骨性关节炎风险患者中提示,与没有血流限制的相同计划相比,30%1RM的BFRT可有效增加膝骨性关节炎风险女性患者的股四头肌肌力,但疼痛改善不明显,这可能与不同性别对疼痛耐受程度的差异有关。而另外一项随机对照研究发现,采用30%1RM阻力负荷、200mmHg的BFRT虽然在改善女性膝骨性关节炎患者股四头肌肌力、膝关节疼痛和膝关节功能评分方面具有相似的益处,但是,血流限制结合低负荷训练的使用可以明显减少训练期间的膝前痛<sup>[43]</sup>。

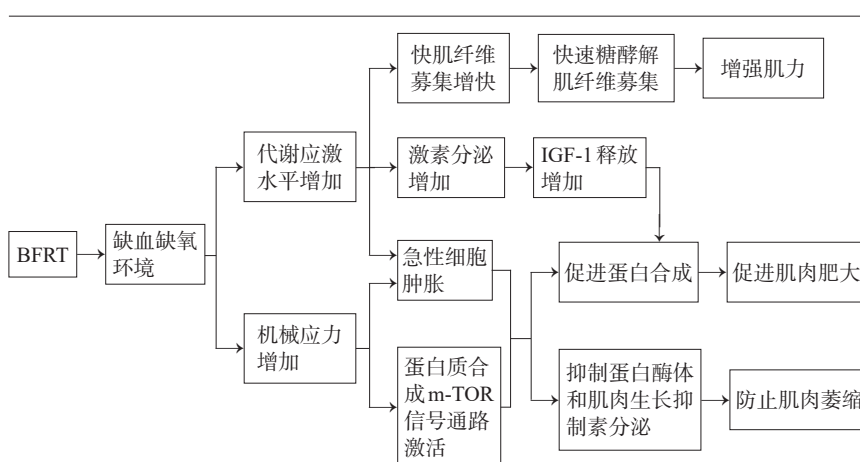
此外,关于血流限制结合低负荷训练的负荷强度,也有学者采用了不同于上述研究(30%1RM)的负荷程度。Harper等<sup>[44]</sup>选择血流限制结合20%1RM抗阻训练与中强度(60%1RM)抗阻训练进行比较,其预试验的结果显示,尽管中强度组比血流限制组观察到更多的自发性膝关节疼痛(14:3),但其他膝伸肌力量、步行速度、短暂体能表现(SPPB)等结果都倾向于中强度抗阻训练组,并有一例可能与血流限制有关的不良反应报道。虽然这项预试验的结果似乎显示了中等强度抗阻训练的优越性,但更有说服力的结果还需全面的试验来进一步明确。此外,Cerqueira等<sup>[45]</sup>将进行更低负荷(10%1RM)的BFRT研究,但因其结果尚未发表,血流限制与更低强度的结合对KOA患者的影响需进一步探讨。

此外,Cerqueira等<sup>[45]</sup>将进行更低负荷(10%1RM)的BFRT研究,但因其结果尚未发表,血流限制与更低强度的结合对KOA患者的影响需进一步探讨。

##### 4.2 BFRT与髌股关节痛

髌股关节痛(patellofemoral pain, PFP)是一种发生在膝关节前部,并在活动后加重的一种弥散性疼痛,是青少年、成人及老年人膝关节疼痛的常见原因,常伴有股四头肌无力和肌肉萎缩<sup>[46]</sup>。已有证据显示,加强股四头肌练习可增加患者髌股关节接触面积,减少膝前疼痛,进而改善膝关节功能<sup>[47]</sup>。然而需要注意的是,强度过大的股四头肌

图1 血流限制训练(BFRT)作用机制



训练往往会增加髌股关节所受负荷,进而加重其疼痛症状。因此,对增加股四头肌肌力和肥大有效的高负荷训练并不适用。Giles等<sup>[48]</sup>将79例18—40岁的患有髌股关节痛的患者随机分为标准强化组(70%1RM)和低负荷血流限制组(30%1RM),两组进行相同的膝关节伸展训练动作,3次/周,持续8周后发现,虽然标准组在膝伸肌肌力的改善方面优于血流限制组,但是血流限制组在日常生活中的疼痛减轻幅度比标准组大93%( $P=0.02$ )。说明BFRT对于髌股关节痛的患者在改善疼痛方面具有独特的优势,但目前对于这方面的研究较少。2018年关于运动疗法和物理干预治疗髌股关节疼痛的共识声明<sup>[49]</sup>中,专家组认为BFRT虽然是运动疗法治疗髌股关节痛的一种新方法,但仍需要进一步的高质量随机对照研究来证明。

#### 4.3 BFRT与膝关节镜检查及清创术

一项调查显示,美国膝关节镜检查的手术量一年超过950000次并且还在不断递增<sup>[50]</sup>。关节镜检查主要目的为明确诊断、对症治疗并使患者最终恢复运动能力,提高功能水平或改善整体生活质量。尽管外科手术通常能够消除局限性的关节内病灶,但股四头肌的充分康复对于恢复全部功能和活动至关重要。Tennent等<sup>[51]</sup>进行了膝关节镜检查术后BFRT的随机对照试验,血流限制组在执行非血流限制组治疗方案的基础上进行3次/周的30%1RM阻力负荷、80%肢体闭塞压的BFRT。6周后结果显示,血流限制组髌骨上6cm和16cm处大腿围度明显增加,膝关节伸展和屈曲强度相较治疗前增加约2倍,膝关节关节炎结果评分(KOOS)、退伍军人RAND 12项健康调查(VR12)评分均有明显改善,并且VR12的心理成分评分和定时爬楼梯的改善大于常规治疗组。另外,该试验采用超声检查双侧下肢静脉血栓发生情况,未有不良反应报道。同样,1例年轻大学生运动员和2例现役军人因膝关节疼痛进行关节镜检查并行清创术后BFRT的个案研究也报道了BFRT对股四头肌肌力及膝关节功能恢复的快速有效性<sup>[51]</sup>。

#### 4.4 BFRT与前交叉韧带重建或合并半月板修复术

前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)或半月板损伤是膝关节常见的运动损伤。在进行ACL重建或半月板术后,由于股四头肌激活障碍及术后各种原因所致的废用性萎缩,导致股四头肌功能持续减退,甚至在术后数年仍然存在,严重影响患者的功能恢复<sup>[52-53]</sup>。而有效的传统肌肉功能训练因其持续的疼痛、肿胀或需要保护移植植物等原因难以实现。目前为止,关于这方面BFRT的研究虽然不多,但包括有术前、术后早期、恢复期,甚至术后数年患者干预研究的相关报道。Žargi等<sup>[23]</sup>在ACL术前8天进行了5次低负荷BFRT干预,提供了短期低负荷BFRT对ACL重建后骨骼肌耐力预防效果的第一个证据,其结果显示,低负荷BFRT方

案治疗的患者在手术后的前4周内股四头肌肌耐力没有下降,而假性血流限制组的患者肌耐力降低约50%,至术后12周,两组股四头肌肌耐力差异不再明显。对于ACL重建术后早期BFRT的两项研究结果也不尽相同。Takarada等<sup>[26]</sup>采用无阻力负荷下间歇性血流限制对ACL重建术后第2天的患者开始干预研究,其结果显示,对照组膝伸肌横截面(cross-sectional area, CSA)相对下降幅度明显大于试验组,说明血流限制刺激也可有效减轻术后膝关节伸肌的废用性萎缩。然而,Iversen等<sup>[54]</sup>在运动员群体中采用和Takarada<sup>[26]</sup>相似的方案发现,血流限制并未减轻股四头肌萎缩,这可能与研究对象职业、阻塞压力不同等有关。另外,有不同学者对ACL重建术后恢复期或半月板损伤关节镜术后患者进行BFRT研究显示,BFRT可有效增加股四头肌肌力和横截面积,对膝关节功能恢复有重要的意义<sup>[55-57]</sup>。此外,Kilgas等<sup>[58]</sup>对9例ACL术后长达3—7年的患者进行了家庭BFRT方案干预,结果显示股直肌和股外侧肌厚度及膝关节伸肌肌力均增加,证明BFRT在ACL重建后很长时间内仍然可以改善股四头肌功能。以上研究均采用低负荷(30%1RM)BFRT进行干预,大多数研究发现其对股四头肌功能均有显著性意义。而最新一项研究采用高负荷(70%1RM),2次/W,共8W的BFRT干预发现,高负荷BFRT对股四头肌力量、体积及其激活程度的改善无显著性差异<sup>[59]</sup>,这更进一步说明血流限制结合低负荷训练的有效性和优越性。

除了BFRT对肌肉功能影响的报道之外,也有学者研究了其对ACL重建术后功能恢复期患者运动反应的影响<sup>[60]</sup>。该试验设计了三个观察组:低负荷健康组、低负荷ACL重建组和高负荷ACL重建组,通过测量自觉用力程度、肌肉疼痛、膝关节疼痛和运动前后5min的血压发现,BFRT在ACL重建组比健康组的自觉用力程度高,低负荷组比高负荷组的肌肉疼痛值高但关节疼痛值低,而三组研究对象血压没有明显差异。说明BFRT的运动反应不仅不会影响其应用,还能对整个ACL重建康复训练计划中的膝关节疼痛产生有利的影响。

#### 4.5 BFRT与膝关节置换术

膝骨性关节炎是全膝关节置换术(total knee arthroplasty, TKA)的主要病因,并且有数据显示全球膝关节置换手术率在不断上升。2008年,美国进行了超过65万次全膝关节置换手术,总费用高达90亿美元,并且预计2030年全膝关节置换手术将上升至350万次,并伴随着成本的不断增加<sup>[61]</sup>。尽管手术治疗能够减轻患者的膝关节疼痛,但术中止血带的应用加速了术后肌肉萎缩和肌肉功能的下降,并可导致长达数年的功能缺陷。磁共振成像(MRI)证明,在全膝关节置换术后两周,施加止血带的下肢股四头肌横截面积减少12%—14%,而对侧腿减少约6%<sup>[62]</sup>。因此,加强肌肉功能的康复对加快患者功能恢复,提高患者生活质量、改善患者手

术满意度都有非常重要的意义。高负荷的肌肉功能训练会对已经成功的手术产生一定的影响,并且可能加重患者的疼痛。而针对全膝关节置换术后BFRT的应用研究目前较少,仅有一项病例报道和一项假设性论述。其中,Gaunders等<sup>[63]</sup>在3例全膝关节置换术后患者的康复训练中加入了3次/周的BFRT,具体采用80%肢体闭塞压,阻力负荷及训练方式随患者恢复情况而定。训练8周后,患者的股四头肌力量有了很大改善。而Franz等<sup>[64]</sup>通过全膝关节置换术中为减少

出血而使用的止血带对肌肉的不良影响结合其他BFRT相关研究,假设将BFRT应用在术前患者的康复中,提高术前肌肉力量和质量,以此来抵消止血带对肌肉的副作用并提高患者手术满意度,但是真正效果还待进一步临床研究来证实。

上述膝关节功能康复相关BFRT具体方案见表2。

## 5 小结

膝关节功能障碍患者是骨科康复的主要对象之一,包括

表2 血流限制训练(BFRT)具体方案

| 作者/国家                          | 样本量/年龄    | 研究对象        | 受试者运动方式            | 血流限制方案            |                                |                                      |     |                     |      |      | 结果                                                 |
|--------------------------------|-----------|-------------|--------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-----|---------------------|------|------|----------------------------------------------------|
|                                |           |             |                    | 干预时期              | 阻力负荷                           | 血流限制程度/袖带宽度                          | 组数  | 每组次数                | 频率   | 持续时间 |                                                    |
| Segal 等 <sup>[4]</sup> /美国     | 42/48—68岁 | 男性KOA危险因素患者 | 坐位膝关节屈伸运动          | —                 | 30%1RM                         | 160—200mmHg/6.5cm                    | 4   | 30,15,15,15         | 3次/周 | 4周   | 股四头肌力量没有显著增加,但疼痛明显改善                               |
| Segal 等 <sup>[42]</sup> /美国    | 40/47—62岁 | 女性KOA危险因素患者 | 坐位膝关节屈伸运动          | —                 | 30%1RM                         | 160—200mmHg/6.5cm                    | 4   | 30,15,15,15         | 3次/周 | 4周   | 股四头肌肌力明显增加,但疼痛改善不明显                                |
| Bryk 等 <sup>[43]</sup> /巴西     | 34/53—70岁 | 女性KOA患者     | 坐位膝关节伸展运动          | —                 | 30%1RM                         | 200mmHg/未报告                          | 3   | 30                  | 3次/周 | 6周   | 疼痛、股四头肌肌力和膝关节功能评分方面无明显差异,但BFRT组可有效减轻训练期间膝前痛        |
| Ferraz 等 <sup>[27]</sup> /巴西   | 48/50—65岁 | 女性KOA患者     | 下肢推举和膝关节伸展运动       | —                 | 30%1RM                         | 70%LOP/17.5cm                        | 4—5 | 15                  | 2次/周 | 12周  | 股四头肌肌力、横截面积、膝关节功能评分和疼痛明显改善                         |
| Giles 等 <sup>[48]</sup> /澳大利亚  | 79/18—40岁 | PFP患者       | 膝关节伸展运动            | 无创伤性膝前疼痛发作超过8周后干预 | 30%1RM                         | 60%LOP/未报告                           | 4   | 30,15,15,15         | 3次/周 | 8周   | 股四头肌增加并且疼痛明显减轻                                     |
| Tennent 等 <sup>[3]</sup> /美国   | 17/27—37岁 | 膝关节镜检查者     | 坐位膝关节屈伸运动          | 术后2周后干预           | 30%1RM                         | 80%LOP/未报告                           | 4   | 30,15,15,15         | 3次/周 | 6周   | 大腿围度、膝关节屈伸肌力、膝骨关节炎结果评分(KOOS)、退伍军人健康调查(VR12)评分均明显改善 |
| Takarada 等 <sup>[26]</sup> /日本 | 16/21—25岁 | ACLR患者      | 静息坐位,倾斜约45°        | 术后第3—14d          | 0                              | 最初设定为180mmHg,逐渐升高,最大压力为238±8mmHg/9cm | 5   | 间歇BFR:充气5min,放气3min | 2次/d | 2周   | 股四头肌横截面积下降幅度明显减缓                                   |
| Ohta 等 <sup>[55]</sup> /日本     | 44/18—52岁 | ACLR患者      | 直腿抬高、髌关节外展5s,重复20次 | 术后16周内            | 术后1周+无负荷;术后2—4周+1kg;术后5—8周+2kg | 23.94kPa/未报告                         | —   | —                   | 6次/周 | 15周  | 股四头肌力量及横截面积显著增加                                    |
| 李奇等 <sup>[56]</sup> /中国        | 36/18—34岁 | ACLR患者      | 坐位伸膝运动             | 术后1周后干预           | 30%1RM                         | 80mmHg/未报告                           | 4   | 30,15,15,15         | 2次/周 | 3M   | 股四头肌肌力、横截面积、Lysholm评分显著增加                          |
| 刘莉等 <sup>[57]</sup> /中国        | 77/18—65岁 | 半月板损伤术后患者   | 坐位伸膝运动             | 术后15d后干预          | 30%1RM                         | 80%LOP/未报告                           | 4   | 15                  | 2次/d | 2周   | 大腿周径、平路步行速度、伸膝肌力及膝关节功能评分均显著增加                      |

续表2

| 作者/国家                                   | 样本量/<br>年龄                                     | 研究对象                       | 受试者<br>运动方式                                     | 血流限制方案                                           |                                |                                                          |        |                                     |            | 结果 |                                                                                             |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------|------------|----|---------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                         |                                                |                            |                                                 | 干预时期                                             | 阻力负荷                           | 血流限制程度/袖带<br>宽度                                          | 组数     | 每组<br>次数                            | 频率         |    | 持续<br>时间                                                                                    |
| Iversen<br>等 <sup>[54]</sup> /挪威        | 24/<br>18—<br>40岁                              | ACLR患<br>者                 | 坐位倾斜约<br>45°,股四头肌<br>等长收缩、直<br>腿抬高、膝关<br>节腿伸展运动 | 术后第<br>2—14d<br>内                                | 0或自身<br>重力                     | 起始压力130mmHg,<br>每隔一天压力增加<br>10mmHg,最大压力<br>为180mmHg/14cm | 5      | 间歇<br>BFR:充<br>气5min,<br>放气<br>3min | 14次/<br>2周 | 2周 | 股四头肌解剖横截<br>面积明显减少                                                                          |
| Žargi T<br>等 <sup>[23]</sup> /斯洛<br>文尼亚 | 24/(4<br>例)<br>脱落,实<br>际20<br>例/<br>18—<br>45岁 | ACLR或<br>合并半月<br>板损伤患<br>者 | 膝关节训练器<br>上进行膝关节<br>向心和离心抗<br>阻运动               | 术前的<br>最后8<br>天,最后<br>一次干<br>预在手<br>术前48h<br>内进行 | 0.5kg                          | BFR组袖带平均压<br>力150mmHg假性<br>BFR组中,袖带压<br>力20mmHg/14cm     | 6      | 至力竭                                 | 5次/<br>8d  | 8d | BFR组前4周内股<br>四头肌肌肉耐力没<br>有下降,而假性<br>BFR组的患者肌<br>肉耐力下降约<br>50%。术后12周,<br>股四头肌肌肉耐力<br>的差异不再明显 |
| Kilgas<br>等 <sup>[58]</sup> /美国         | 18/<br>20—<br>34岁                              | ACLR患<br>者                 | 坐位膝关节抗<br>阻力伸展、抗<br>体重半蹲、步<br>行25m训练            | 术后5±2<br>年进行<br>干预                               | 2.3—4.5kg                      | 50%LOP/18cm                                              | 3      | 30                                  | 5次/<br>周   | 4周 | 股直肌和股外侧肌<br>厚度及股四头肌肌<br>力均增加                                                                |
| Hughes<br>等 <sup>[60]</sup> /美国         | 30/<br>23—<br>38岁                              | ACLR患<br>者                 | 膝关节抗阻伸<br>展运动                                   | 健康人<br>群及<br>ACL术<br>后                           | 低负荷<br>30%1RM<br>高负荷<br>70%1RM | 80%LOP/未报告<br>80%LOP/未报告                                 | 4<br>3 | 30, 15,<br>15, 15<br>10             | —          | —  | ACL重建组比健<br>康组的自觉用力程<br>度高;低负荷组比<br>高负荷组的肌肉疼<br>痛值高而关节疼痛<br>值低;血压没有明<br>显差异。                |
| Curran<br>等 <sup>[59]</sup> /美国         | 34/<br>13—<br>20岁                              | ACLR患<br>者                 | 膝关节伸展运<br>动                                     | 术后10<br>周后干<br>预                                 | 70%1RM                         | 80%LOP/未报告                                               | 4      | 10                                  | 2次/<br>周   | 8周 | 股四头肌力量、体<br>积及激活程度改善<br>不明显                                                                 |
| Gaunder<br>等 <sup>[63]</sup> /美国        | 3/44,<br>51, 60<br>岁                           | TKA术<br>后患者                | 膝关节伸展运<br>动                                     | -                                                | 30%1RM                         | 80%LOP/未报告                                               | 4      | 至力竭                                 | 3次/<br>周   | 8周 | 股四头肌力量明显<br>改善                                                                              |

注:BFRT:血流限制训练;KOA:膝骨性关节炎;PFP:髌股关节痛;ACLR:前叉韧带重建;TKA:膝关节置换;1RM:单次重复最大负荷;LOP:肢体闭塞压

从青年到老年几乎所有年龄范围的一大康复群体。不管是膝关节骨性关节炎、髌股关节痛等疾病的保守治疗,还是膝关节韧带或半月板损伤甚至全膝关节置换等膝关节术后康复,肌力康复都是其康复的重点内容,同时也是一大难点。高强度的肌力训练对膝关节功能障碍患者大都不适用。事实证明,BFRT结合低强度抗阻训练对膝关节功能康复是一种很有前景的新方案。但目前这方面的高质量临床研究较少,此后需要大量多中心、多样本的研究来进一步确定BFRT对膝关节功能障碍康复的安全性、有效性和可行性。

参考文献

[1] American College of Sports Medicine. American college of sports medicine position stand progression models in resistance training for healthy adults[J]. Med Sci Sports Exerc, 2009, 41(3):687—708.  
[2] Lixandrão ME, Ugrinowitsch C, Berton R, et al. Magni-

tude of muscle strength and mass adaptations between high-load resistance training versus low-load resistance training associated with blood-flow restriction: a systematic review and meta-analysis[J]. Sports Med, 2018, 48(2):361—378.  
[3] Tennent DJ, Hylden CM, Johnson AE, et al. Blood flow restriction training after knee arthroscopy: a randomized controlled pilot study[J]. Clin J Sport Med, 2017, 27(3):245—252.  
[4] Segal N, Davis MD, Mikesky AE. Efficacy of blood flow-restricted low-load resistance training for quadriceps strengthening in men at risk of symptomatic knee osteoarthritis[J]. Geriatr Orthop Surg Rehabil, 2015, 6(3):160—167.  
[5] Shinohara M, Kouzaki M, Yoshihisa T, et al. Efficacy of tourniquet ischemia for strength training with low resistance[J]. Eur J Appl Physiol, 1998, 77(1—2):189—191.  
[6] Behringer M, Behlau D, Montag JCK, et al. Low-intensity sprint training with blood flow restriction improves 100-m dash[J]. J Strength Cond Res, 2017, 31(9):2462—2472.  
[7] DePhillipo NN, Kennedy MI, Aman ZS, et al. The role

- of blood flow restriction therapy following knee surgery: expert opinion[J]. *Arthroscopy*, 2018, 34(8):2506—2510.
- [8] Clarkson MJ, May AK, Warmington SA. Chronic blood flow restriction exercise improves objective physical function: a systematic review[J]. *Front Physiol*, 2019, 10(1058):1—12.
  - [9] Sugiarto D, Andriati A, Laswati H, et al. Comparison of the increase of both muscle strength and hypertrophy of biceps brachii muscle in strengthening exercise with low-intensity resistance training with and without the application of blood flow restriction and high-intensity resistance training[J]. *Bali Med J*, 2017, 6(2):251—257.
  - [10] Yasuad T, Fukumura K, Fukuda T, et al. Effects of low-intensity, elastic band resistance exercise combined with blood flow restriction on muscle activation[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2014, 24(1):55—61.
  - [11] Madarame H, Neya M, Ochi E, et al. Cross-transfer effects of resistance training with blood flow restriction[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2008, 40(2):258—263.
  - [12] Wilkinson BG, Donnenwerth JJ, Peterson AR. Use of blood flow restriction training for postoperative rehabilitation[J]. *Curr Sports Med Rep*, 2019, 18(6):224—228.
  - [13] Patterson SD, Hughes L, Head P, et al. Blood flow restriction training: a novel approach to augment clinical rehabilitation: how to do it[J]. *Br J Sports Med*, 2017, 51(23):1648—1649.
  - [14] Wilson JM, Lowery RP, Jor JM, et al. Practical blood flow restriction training increases acute determinants of hypertrophy without increasing indices of muscle damage[J]. *J Strength Cond Res*, 2013, 27(11):3068—3075.
  - [15] Luebbbers PE, Witte EV, Oshel JQ, et al. The effects of practical blood flow restriction training on adolescent lower body strength[J]. *J Strength Cond Res*, 2019, 33(10):2674—2683.
  - [16] Yamanaka T, Farley RS, Caputo JL. Occlusion training increases muscular strength in division IA football players[J]. *J Strength Cond Res*, 2012, 26(9):2523—2529.
  - [17] Loenneke JP, Kim D, Fahs CA, et al. The influence of exercise load with and without different levels of blood flow restriction on acute changes in muscle thickness and lactate[J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 2017, 37(6):734—740.
  - [18] Natsume T, Ozaki H, Saito AI, et al. Effects of electrostimulation with blood flow restriction on muscle size and strength[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2015, 47(12):2621—2627.
  - [19] Jessee MB, Mouser JG, Buckner SL, et al. Effects of load on the acute response of muscles proximal and distal to blood flow restriction[J]. *J Physiol Sci*, 2018, 68(6):769—779.
  - [20] Laurentino G, Ugrinowitsch C, Aihara A, et al. Effects of strength training and vascular occlusion[J]. *Int J Sports Med*, 2008, 29(8):664—667.
  - [21] Barrett K. The effects of moderate intensity strength training coupled with blood flow restriction: a 12 week intervention[D]. The University of Western Ontario, 2017.
  - [22] Barber-Westin S, Noyes FR. Blood flow-restricted training for lower extremity muscle weakness due to knee pathology: a systematic review[J]. *Sports Health*, 2019, 11(1):69—83.
  - [23] Žargi T, Drobnič M, Stražar K, et al. Short-term preconditioning with blood flow restricted exercise preserves quadriceps muscle endurance in patients after anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *Front Physiol*, 2018, 9(1150):1—13.
  - [24] Abe T, Fujita S, Nakajima T, et al. Effects of low-intensity cycle training with restricted leg blood flow on thigh muscle volume and VO<sub>2</sub>max in young men[J]. *J Sports Sci Med*, 2010, 9(3):452—458.
  - [25] Conceição MS, Junior EMM, Telles GD, et al. Augmented anabolic responses following 8-weeks cycling with blood flow restriction[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2019, 51(1):84—93.
  - [26] Takarada Y, Takazawa H, Ishii N. Applications of vascular occlusion diminish disuse atrophy of knee extensor muscles[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2000, 32(1):2035—2039.
  - [27] Ferraz RB, Gualano B, Rodrigues R, et al. Benefits of resistance training with blood flow restriction in knee osteoarthritis[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2018, 50(5):897—905.
  - [28] Conceição MS, Ugrinowitsch C. Exercise with blood flow restriction: an effective alternative for the non-pharmaceutical treatment for muscle wasting[J]. *J Cachexia Sarcopenia Muscle*, 2019, 10(2):257—262.
  - [29] 李新通, 潘玮敏, 覃华生, 等. 血流限制训练: 加速肌肉骨骼康复的新方法[J]. *中国组织工程研究*, 2019, 23(15):2415—2420.
  - [30] Moghetti P, Bacchi E, Brangani C, et al. Metabolic effects of exercise[J]. *Sports Endocrinology*, 2016, 47(1):44—57.
  - [31] Segal N, Davis MD, Mikesky AE. Efficacy of blood flow-restricted low-load resistance training for quadriceps strengthening in men at risk of symptomatic knee osteoarthritis[J]. *Geriatr Orthop Surg Rehabil*, 2015, 6(3):160—167.
  - [32] Spranger MD, Krishnan AC, Levy PD, et al. Blood flow restriction training and the exercise pressor reflex: a call for concern[J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2015, 309(9):1440—1452.
  - [33] Suga T, Okita K, Morita N, et al. Dose effect on intramuscular metabolic stress during low-intensity resistance exercise with blood flow restriction[J]. *J Appl Physiol*, 2010, 108(6):1563—1567.
  - [34] Yasuda T, Loenneke JP, Thiebaud RS, et al. Effects of blood flow restricted low-intensity concentric or eccentric training on muscle size and strength[J]. *PLoS One*, 2012, 7(12):e52843.
  - [35] Fry CS, Glynn EL, Drummond MJ, et al. Blood flow restriction exercise stimulates mTORC1 signaling and muscle protein synthesis in older men[J]. *J Appl Physiol*, 2010, 108(5):1199—1209.
  - [36] Hwang P, Willoughby DS. Mechanisms behind blood flow restricted training and its effect towards muscle growth[J]. *J Strength Cond Res*, 2019, 33(1):S167—S179.
  - [37] Fujita S, Abe T, Drummond MJ, et al. Blood flow restriction during low-intensity resistance exercise increases S6K1 phosphorylation and muscle protein synthesis[J]. *J Ap-*

- pl Physiol, 2007, 103(3):903—910.
- [38] Clynes MA, Jameson KA, Edwards MH, et al. Impact of osteoarthritis on activities of daily living: does joint site matter?[J]. *Aging Clin Exp Res*, 2019, 31(8):1049—1056.
- [39] Hafer JF, Kent JA, Boyer KA. Physical activity and age-related biomechanical risk factors for knee osteoarthritis[J]. *Gait Posture*, 2019, 70(1):24—29.
- [40] Nur H, Sertkaya BS, Tuncer T. Determinants of physical functioning in women with knee osteoarthritis[J]. *Aging Clin Exp Res*, 2018, 30(4):299—306.
- [41] Lee JY, Han K, McAlindon TE, et al. Lower leg muscle mass relates to knee pain in patients with knee osteoarthritis [J]. *Int J Rheum Dis*, 2018, 21(1):126—133.
- [42] Segal NA, Williams GN, Davis MC, et al. Efficacy of blood flow-restricted, low-load resistance training in women with risk factors for symptomatic knee osteoarthritis[J]. *PMR*, 2015, 7(4):376—384.
- [43] Bryk FF, Dos Reis AC, Fingerhut D, et al. Exercises with partial vascular occlusion in patients with knee osteoarthritis: a randomized clinical trial[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2016, 24(5):1580—1586.
- [44] Harper SA, Roberts LM, Layne AS, et al. Blood-flow restriction resistance exercise for older adults with knee osteoarthritis: a pilot randomized clinical trial[J]. *J Clin Med*, 2019, 8(2):265.
- [45] Cerqueira MS, de Brito Vieira WH. Effects of blood flow restriction exercise with very low load and low volume in patients with knee osteoarthritis: protocol for a randomized trial[J]. *Trials*, 2019, 20(1):135.
- [46] Crossley KM, Stefanik JJ, Selfe J, et al. 2016 Patellofemoral pain consensus statement from the 4th international patellofemoral pain research retreat, manchester. Part 1: terminology, definitions, clinical examination, natural history, patellofemoral osteoarthritis and patient-reported outcome measures[J]. *Br J Sports Med*, 2016, 50(14):839—843.
- [47] Crossley KM, van Middelkoop M, Callaghan MJ, et al. 2016 Patellofemoral pain consensus statement from the 4th international patellofemoral pain research retreat, manchester. Part 2: recommended physical interventions (exercise, taping, bracing, foot orthoses and combined interventions) [J]. *Br J Sports Med*, 2016, 50(1):844—852.
- [48] Giles L, Webster K, McClelland J, et al. Quadriceps strengthening with and without blood-flow restriction in the treatment of patellofemoral pain: a double blind randomised trial[J]. *Br J Sports Med*, 2017, 51(23):1688—1694.
- [49] Collins NJ, Barton CJ, van Middelkoop M, et al. 2018 Consensus statement on exercise therapy and physical interventions (orthoses, taping and manual therapy) to treat patellofemoral pain: recommendations from the 5th international patellofemoral pain research retreat, gold coast, Australia, 2017[J]. *Br J Sports Med*, 2018, 52(18):1170—1178.
- [50] Kim S, Bosque J, Meehan JP, et al. Increase in outpatient knee arthroscopy in the United States: a comparison of national surveys of ambulatory surgery, 1996 and 2006 [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2011, 93(11):994—1000.
- [51] Tennent DJ, Burns TC, Johnson AE, et al. Blood flow restriction training for postoperative lower-extremity weakness: a report of three cases[J]. *Curr Sports Med Rep*, 2018, 17(4):119—122.
- [52] Buckthorpe M, La Rosa G, Villa FD. Restoring knee extensor strength after anterior cruciate ligament reconstruction: a clinical commentary[J]. *Int J Sports Phys Ther*, 2019, 14(1):159—172.
- [53] Palmieri-Smith RM, Lepley LK. Quadriceps strength asymmetry following ACL reconstruction alters knee joint biomechanics and functional performance at time of return to activity[J]. *Am J Sports Med*, 2015, 43(7):1662—1669.
- [54] Iversen E, Røstad V, Larno A. Intermittent blood flow restriction does not reduce atrophy following anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *J Sport Health Sci*, 2016, 5(1):115—118.
- [55] Ohta H, Kurosawa H, Ikeda H, et al. Low-load resistance muscular training with moderate restriction of blood flow after anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *Acta Orthop Scand*, 2003, 74(1):62—68.
- [56] 李奇, 李蕊, 罗昌禄, 等. 血流限制性运动对前交叉韧带重建术后膝关节功能的影响[J]. *广东医学*, 2019, 40(10):1405—1408.
- [57] 刘莉, 李静, 赵冬梅, 等. 血流限制训练在膝关节镜术后患者康复训练中的应用[J]. *护理学杂志*, 2017, 32(24):82—84.
- [58] Kilgas MA, Lytle LLM, Drum SN, et al. Exercise with blood flow restriction to improve quadriceps function long after ACL reconstruction[J]. *Int J Sports Med*, 2019, 40(10):650—656.
- [59] Curran MT, Bedi A, Mendias CL, et al. Blood flow restriction training applied with high-intensity exercise does not improve quadriceps muscle function after anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled trial [J]. *Am J Sports Med*, 2020, 48(4):825—837.
- [60] Hughes L, Paton B, Haddad F, et al. Comparison of the acute perceptual and blood pressure response to heavy load and light load blood flow restriction resistance exercise in anterior cruciate ligament reconstruction patients and non-injured populations[J]. *Phys Ther Sport*, 2018, 33(1):54—61.
- [61] Kurtz S, Ong K, Lau E, et al. Projections of primary and revision hip and knee arthroplasty in the United States from 2005 to 2030[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2007, 89(4):780—785.
- [62] Ratchford SM, Bailey AN, Senesac HA, et al. Proteins regulating cap-dependent translation are downregulated during total knee arthroplasty[J]. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 2012, 302(6):702—711.
- [63] Gaunder CL, Hawkinson MP, Tennent DJ, et al. Occlusion training: pilot study for postoperative lower extremity rehabilitation following primary total knee arthroplasty[J]. *US Army Med Dep J*, 2017, 2(17):39—43.
- [64] Franz A, Queitsch FP, Behringer M, et al. Blood flow restriction training as a prehabilitation concept in total knee arthroplasty: a narrative review about current preoperative interventions and the potential impact of BFR[J]. *Medical Hypotheses*, 2018, 110(1):53—59.