

# 不同程度血流限制结合低强度抗阻训练的增肌效应研究进展

宋涛<sup>1,2</sup> 吴钰祥<sup>2</sup> 徐国栋<sup>2</sup> 庄洁<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海体育学院运动科学学院,上海 200438; <sup>2</sup>江汉大学体育学院,武汉 430056

通信作者:庄洁,Email: zhuangjiesh@163.com

**【摘要】** 血流限制结合低强度抗阻训练(LIRT-BFR)在减缓和改善肌肉衰减方面展现出较大的优势和潜力。本文主要就不同程度 LIRT-BFR 引起的血流动力学反应、急性肌肉反应(肌肉激活、肌肉肿胀和肌肉疲劳)以及长期训练适应(肌量、肌力提高)相关研究进展进行综述,旨在为特定人群进行该训练时选择适宜的血流限制压力提供参考。

**【关键词】** 血流限制结合低强度抗阻训练; 肌肉激活; 肌肉肿胀; 肌肉疲劳

**基金项目:**国家自然科学基金(82071970;82272123);国家社会科学基金(19ZDA352)

**Funding:** National Natural Science Foundation of China(82071970;82272123); National Social Science Fund of China(19ZDA352)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2023.05.021

血流限制结合低强度抗阻训练(blood flow restriction combined with low-intensity resistance training, LIRT-BFR)是一种在低强度抗阻训练期间通过充气袖带对上臂或大腿进行外部加压,部分限制动脉血流,同时阻塞静脉血流的训练方法<sup>[1-3]</sup>。该训练可获得与高强度抗阻训练相似的效果,显著增加肌肉横截面积并提高肌力<sup>[4-6]</sup>,在改善老年人、肌骨损伤或手术患者肌肉衰减方面展现出较大的优势和潜力<sup>[2,7]</sup>。在实施 LIRT-BFR 时,袖带压力的选择至关重要,一个适宜的压力应在不完全阻断动脉血流或危及使用者安全的情况下最大限度地增加代谢压力<sup>[8]</sup>。但前期研究应用的压力缺乏一致性,一些研究采用绝对压力<sup>[12-13]</sup>,一些研究采用相对压力(如收缩压的百分比)<sup>[9]</sup>,近年来为避免在相同绝对压力下由于所用设备(如不同的袖带宽度和研究对象肢体大小差异而导致的血流限制变化,多数研究开始采用动脉闭塞压力(arterial occlusion pressure, AOP)的百分比<sup>[5-6,10]</sup>。

即使如此,对于选取多少压力可以获得改善肌量、肌力最佳效果目前仍缺乏共识,且在绝大多数研究中,对于所选择的压力没有任何明确的理由,对全谱血流限制压力进行系统的测量并报告所有相关的急性肌肉反应和长期训练适应,以确定对老年人、运动损伤或手术后康复期患者等特定人群的理想限制压力,是亟待解决的问题<sup>[10]</sup>。本文围绕不同程度 LIRT-BFR 的血流动力学反应、急性肌肉反应和长期训练适应,对相关研究进行综述,以期对特定人群进行 LIRT-BFR 时选择适宜压力提供参考。

## LIRT-BFR 的常用方案

**AOP 测试常用方法:**将充气袖带置于受试者上臂或大腿近端,之后将多普勒探头置于手腕桡动脉处或内踝后缘与跟腱的中点以检测桡动脉或胫后动脉搏动,将袖带充气至 50 mmHg (1 mmHg=0.133 kPa),适应后逐渐加压直至多普勒探头不再检测到动脉搏动时的最低压力即为 AOP<sup>[2]</sup>。LIRT-BFR 常以尼龙或弹性充气袖带置于受试者上臂或大腿近端,目前常用的袖

带压力为 40%~80% AOP,仍是一个较大的压力范围。一次血流限制多控制在 5~10 min,并以持续限制模式居多,抗阻训练负荷常设为 20%~40% 重复 1 次的最大负荷量(1-repetition maximum, 1RM),运动组数常设 4 组,其中第 1 组重复 30 次,后 3 组均重复 15 次,也有研究将每组或后 3 组重复至主观力竭,组间歇 30~60 s,运动周期常在 3 周以上,频率为 2~3 次/周。LIRT-BFR 的常用方案详见表 1<sup>[1,2,10]</sup>。

表 1 LIRT-BFR 的常用方案

| LIRT-BFR 要素 | 常用方法                               |
|-------------|------------------------------------|
| 袖带材料        | 尼龙或弹性充气袖带                          |
| 袖带尺寸(宽度)    | 上肢(7±4)cm;下肢(14±4)cm               |
| 袖带位置        | 上臂、大腿近端                            |
| 袖带压力(血流限制压) | 40%~80% AOP                        |
| 血流限制时间      | 5~10 min/次(不同抗阻运动间再灌注)             |
| 血流限制模式      | 持续限制(居多)或间歇限制                      |
| 运动负荷        | 20%~40% 1RM                        |
| 运动组数及重复次数   | 4 组,共 75 次重复(30×15×15×15,或重复至主观力竭) |
| 组间歇         | 30~60 s                            |
| 运动频率和时长     | 2~3 次/周,>3 周                       |
| 抗阻运动方式      | 上肢:肘屈伸、坐姿推胸、肩上推举等;下肢:伸膝、腿举、深蹲、提踵等  |

## 不同程度 LIRT-BFR 的血流动力学反应

血流和组织灌注量的变化是血流限制的直接生理效应。围绕不同程度 LIRT-BFR 的血流动力学反应, Iida 等<sup>[11]</sup>发现,随着绝对压力的增加(由 0 mmHg 增至 100、200 和 250 mmHg),股动脉血流量几乎呈线性下降,由(298.3±41.8) ml/min 分别降至(129.8±25.6)、(63.8±21.7)和(34.8±16.2) ml/min。而 Mouser 等<sup>[12]</sup>研究发现,静息状态下肱动脉血流随着相对限制压力的增加(由 0% AOP 以 10% 的增量增至 100% AOP)呈非线性下降,在 40%~90% AOP 压力下血流量的减少程度相似,并由此认为

使用接近 50% AOP 的压力可能更合适。Kilgas 等<sup>[8]</sup>亦有类似发现,其比较了静息状态 0%、60%、80%、100%和 120% AOP 下的肱动脉血流变化,发现血流随着压力增加而减少,但在 60%和 80% AOP 下的血流量无显著差异。Singer 等<sup>[13]</sup>研究发现,静息状态下的股浅动脉血流量随压力增加持续减少,但在伸膝训练(30%最大等长收缩,1 组 30 次重复)期间,所有压力下的血流量均显著增加,虽压力越大增加幅度越小,但在 60%和 80% AOP 下的血流量差异亦无统计学意义。上述研究提示当采用 AOP 百分比作为袖带压力时,血流受限程度在一定范围内可能与其呈非线性关系,运动期间由于骨骼肌泵的启动、血压和肌内压的升高以及肢体位置的变化可能会影响袖带限制血流的能力,从而使一定范围内(如 60%~80% AOP)受限动脉血流量不随压力改变而显著变化。

不同程度血流限制下骨骼肌微血管氧合状态的改变是另一个受关注的血流动力学反应。骨骼肌微血管氧合状态越低提示代谢应激越强,在该状态下持续运动可能增加神经肌肉激活并额外募集快肌纤维,这可能是 LIRT-BFR 改善肌量和肌力的原因之一<sup>[14-15]</sup>。Reis 等<sup>[16]</sup>对比观察了不同压力(0%、40%、60%和 80% AOP)的伸膝训练(20% 1RM, 4 组, 30×15×15×15 次重复)对股外侧肌微血管氧合的急性影响,结果显示运动期间 0%和 40% AOP 导致脱氧血红蛋白(deoxyhemoglobin, deoxy-Hb)浓度的降低幅度显著低于 60% AOP,而从 60%增至 80% AOP 该指标的变化无显著差异,由此认为 60% AOP 可能代表低强度抗阻训练时引起组织缺氧和代谢物积累的生理阈值。Kilgas 等<sup>[8]</sup>亦发现,静息状态和握力训练(30%最大等长收缩,1 组 30 次重复)期间 deoxy-Hb 浓度均随压力增加而增加,但分别在高于 60%和 80% AOP 时不再显著增加,运动期间组织氧饱和度指数(tissue oxygen saturation index, TSI)随压力增加而降低,但在 60%和 80% AOP 下无显著差异,由此认为袖带压力在 60%~80% AOP 适合增加代谢应激和代谢物积累,且不会完全阻断血流和损害个人安全。Singer 等<sup>[13]</sup>则发现,伸膝训练期间 TSI 随压力增加而降低,但在 80%和 100% AOP 下无显著差异。上述研究初步表明,LIRT-BFR 时,60% AOP 可能足以致使血流量明显受限、deoxy-Hb 大量增加和 TSI 显著降低,从而引起局部缺氧和代谢物累积,继续增加压力至 80% AOP 可能不会引起血进一步显著变化,而 80% AOP 以上的压力可能会增加不适和心血管反应的风险<sup>[8,13,16]</sup>。因此,从血流动力学角度考虑,LIRT-BFR 时 60% AOP 左右的压力可能是适宜的。但上述研究均以健康青年为对象,老年人、运动损伤或手术后康复期患者对不同程度 LIRT-BFR 是否有类似的血流动力学反应尚缺乏相应证据,且目前对 40%~60% AOP 压力引起的血流动力学反应缺乏充分的对比观察,有待进一步研究。

### 不同程度 LIRT-BFR 的急性肌肉反应

与低强度抗阻训练相比,LIRT-BFR 可产生更显著的肌肉激活、肿胀、疲劳和合成代谢信号,但多少血流限制可引起最显著的急性肌肉反应仍有待解决<sup>[2,17]</sup>。

#### 一、不同压力 LIRT-BFR 对肌肉激活的影响

肌肉激活程度常用骨骼肌运动期间表面肌电振幅的均方根值(root mean square, RMS)相对于运动前该肌最大自主等长收缩(maximum voluntary isometric contraction, MVC)时的 RMS

百分比(% MVC)表示,以间接反映运动单位的募集情况。围绕不同程度 LIRT-BFR 对肌肉激活的影响,有研究观察到伸膝训练(20%、30% 1RM, 4 组, 30×15×15×15 次重复)期间,压力从 40% AOP 增加到 50% AOP 使股外侧肌激活程度显著增加(66% MVC, 87% MVC),但当压力增加到 60% AOP 时没有观察到进一步增加<sup>[17]</sup>。Singer 等<sup>[13]</sup>进一步发现,60%、80%和 100% AOP 压力下伸膝训练时,股外侧肌 RMS 差异亦无统计学意义。2 项研究表明,不超过 60% AOP 的压力可能足以引起运动单位募集的显著增加。李志远等<sup>[18]</sup>发现,50% AOP 可能是深蹲训练(30% 1RM, 4 组, 30×15×15×15 次重复)时显著提高股四头肌和股后肌群激活程度的最佳压力。此外,Counts 等<sup>[19]</sup>发现,40%~90% AOP(10%增量递增)压力下,屈肘训练(30% 1RM, 4 组, 30×15×15×15 次重复)时肱二头肌的% MVC 均无显著差异,由此认为,肌肉激活在很大程度上不受施加压力相对差异的影响。与此类似,Dankel 等<sup>[20]</sup>发现,40%和 80% AOP 压力下,屈肘训练(10%~20% 1RM, 4 组, 30×15×15×15 次重复)期间,肘部屈肌% MVC 无显著差异,% MVC 的增加主要由运动负荷增加引起,而与施加的压力无关。可能跟运动重复至主观力竭有关,还有研究甚至没有观察到低(10%~30% AOP)、中等(50% AOP)和高(90% AOP)压力以及无压力下屈肘训练(30% 1RM, 4 组, 每组重复至主观力竭时)肱二头肌激活程度的显著差异<sup>[21]</sup>。

而与上述结果不同的是,Fatela 等<sup>[22]</sup>发现伸膝训练(20% 1RM, 4 组, 30×15×15×15 次重复)期间,相比于 40%和 60% AOP,只有 80% AOP 压力下股直肌和股内侧肌的% MVC 才显著增加,由此认为,运动期间引起运动单位募集显著增加所需的最低压力可能是 80% AOP。这可能与研究对象的特点(有规律抗阻训练者、缺乏运动锻炼者)、运动强度(30% 1RM、20% 1RM)等不同有关,有待统一条件进一步验证。

总体而言,目前针对 LIRT-BFR 引起最显著肌肉激活的适宜压力仍有一定争论,但较多研究支持中、低压力(如 40%~60% AOP)LIRT-BFR 足以引起骨骼肌激活显著增加,继续增加压力可能不会进一步增加肌肉激活程度。

#### 二、不同程度 LIRT-BFR 对肌肉肿胀的影响

抗阻训练中由于磷酸、乳酸等代谢产物在肌肉中堆积,血浆中水分在渗透压作用下进入肌肉对其稀释,从而使肌肉呈肿胀状态(常表现为肌肉厚度或围度的增加),肌肉中堆积的代谢产物浓度越高,肿胀效应越明显<sup>[23]</sup>。而急性肌肉肿胀可启动合成代谢反应,并抑制蛋白质分解,激活雷帕霉素靶蛋白和丝裂原活化蛋白激酶信号通路,对肌肉肥大和长期肌肉生长具有重要作用<sup>[3]</sup>。Loenneke 等<sup>[24]</sup>发现,伸膝训练(20%、30% 1RM, 4 组, 30×15×15×15 次重复)结合 40%、50%和 60% AOP 压力引起的大腿前、外侧肌肉厚度的变化相似,由此认为 40% AOP 可能是最大化急性肌肉反应所需压力。与此类似,Dankel 等<sup>[20]</sup>研究发现,40%和 80% AOP 压力下屈肘训练后肘部屈肌厚度均显著增加,但两者间无显著差异。李卓倩等<sup>[25]</sup>观察到 100、140 和 180 mmHg 组进行哑铃屈、伸臂(30% 1RM, 4 组, 每组 30 次重复或至力竭)后的上肢放松围变化幅度均显著高于无压力组,其中 180 mmHg 组的变化显著低于 100 mmHg 组和 140 mmHg 组,而后两者间无显著差异,表明低强度抗阻训练结合中、低压力的血流限制可能足以引起显著的急性肌肉肿胀。而 Jessee

等<sup>[21]</sup>研究发现,0%、10%~30%、50%和90% AOP 压力下屈肘训练后即刻肱二头肌厚度均显著增加,但相互间差异无统计学意义,提示血流限制似乎不会在很大程度上增加急性肌肉肿胀。这可能与该研究所采用的运动方案(每种条件下均运动至主观力竭)有关,有待进一步研究。

### 三、不同程度 LIRT-BFR 对肌肉疲劳的影响

相比于低强度抗阻训练,LIRT-BFR 可增加代谢产物的积累,使肌内 pH 值降低并刺激 III、IV 组传入纤维,从而更早地引起肌肉疲劳(常以运动后峰值肌力或力矩的下降为标志)<sup>[2]</sup>。针对不同压力 LIRT-BFR 对肌肉疲劳的影响,有研究显示,将压力从 50% AOP 增加到 60% AOP,伸膝训练后不会导致峰值力矩进一步降低,提示较高的压力可能不会增加肌肉疲劳<sup>[17]</sup>。与该结果较为一致,Counts 等<sup>[19]</sup>发现,不同压力(40%~90% AOP,10%增量递增)屈肘训练后肘屈肌峰值力矩的下降程度相似。另有研究虽发现中、高压(50%和90% AOP)比低压力(10%~30% AOP)下屈肘训练后肘屈肌峰值力矩的下降程度更大,但 50%和90% AOP 所致力矩下降亦无显著差异<sup>[21]</sup>。

上述研究表明,LIRT-BFR 引起肌肉疲劳所需压力可能在 40%或 50% AOP 左右,继续增加压力不会进一步增加肌肉疲劳。但可能跟运动负荷(30% 1RM 对 10%~20% 1RM)不同有关,也有研究发现,极低强度(10%~20% 1RM)抗阻运动中需较高压力才会增加肌肉疲劳。如伸膝峰值力矩只在 80% AOP 压力下伸膝训练(20% 1RM)后显著下降,而在 40%和 60% AOP 压力下无显著变化<sup>[22]</sup>。80% AOP 压力下屈肘(10%~20% 1RM)训练后肘屈肌峰值力矩下降幅度大于 40% AOP<sup>[20]</sup>。此外,还有研究发现,伸膝训练(30% 1RM,4 组,30×15×15×15 次重复)后 60%和 80% AOP 组的伸膝峰值肌力均显著下降,而对对照组(无血流限制)与 40% AOP 组该指标未显著下降,提示 LIRT-BFR 引起肌肉疲劳所需压力可能在 60% AOP 以上<sup>[26]</sup>。总之,目前关于 LIRT-BFR 引起急性肌肉疲劳所需压力尚无一致认识,有待统一条件进一步研究。

### 不同程度 LIRT-BFR 的其它急性反应

生长激素、睾酮等可促进肌肉增长的合成代谢激素分泌增加是 LIRT-BFR 的另一种急性生理效应<sup>[27]</sup>。李卓倩等<sup>[25]</sup>发现,相比于更高压力,上肢在 100 mmHg 或 140 mmHg、下肢在 140 mmHg 或 180 mmHg 条件下,一次抗阻训练(深蹲、屈臂、伸臂,30% 1RM)后,血清生长激素和睾酮均显著增加,且疲劳感相对较小,但更低压力下是否有类似效果在该研究中没有进一步验证。此外,潘颖等<sup>[26]</sup>对比观察了不同压力伸膝训练对自主神经功能的急性效应,发现 80% AOP 组运动后使副交感神经活性恢复显著延迟,交感神经活性大幅增强,相比于 40%和 60% AOP 组需更长时间恢复交感-副交感神经的平衡性,并据此建议心血管风险高的患者不宜使用 80% AOP 训练。

### 不同程度 LIRT-BFR 的长期训练适应

围绕不同压力 LIRT-BFR 的急性肌肉反应能否转化为长期肌肉适应,Counts 等<sup>[19]</sup>在探究 40%~90% AOP 压力下屈肘训练对肘屈肌激活和疲劳的急性影响基础上,进一步比较了 8 周(2~3 次/周)40%和 90% AOP 压力下该训练对肘屈肌大小、力

量和功能的影响,其结果显示 2 种压力下肘屈肌厚度、峰值肌力和力矩以及耐力产生了类似的增加。此外,Lixandrão 等<sup>[28]</sup>虽发现,12 周(2 次/周)伸膝训练(2~3 组,每组 15 次重复)在 20% 1RM 强度下结合 80% AOP 比结合 40% AOP 所致股四头肌横截面积的增加更加显著,但在 40% 1RM 强度运动时闭塞压力对结果的影响次于运动强度的影响,且 2 种强度下不同压力训练方案对伸膝 1RM 的提高相似。

上述研究表明,适当负荷下长期规律地进行 LIRT-BFR,结合相对低的压力(如 40% AOP)可能足以改善肌量和肌力。另有研究发现 16 周(3 次/周)下肢抗阻训练(深蹲、腿举、伸膝等,20%~30% 1RM,3~4 组,15 次重复/组)结合 80% AOP [(105.45±6.50)mmHg]和 100% AOP [(185.75±5.45)mmHg]均可显著增加伸膝峰值力矩,虽 100% AOP 压力下增加幅度稍大,但两者间无显著差异<sup>[5]</sup>。与该结果类似,芦劭明等<sup>[29]</sup>发现,12 周(3 次/周)半蹲训练(20% 1RM,4 组,30×15×15×15 次重复)结合 120 mmHg 或 180 mmHg 压力均使股直肌、股中肌厚度与伸膝峰值力矩显著增加,且相互间无显著差异。该 2 项研究表明,LIRT-BFR 结合 80% AOP 或相当的绝对压力可显著增加肌量和肌力,而不需要更高的压力,但更低的压力是否产生类似效果在 2 项研究中没有进一步验证。

总体而言,目前围绕不同压力 LIRT-BFR 的长期训练适应开展的相关研究尚比较缺乏,有必要在急性研究的基础上,进一步对比观察长期进行不同压力 LIRT-BFR 对不同程度肌量、肌力的改善效应。

### 小结

综上所述,中、低压力(如 40%~60% AOP)的 LIRT-BFR 可能足以引起显著的血流受限、缺氧和代谢物累积,增加肌肉激活、肿胀、疲劳和合成代谢刺激,从而增加肌量和肌力,继续增加压力不会进一步显著增强上述生理效应,但会增高受试者主观疲劳和不良心血管反应风险。有可能因研究对象、运动强度、运动组数和重复次数以及运动环节与方式等不同,目前围绕不同程度 LIRT-BFR 对肌肉激活、肿胀和疲劳等的影响仍存争论,且前期研究大多以健康青年为对象,对于老年人、运动损伤或手术后康复期患者等特定人群尚缺乏相关研究证据。今后应进一步对比观察不同程度 LIRT-BFR 对该特定人群的血流动力学反应和所有急、慢性训练适应,以确定该训练改善特定人群肌量及肌力的适宜压力。

### 参考文献

- [1] Patterson SD, Hughes L, Warmington S, et al. Blood flow restriction exercise: considerations of methodology, application, and safety [J]. *Front Physiol*, 2019, 10:533. DOI:10.3389/fphys.2019.00533.
- [2] Lorenz DS, Bailey L, Wilk KE, et al. Blood flow restriction training [J]. *J Athl Train*, 2021, 56(9):937-944. DOI:10.4085/418-20.
- [3] Saatmann N, Zaharia OP, Loenneke JP, et al. Effects of blood flow restriction exercise and possible applications in type 2 diabetes [J]. *Trends Endocrinol Metab*, 2021, 32(2):106-117. DOI: 10.1016/j.tem.2020.11.010.
- [4] Cook SB, LaRoche DP, Villa MR, et al. Blood flow restricted resistance training in older adults at risk of mobility limitations [J]. *Exp Gerontol*

- tol, 2017, 99: 138-145. DOI: 10.1016/j.exger.2017.10.004.
- [5] Letieri RV, Teixeira AM, Furtado GE, et al. Effect of 16 weeks of resistance exercise and detraining comparing two methods of blood flow restriction in muscle strength of healthy older women: a randomized controlled trial[J]. *Exp Gerontol*, 2018, 114: 78-86. DOI: 10.1016/j.exger.2018.10.017.
- [6] Rodrigues R, Ferraz RB, Kurimori CO, et al. Low-load resistance training with blood-flow restriction in relation to muscle function, mass, and functionality in women with rheumatoid arthritis[J]. *Arthritis Care Res*, 2020, 72(6): 787-797. DOI: 10.1002/acr.23911.
- [7] 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. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.1142.
- [8] Kilgas MA, McDaniel J, Stavres J, et al. Limb blood flow and tissue perfusion during exercise with blood flow restriction[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2019, 119(2): 377-387. DOI: 10.1007/s00421-018-4029-2.
- [9] Yasuda T, Fukumura K, Tomaru T, et al. Thigh muscle size and vascular function after blood flow-restricted elastic band training in older women[J]. *Oncotarget*, 2016, 7(23): 33595-33607. DOI: 10.18632/oncotarget.9564.
- [10] Clarkson MJ, May AK, Warmington SA. Is there rationale for the cuff pressures prescribed for blood flow restriction exercise: a systematic review[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2020, 30(8): 1318-1336. DOI: 10.1111/sms.13676.
- [11] Iida H, Kurano M, Takano H, et al. Hemodynamic and neurohumoral responses to the restriction of femoral blood flow by KAATSU in healthy subjects[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2007, 100(3): 275-285. DOI: 10.1007/s00421-007-0430-y.
- [12] Mouser JG, Dankel SJ, Jessee MB, et al. A tale of three cuffs: the hemodynamics of blood flow restriction[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2017, 117(7): 1493-1499. DOI: 10.1007/s00421-017-3644-7.
- [13] Singer TJ, Stavres J, Elmer SJ, et al. Knee extension with blood flow restriction: impact of cuff pressure on hemodynamics[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2020, 120(1): 79-90. DOI: 10.1007/s00421-019-04250-2.
- [14] Yanagisawa O, Sanomura M. Effects of low-load resistance exercise with blood flow restriction on high-energy phosphate metabolism and oxygenation level in skeletal muscle[J]. *Interv Med Appl Sci*, 2017, 9(2): 67-75. DOI: 10.1556/1646.9.2017.2.16.
- [15] Lauver JD, Cayot TE, Rotarius TR, et al. Acute neuromuscular and microvascular responses to concentric and eccentric exercises with blood flow restriction[J]. *J Strength Cond Res*, 2020, 34(10): 2725-2733. DOI: 10.1519/JSC.0000000000003372.
- [16] Reis JF, Fatela P, Mendonca GV, et al. Tissue oxygenation in response to different relative levels of blood-flow restricted exercise[J]. *Front Physiol*, 2019, 10: 407. DOI: 10.3389/fphys.2019.00407.
- [17] Loenneke JP, Kim D, Fahs CA, et al. Effects of exercise with and without different degrees of blood flow restriction on torque and muscle activation[J]. *Muscle Nerve*, 2015, 51(5): 713-721. DOI: 10.1002/mus.24448.
- [18] 李志远, 虞松坤, 李加鹏, 等. 负重深蹲中施加不同动脉闭塞压和间歇方式对大腿肌肉激活特征的影响[J]. *中国应用生理学杂志*, 2021, 37(3): 300-305. DOI: 10.12047/j.cjap.6056.2021.017.
- [19] Counts BR, Dankel SJ, Barnett BE, et al. Influence of relative blood flow restriction pressure on muscle activation and muscle adaptation[J]. *Muscle Nerve*, 2016, 53(3): 438-445. DOI: 10.1002/mus.24756.
- [20] Dankel SJ, Jessee MB, Buckner SL, et al. Are higher blood flow restriction pressures more beneficial when lower loads are used[J]. *Physiol Int*, 2017, 104(3): 247-257. DOI: 10.1556/2060.104.2017.3.2.
- [21] Jessee MB, Mattocks KT, Buckner SL, et al. The acute muscular response to blood flow-restricted exercise with very low relative pressure[J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 2018, 38(2): 304-311. DOI: 10.1111/cpf.12416.
- [22] Fatela P, Reis JF, Mendonca GV, et al. Acute effects of exercise under different levels of blood-flow restriction on muscle activation and fatigue[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2016, 116(5): 985-995. DOI: 10.1007/s00421-016-3359-1.
- [23] 盛菁菁, 魏文哲, 孙科, 等. 加压状态下慢速下坡步行的生理负荷与增肌效果研究[J]. *中国体育科技*, 2019, 55(3): 13-19. DOI: 10.16470/j.csst.2019025.
- [24] 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. DOI: 10.1111/cpf.12367.
- [25] 李卓倩, 魏文哲, 赵之光, 等. 低强度抗阻运动中不同程度的血流限制对血清生长激素和睾酮分泌量的影响[J]. *中国体育科技*, 2020, 56(4): 38-43. DOI: 10.16470/j.csst.2019078.
- [26] 潘颖, 赵彦, 田宜鑫, 等. 离心运动伴不同程度的血流限制对外周疲劳及心脏自主神经功能的效应研究[J]. *中国体育科技*, 2020, 57(2): 28-36. DOI: 10.16470/j.csst.2020021.
- [27] 苏荣海. 加压训练促进肌适能的实践应用及生理机制的研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2019, 34(7): 856-861. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2019.07.022.
- [28] Lixandrão ME, Ugrinowitsch C, Laurentino G, et al. Effects of exercise intensity and occlusion pressure after 12 weeks of resistance training with blood-flow restriction[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2015, 115(12): 2471-2480. DOI: 10.1007/s00421-015-3253-2.
- [29] 芦劭明, 刘善云, 孙鹏, 等. 不同压力血流限制结合低强度抗阻训练对大学生下肢肌肉及心肺功能影响[J]. *中国应用生理学杂志*, 2020, 36(6): 595-599. DOI: 10.12047/j.cjap.6032.2020.125.

(修回日期: 2023-04-10)

(本文编辑: 汪玲)