



不同负荷结构急性抗阻训练对神经肌肉表现的影响

Comparative Effects of Acute Resistance Training with Varied Loading Structures on Neuromuscular Performance

项晓琰¹, 徐飞², 路恒¹, 王然^{1*}

XIANG Xiaoyan¹, XU Fei², LU Heng¹, WANG Ran^{1*}

摘要:目的:比较具有丰富抗阻训练经验的男性在高负荷量抗阻训练(high volume resistance training, HVRT)与高负荷强度抗阻训练(high intensity resistance training, HIRT) 2种负荷结构下进行急性抗阻训练过程中的神经肌肉疲劳特征,以及训练后的急性神经肌肉反应和神经肌肉功能变化。方法:采用随机交叉研究设计,招募15名具有丰富抗阻训练经验的男性受试者,随机先后完成一次HVRT(6组×8~12次×70% 1RM深蹲,组间间歇1 min)与HIRT(6组×3~5次×90% 1RM深蹲,组间间歇3 min),在训练前后进行反向跳、最大等长伸膝测试、肌骨超声测试和血乳酸测试,同时记录训练过程中受试者的动作速度以及下肢优势侧股外侧肌的表面肌电信号。结果:HVRT过程中的平均速度和股外侧肌平均功率频率下降量均显著大于HIRT($P<0.05$)。HVRT后血乳酸浓度、股外侧肌厚度和横截面积的增加量均显著大于HIRT($P<0.05$)。HVRT后反向跳反应力量指数和最大等长伸膝力矩的下降量均大于HIRT,但仅反应力量指数的下降量具有统计学差异($P<0.05$)。结论:相较于HIRT, HVRT能够引起更大程度的神经肌肉疲劳,同时对于发展肌肉围度也更加有效。

关键词: 运动表现; 训练负荷; 动作速度; 肌骨超声

Abstract: Objective: To compare the neuromuscular fatigue characteristics during acute resistance training sessions under two loading structures—high-volume resistance training (HVRT) and high-intensity resistance training (HIRT)—and the acute neuromuscular responses and functional changes post-training among men with extensive resistance training experience. The paper utilizes a randomized crossover study. Methods: Fifteen men with significant resistance training experience randomly complete an HVRT session (6 sets×8 to 12 repetitions×70% 1RM squat, with a 1-minute rest interval between sets) and an HIRT session (6 sets×3 to 5 repetitions×90% 1RM squat, with a 3-minute rest interval between sets). Measures such as the countermovement jumps, maximum voluntary isometric contractions, musculoskeletal ultrasound tests, and blood lactate concentration measurements, are performed before and after each training session. Moreover, movement speed measurements and surface electromyogram signals of the vastus lateralis muscles on the dominant leg are conducted throughout each session. Results: The reductions in average speed of the squat and mean frequency of the vastus lateralis muscles during HVRT are significantly greater than those during HIRT ($P<0.05$), while after HVRT, increases in blood lactate concentration, as well as thickness and cross-sectional area of the vastus lateralis muscles ($P<0.05$), are significantly greater compared to those after HIRT. Additionally, reactive strength index of countermovement jumps and maximum isometric knee-extension torque decline more after HVRT than after HIRT, with statistically significant differences observed only in the descend ranges of the reactive strength indices ($P<0.05$). Conclusions: HVRT appears to induce greater neuromuscular fatigue and muscle hypertrophy compared to HIRT.

基金项目:

上海市科学技术委员会“地方院校能力建设计划”项目(21010503500);
上海市人类运动能力开发与保障重点实验室资助项目(11DZ2261100)

第一作者简介:

项晓琰(1997-),女,在读博士研究生,主要研究方向为体能训练的生物学特征, E-mail: 2111111010@sus.edu.cn。

*通信作者简介:

王然(1987-),男,教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为竞技运动科学研究与应用, E-mail: wangran@sus.edu.cn。

作者单位:

1.上海体育大学,上海 200438;
2.杭州师范大学,浙江 杭州 311121
1.Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China;
2.Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China.

Keywords: *sports performance; training load; movement speed; musculoskeletal ultrasound*
中图分类号: G808.12 **文献标识码:** A

力量素质是发展其他体能素质的必要条件,也是各项目所需运动技能的重要基础。研究表明,良好的力量水平能够改善运动员的专项运动技能以及跳跃、冲刺、变向等运动表现,并能有效降低运动损伤风险(Suchomei et al., 2016)。为了最大限度地提高竞技成绩,教练员和科研人员会对运动员的力量素质进行各种针对性训练,从而提高运动员的肌肉力量。肌肉的横截面积与最大力量之间存在显著正相关关系(Maughan et al., 1983)。因此,发展肌肉力量和围度一直是竞技运动训练关注的重点。抗阻训练是提高肌肉力量和刺激肌肉肥大最有效的方法(American College of Sports Medicine, 2009),不同的抗阻训练计划可能会对肌肉力量和围度产生不同的刺激,进而影响肌肉的适应性变化(Bartolomei et al., 2021)。然而,现阶段对于抗阻训练计划对肌肉适应性变化的具体影响尚未达成共识(Campos et al., 2002; Chestnut et al., 1999)。

虽然设计抗阻训练计划时需要根据训练目标考虑训练的动作、顺序、频率、负荷量、负荷强度和间歇时长等变量,但决定抗阻训练刺激差异的负荷结构主要是负荷量和负荷强度(王贝, 2013; Tan, 1999)。目前,高负荷量和高负荷强度是运动员最常用的 2 种抗阻训练负荷结构(Bartolomei et al., 2021)。高负荷量抗阻训练(high volume resistance training, HVRT)一般采用 70% 左右的一次最大重复重量(one repetition maximum, 1RM)完成较多的组内重复次数(8~12 次),但组间间歇时间较短(30~90 s),主要用于增加肌肉围度,也有助于提升肌肉力量;高负荷强度抗阻训练(high intensity resistance training, HIRT)通常采用 85% 以上的 1RM 完成较少的组内重复次数(不超过 6 次),但组间间歇时间相对较长(3~5 min),旨在提升肌肉最大力量,且伴随肌肉围度的增加(Gonzalez et al., 2015)。然而,一些研究指出,HIRT 不仅有助于提高最大力量,还能引起与 HVRT 类似的肌肉肥大程度(Mangine et al., 2015; Schoenfeld et al., 2014)。由于长期训练适应是急性训练应激反应的累积结果(Fleck et al., 2014),且现阶段不同负荷结构抗阻训练长期适应相关研究的结论尚存在一定的分歧(Campos et al., 2002; Mangine et al., 2015; Schoenfeld et al., 2014),因此,目前应着重关注一次训练使机体产生的急性应激反应。

抗阻训练计划中不同变量的不同组合会以不同方式对肌肉施加压力(Campos et al., 2002)。研究表明,HVRT 中较高的负荷量会导致代谢压力(metabolic stress)显著增加,引起更大的合成代谢激素反应;而 HIRT 中较高的负荷强度则会引起机械压力(mechanical stress)明显增加,在运动过程中需要募集更多的快肌运动单位(American Col-

lege of Sports Medicine, 2009)。在抗阻训练过程中,代谢压力与机械压力共同作用引发神经肌肉疲劳,进而刺激肌肉围度和肌肉力量的增长(Toigo et al., 2006)。然而,目前对比一次性 HVRT 和 HIRT 后机体产生急性反应的研究较为有限,且大多聚焦于训练前后肌肉力量、免疫和内分泌反应等方面的变化(汤静, 2018; Bartolomei et al., 2017; Gonzalez et al., 2015; Wells et al., 2016),缺乏对神经肌肉疲劳特征的研究。神经肌肉疲劳不仅会限制肌纤维的最大发力能力,还会影响其缩短速度和放松时间(Sanchez-Medina et al., 2011),从而限制肌肉适应、训练效果和运动表现,增加运动损伤的概率(Fleck et al., 2014)。

此外,不同负荷结构抗阻训练相关研究存在争议的主要原因之一是在方案设计与肌肥大评估等方法学上存在局限性。例如,Gonzalez 等(2015)采用了训练至力竭的方案,可能导致 HIRT 产生的代谢压力增加和机械压力减小,从而使其与 HVRT 方案缺乏实际的训练刺激差异。此外,力竭训练可能对运动员的心理产生负面影响,进而影响实验结果(Stone et al., 1996)。现有研究常采用纵跳高度评价下肢神经肌肉疲劳程度,但 Harry 等(2018)指出运动员的神经肌肉疲劳可能会引起其跳跃动作模式变化而不影响其跳跃高度,说明纵跳高度并不能有效反映疲劳,而反应力量指数对于反映神经肌肉功能和量化疲劳程度更加敏感。此外,尽管可以采用多种设备评估肌肉肥大的不同指标(如肌肉厚度、肌肉横截面积、肌肉量或肌肉质量),但不同设备的信效度与特异性存在差异(Haun et al., 2019)。相较于用于测量肌肉横截面积的计算机断层扫描(computed tomography, CT)、磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)和肌骨超声,测量肌肉质量的双能 X 射线吸收仪对于评估抗阻训练引起的肌肉肥大程度的敏感性较低(Delmonico et al., 2008; Haun et al., 2019)。虽然 CT 和 MRI 被认为是测量肌肉肥大的“金标准”,但由于价格昂贵、使用场地受限以及辐射影响,难以广泛应用于科研和训练中(Delmonico et al., 2008)。相比之下,肌骨超声对肌肉厚度等肌肉结构指标的评估表现出较高的信效度(Oliveira et al., 2016),且与 CT 和 MRI 相关性很高(Ahtiainen et al., 2010; Reeves et al., 2004)。因此,肌骨超声相对于其他设备更适用于测量抗阻训练中肌肉肥大的相关指标。

综上,本研究旨在比较有丰富抗阻训练经验的男性进行一次 HVRT 和 HIRT 两种不同负荷结构抗阻训练过程中的神经肌肉疲劳特征,以及训练后的急性神经肌肉反应和神经肌肉功能变化。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

本研究共招募15名男性受试者,年龄为 (23.20 ± 1.83) 岁,身高为 (1.72 ± 0.05) m,体重为 (74.07 ± 6.48) kg,体脂率为 $21.17\% \pm 3.27\%$,深蹲1RM为 (143.95 ± 12.39) kg。受试者纳入标准如下:具有2年以上抗阻训练经验;每周至少进行3次规律抗阻训练;深蹲1RM超过自身体重的1.5倍。受试者排除标准如下:曾有下肢手术史或心血管疾病;在研究开始前3个月内出现过影响抗阻训练的损伤。所有受试者在参与本研究前均已了解本研究的目的与流程并签署知情同意书,且被告知在每次实验前一天避免剧烈运动,避免摄入酒精等刺激性饮料或任何可能影响测试结果的药物,保持良好睡眠及正常饮食。

1.2 研究方法

本研究采用随机交叉研究设计,共包括1次实验前测试和2次正式实验,每次实验至少间隔48 h。受试者需要在实验前测试时完成人体测量学指标测量、熟悉实验流程并进行深蹲1RM测试。随后,受试者在第一次和第二次实验时以随机顺序先后完成HVRT和HIRT,在每次抗阻训练时收集每次深蹲动作的平均速度和表面肌电数据以比较不同负荷结构抗阻训练的神经肌肉疲劳特征,并在每次抗阻训练前和训练后依次进行血乳酸测试、反向跳测试、最大等长伸膝测试和肌骨超声测试,以比较不同负荷结构抗阻训练对神经肌肉反应和神经肌肉功能变化的影响(图1)。

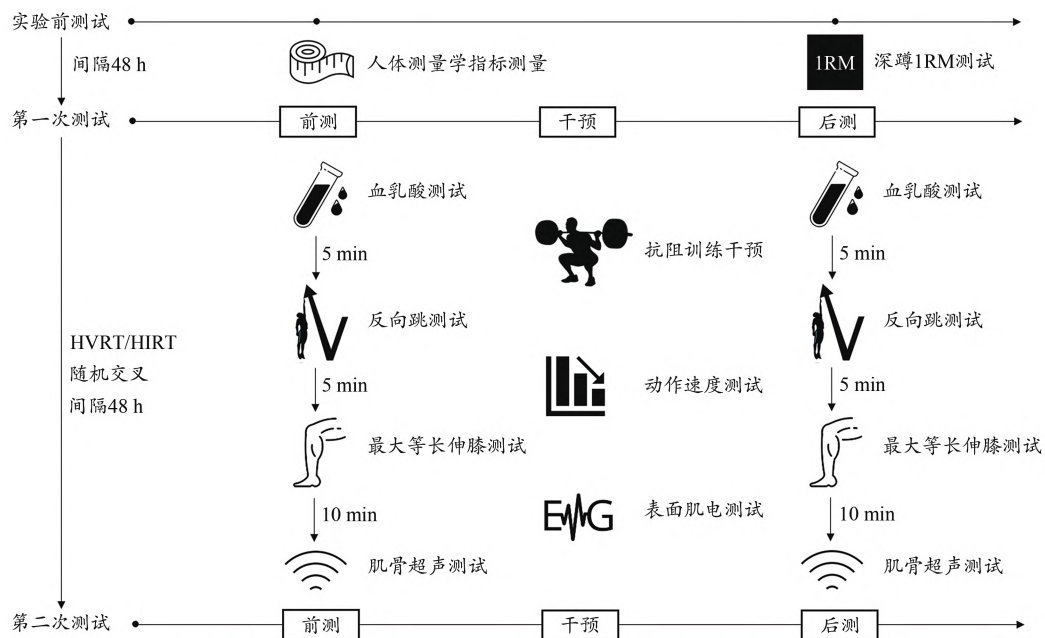


图1 测试流程图

Figure 1. Testing Procedure of Research

1.2.1 抗阻训练

受试者先进行包括慢跑、动态拉伸以及轻重量杠铃深蹲在内的标准化热身,随后进行HVRT和HIRT。为避免不同训练动作对实验结果产生影响,本研究的抗阻训练仅包括深蹲动作。HVRT使用70% 1RM训练6组,每组重复8~12次,组间间歇1 min;HIRT使用90% 1RM训练6组,每组重复3~5次,组间间歇3 min。在深蹲过程中,要求受试者在向心阶段尽可能快地完成动作。整个训练和测试过程由持有美国体能协会体能训练专家认证证书的体能教练员监督,以确保训练动作的规范与受试者的安全。

1.2.2 测试指标与方法

1.2.2.1 深蹲1RM测试

受试者先进行包括慢跑、动态拉伸以及轻重量杠铃深蹲在内的标准化热身,随后进行深蹲1RM测试。第

一次尝试时选用受试者预估85% 1RM完成3次深蹲,随后逐步增加测试负荷并在5次尝试内测出受试者的深蹲3RM,以避免对肌肉产生过大的刺激导致疲劳甚至损伤。测试结束后采用Wathen公式根据受试者的3RM计算其深蹲1RM,并据此计算受试者HVRT与HIRT使用的深蹲重量(Haff et al., 2015)。

1.2.2.2 动作速度测试

在受试者进行HVRT和HIRT时,通过固定在杠铃杆一侧的激光传感器(Flex, 澳大利亚)采集受试者每次深蹲时杠铃的位移速度。数据采集结束后通过Cloud Software软件导出每次深蹲的平均速度,并据此计算第一组动作与最后一组动作平均速度的下降量。

1.2.2.3 表面肌电测试

在受试者进行HVRT和HIRT时,通过无线表面肌电

系统 (Trigno, Delsys, 美国) 以 2 000 Hz 采样频率采集受试者每次深蹲时优势侧股外侧肌的表面肌电信号。在粘贴表面肌电传感器之前需进行备皮, 先使用剃须刀剃除目标肌肉肌腹处表面的体毛, 再使用医用酒精棉片擦拭肌肉表面, 待酒精完全挥发后使用专用双面胶将表面肌电传感器粘贴至目标肌肉肌腹处 (Hermens et al., 2000), 并使用弹性绷带进一步固定以防止松动或掉落。数据采集结束后, 采用 MATLAB 软件使用零滞后四阶递归巴特沃斯滤波器 (截断频率为 10~500 Hz) 对原始肌电信号进行带通滤波处理, 随后对过滤后的肌电信号进行全波整流处理并以 6 Hz 的截断频率进行低通滤波处理 (Besier et al., 2003), 最后通过频域分析计算每次深蹲时优势侧股外侧肌表面肌电信号的平均功率频率, 以反映受试者在抗阻训练中的疲劳程度, 并据此计算第一组动作与最后一组动作平均功率频率的下降量。本研究选取力量评定法判定下肢优势侧与非优势侧, 将膝关节最大收缩过程中屈、伸肌力量高的一侧定义为优势侧, 另一侧则为非优势侧 (张英媛等, 2014)。

1.2.2.4 血乳酸测试

在受试者安静状态下和完成 HVRT 和 HIRT 后即刻分别采集指尖血。测试者手持采血针扎破受试者指尖后, 先用干棉球擦拭掉第一滴血, 再使用毛细管吸取 10 μ L 血液放入装有定量溶解液的反应管中充分摇匀, 用乳酸分析仪 (Biosen C-Line, 德国) 对同一血样进行 2 次分析, 并据此计算训练前后血乳酸浓度的增加量。

1.2.2.5 反向跳测试

使用测力台 (9229A, 瑞士) 进行反向跳测试。受试者进行测试前先站立于测力台上称量体重, 随后双手叉腰目视前方, 在听到开始测试的指令后快速屈髋屈膝下蹲, 随后全力伸展下肢关节垂直向上跳起, 腾空时保持身体稳定, 落地时屈髋屈膝缓冲。测试结束后使用软件 (MARS, 瑞士) 计算反应力量指数。受试者需进行 3 次测试, 次间间歇 2 min, 取 3 次测试中最接近的 2 次结果的平均值, 并据此计算训练前后反应力量指数的下降量。

1.2.2.6 最大等长伸膝测试

使用等速肌力测试系统 (Isomed 2000, 德国) 进行优势侧膝关节伸肌的最大等长收缩测试。测试时要求受试者以屈髋 100° 和屈膝 80° 的姿势 (髋、膝关节完全伸展为 180°) 坐在等速肌力测试仪器上, 使用束缚带固定受试者躯干和非优势侧下肢以避免代偿, 随后要求受试者以最大程度用力持续伸膝 10 s, 在测试过程中持续给予口头鼓励。受试者需进行 2 次测试, 次间间歇 2 min (Dirnberger et al., 2012)。测试结束后计算每次测试的最大等长伸膝力矩, 取 2 次结果平均值, 并据此计算训练前后最大等长伸膝力矩的下降量。

1.2.2.7 肌骨超声测试

使用肌骨超声诊断仪 (LOGIQ E, 美国) 进行肌骨超

声测试。测试位点位于受试者优势侧股骨大转子与髌骨外缘连线中点处的股外侧肌肌腹 (Scanlon et al., 2014)。第一次测试时, 使用不可擦除的皮肤记号笔标记测试位点以保证后续测试的一致性。测试时受试者需侧卧于按摩床上并微屈髋关节和膝关节以放松腿部肌肉, 测试者将探头垂直于受试者皮肤表面, 在测试位点并沿股骨大转子与髌骨外缘连线的垂线方向进行图像扫描, 最后使用图像处理软件 Image J 计算肌肉厚度和横截面积, 取 3 次测试中最接近的 2 次结果的平均值, 并据此计算训练前后肌肉厚度和横截面积的增加量。

1.3 统计分析

使用 SPSS 26.0 进行统计学分析, 所有数据均使用平均值 \pm 标准差 ($M \pm SD$) 表示。使用 Shapiro-Wilk 检验和 Levene's 检验对数据进行正态分布和方差齐性检验。若数据符合正态分布则使用配对样本 t 检验进行差异检验, 若不符合正态分布则使用 Wilcoxon 符号秩检验进行检验。显著性水平定为 $P < 0.05$ 。

2 研究结果

HVRT 与 HIRT 的神经肌肉疲劳、功能变化及急性反应等指标的测试结果如表 1 所示。Shapiro-Wilk 检验结果显示, 平均速度下降量 (HVRT: $W=0.963$, $P=0.768$; HIRT: $W=0.937$, $P=0.377$)、股外侧肌平均功率频率下降量 (HVRT: $W=0.930$, $P=0.270$; HIRT: $W=0.944$, $P=0.432$)、反应力量指数下降量 (HVRT: $W=0.920$, $P=0.192$; HIRT: $W=0.942$, $P=0.408$)、最大等长伸膝力矩下降量 (HVRT: $W=0.947$, $P=0.473$; HIRT: $W=0.893$, $P=0.074$)、血乳酸浓度增加量 (HVRT: $W=0.953$, $P=0.567$; HIRT: $W=0.940$, $P=0.378$)、股外侧肌肌肉厚度增加量 (HVRT: $W=0.950$, $P=0.528$; HIRT: $W=0.908$, $P=0.127$) 和股外侧肌横截面积增加量 (HVRT: $W=0.902$, $P=0.103$; HIRT: $W=0.955$, $P=0.605$) 均符合正态分布 ($P > 0.05$)。

2.1 神经肌肉疲劳特征

在平均速度下降量方面, HVRT 为 $(0.10 \pm 0.06) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, HIRT 为 $(0.03 \pm 0.04) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, HVRT 高于 HIRT (图 2), 且两者之间具有统计学差异 ($t=3.319$, $P=0.005$, $d=-1.373$)。

在股外侧肌平均功率频率下降量方面, HVRT 为 $(6.28 \pm 11.33) \text{ Hz}$, HIRT 为 $(0.08 \pm 6.78) \text{ Hz}$, HVRT 大于 HIRT (图 2), 且两者之间具有统计学差异 ($t=2.408$, $P=0.030$, $d=-0.664$)。

2.2 神经肌肉功能变化

在训练前后的反应力量指数下降量方面, HVRT 为 $(0.12 \pm 0.05) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, HIRT 为 $(0.08 \pm 0.04) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, HVRT 大于 HIRT (图 3), 且两者之间具有统计学差异 ($t=2.443$, $P=0.028$, $d=-0.875$)。

在训练前后的最大等长伸膝力矩下降量方面, HVRT 为 $(62.83 \pm 44.89) \text{ N} \cdot \text{m}$, HIRT 为 $(40.43 \pm 49.18) \text{ N} \cdot \text{m}$, HVRT 大于 HIRT (图 3), 但两者之间不具有统计学差异 ($t=1.563$, $P=0.140$, $d=-0.476$)。

表1 HVRT与HIRT的神经肌肉疲劳、功能变化及急性反应的差异

Table 1 Differences between HVRT and HIRT in Neuromuscular Fatigue, Functional Changes and Acute Responses

指标	HVRT		HIRT		<i>t</i>	<i>P</i>	<i>d</i>
	前测	后测	前测	后测			
平均速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.50 ± 0.05	0.41 ± 0.05	0.37 ± 0.07	0.34 ± 0.06	3.319	0.005	-1.373
股外侧肌平均功率频率/Hz	100.48 ± 14.67	94.20 ± 13.29	100.98 ± 17.23	101.06 ± 16.27	2.408	0.030	-0.664
反应力量指数/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.55 ± 0.06	0.43 ± 0.06	0.55 ± 0.06	0.48 ± 0.08	2.443	0.028	-0.875
最大等长伸膝力矩/($\text{N}\cdot\text{m}$)	342.20 ± 68.53	279.37 ± 69.93	332.93 ± 59.01	292.50 ± 59.45	1.563	0.140	-0.476
血乳酸浓度/($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	1.68 ± 0.51	12.49 ± 2.80	1.73 ± 0.51	7.17 ± 2.40	7.176	<0.001	-2.183
股外侧肌肌肉厚度/mm	19.93 ± 3.55	22.03 ± 3.40	19.44 ± 3.73	20.43 ± 3.80	2.489	0.026	-0.643
股外侧肌横截面积/ cm^2	31.83 ± 4.17	34.10 ± 4.84	31.50 ± 4.28	32.87 ± 4.76	2.679	0.018	-0.695

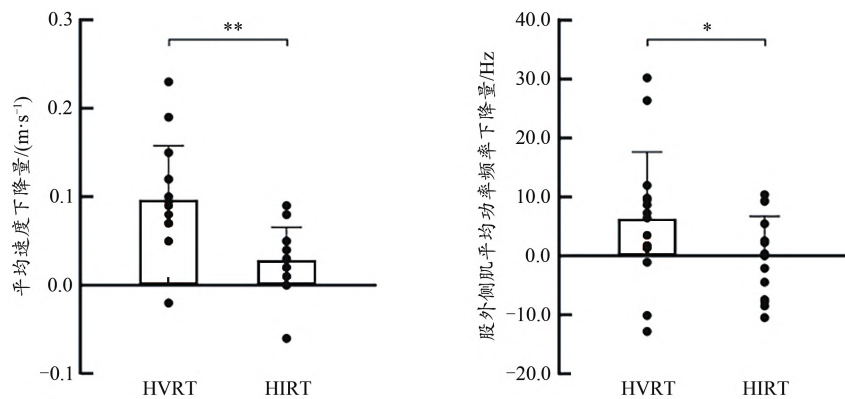


图2 HVRT与HIRT中神经肌肉疲劳特征

Figure 2. Comparisons of Neuromuscular Fatigue Characteristics between HVRT and HIRT

注:** $P<0.01$, * $P<0.05$,下同。

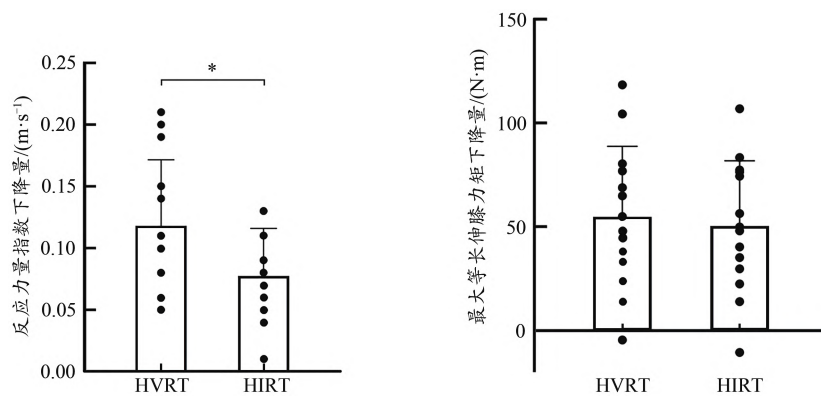


图3 HVRT与HIRT前后神经肌肉功能变化

Figure 3. Comparisons of Neuromuscular Function Changes between HVRT and HIRT

2.3 急性神经肌肉反应

在训练前后的血乳酸浓度增加量方面, HVRT为(10.81 ± 2.61) $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, HIRT为(5.55 ± 2.19) $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, HVRT大于HIRT(图4),且两者之间具有统计学差异($t=7.176$, $P<0.001$, $d=-2.183$)。

在训练前后的股外侧肌肌肉厚度增加量方面, HVRT为(2.10 ± 1.75) mm, HIRT为(0.99 ± 1.68) mm, HVRT大于HIRT(图4),且两者之间具有统计学差异($t=2.489$, $P=0.026$, $d=-0.643$)。

在训练前后的股外侧肌肌肉横截面积增加量方面, HVRT为(2.27 ± 1.51) cm^2 , HIRT为(1.37 ± 1.05) cm^2 , HVRT高于HIRT(图4),且两者之间具有统计学差异($t=2.679$, $P=0.018$, $d=-0.695$)。

3 讨论与分析

3.1 HVRT与HIRT的神经肌肉疲劳特征及功能变化

本研究发现, HVRT中从第一组到最后一组动作的平均速度下降量显著大于HIRT,表明HVRT的神经肌肉疲

劳更加明显,这与前人的研究结果一致(Sanchez-Medina et al., 2011)。现有的抗阻训练诱导神经肌肉疲劳研究大多采用单关节等长或等速收缩模型测量力矩变化,这些疲劳模型及测量指标与真实训练环境存在较大差异,因此生态效度较低(路恒等, 2020; Place et al., 2010)。考

虑到疲劳是一个持续发生的过程,采用平均速度评价神经肌肉疲劳较瞬时指标更加全面且准确(Cairns et al., 2005)。基于此,本研究中深蹲动作的平均速度下降可作为神经肌肉疲劳的有效证据,为疲劳程度的量化提供一个相对简单却客观的评价方式。

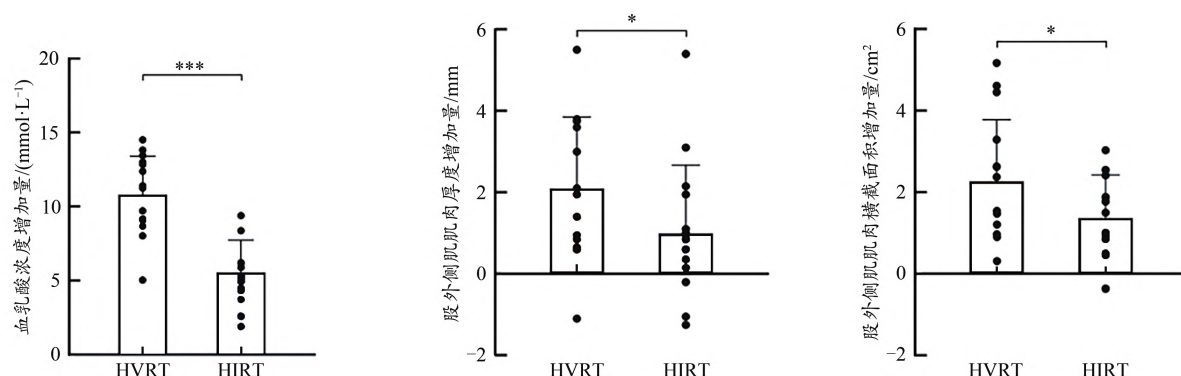


图4 HVRT与HIRT前后急性神经肌肉反应

Figure 4. Comparisons of Acute Neuromuscular Responses between HVRT and HIRT

注:*** $P < 0.001$ 。

本研究还发现,HVRT中从第一组到最后一组动作的股外侧肌平均功率频率下降量显著大于HIRT。这与Gonzalez等(2015)的研究结果不一致,该研究通过时域分析表明HVRT与HIRT中股外侧肌的激活程度相似,但该研究采用了训练至力竭的方案且未分析频域指标的变化。在使用较低负荷强度进行抗阻训练至力竭时也可能导致更大程度的肌肉激活,从而减少HVRT与HIRT在负荷量和强度上的差异(Barcelos et al., 2015)。平均功率频率是常用的表面肌电频域分析指标,能够反映特定肌肉的疲劳程度(Jurell, 1998)。人体进行抗阻训练时平均功率频率下降量越大,说明其募集到的高阈值运动单位越少,也就无法对肌肉持续施加高水平的机械压力(Henneman et al., 1965)。本研究中HVRT的平均功率频率下降量显著大于HIRT,表明受试者在HVRT中无法像HIRT中那样维持对高阈值运动单位的募集(Wang et al., 2015),进一步佐证HVRT引发的神经肌肉疲劳程度显著大于HIRT。

除此之外,HVRT后的神经肌肉功能也显著下降。虽然HVRT和HIRT后的最大等长伸膝力矩变化量不存在组间差异,但HVRT后反向跳反应力量指数的下降幅度显著大于HIRT。与本研究不同的是,Bartolomei等(2017)报道HVRT后下肢等长和动态最大力量以及反向跳功率输出下降幅度均显著大于HIRT,但其随后的研究表明HVRT后上肢等长最大力量的下降幅度与HIRT之间并不存在显著性差异(Bartolomei et al., 2021)。这可能与不同研究中招募的受试者类型以及所使用的抗阻训练模型和测试方法不同有关,等长力量测试对神经肌肉疲劳的敏感性

低于动态力量测试可能也是造成以上差异的原因(路恒等, 2022)。

本研究的结果表明,与HIRT相比,HVRT导致机体产生了更大的外周疲劳,运动表现的下降更明显。Bartolomei等(2017)也指出HVRT后机体恢复情况较HIRT更慢,该研究在HVRT后观察到白介素-6显著升高,这可能与运动引起的代谢压力有关。HVRT可能通过提高重复次数来增加机械压力,以补偿其较低的负荷强度。这表明2种负荷结构抗阻训练的机械压力可能是相似的,但HVRT的代谢压力更大(Bartolomei et al., 2017)。根据运动单位募集的原则,当运动负荷较低时,机体优先募集低阈值运动单位,随着负荷增加,机体逐渐募集高阈值运动单位(Henneman et al., 1965)。然而,当肌肉产生较大程度的疲劳时,需要强制激活更高阈值和/或更多的运动单位以满足运动的需求(Dankel et al., 2017)。以上研究表明,HVRT可以刺激更多的肌纤维,造成更大的代谢反应和肌肉组织损伤,进而更有效地发展肌肉力量和肌肉围度。

3.2 HVRT与HIRT的急性神经肌肉反应

本研究发现,HVRT后股外侧肌厚度和横截面积等肌肉结构指标的增加幅度显著大于HIRT。类似地,Bartolomei等(2017, 2021)曾报道使用深蹲和卧推动作完成HVRT后肌肉横截面积的增加幅度显著大于HIRT,且在运动后的72 h内持续高于运动前。抗阻训练后肌肉结构指标的变化表明肌肉出现肿胀,而HVRT后更为明显的肌肉肿胀可能与该种类型负荷结构所导致的代谢压力较大有关(Shoemaker et al., 1999),进一步导致机体产生更大程度的血管舒张、反应性充血以及免疫反应(Wunsch et al., 2000),

直接刺激肌肉横截面积发生变化(Bartolomei et al., 2017, 2021)。与本研究不同的是, Campos等(2002)曾报道无训练经历男性完成HVRT与HIRT后的肌肉肿胀程度并无显著差异,这可能是由于无训练经历的受试者对任何抗阻训练的刺激都较为敏感(Gonzalez et al., 2015)。

本研究还观察到HVRT后血乳酸浓度的升高幅度显著大于HIRT,这与前人的研究结果一致(Bartolomei et al., 2017; Gonzalez et al., 2015; Wells et al., 2016),提示HVRT会诱发更大的代谢压力,而肌肉内代谢压力的增加可能会强烈刺激蛋白质的合成,并且伴随肌肉肥大。与HIRT相比,HVRT的工作时间较长而间歇时间较短,更大的代谢压力导致HVRT更依赖糖酵解系统供能,从而引起代谢物的大量累积(Schoenfeld, 2010, 2013)。糖酵解产生的酸性环境可能会进一步降解肌肉蛋白酶,刺激交感神经系统,促进激素分泌以及肌肉蛋白质合成,从而介导更大的肌肥大反应(Schoenfeld, 2010)。这说明,在优化肌肉肥大方面,高负荷量训练方案比高强度训练方案更加有效。此外,HVRT较高的重复次数不仅能在更大程度上提高急性合成代谢激素的生成,促进肌肉组织的重塑,还会增加肌肉拉长的时间,理论上会提高肌肉的抗疲劳能力,并且有利于慢肌纤维的肥大(Schoenfeld, 2010)。鉴于抗阻训练更多地刺激的是快肌纤维,慢肌纤维可能有更大的增长潜力(Folland et al., 2007; Schoenfeld et al., 2015)。因此,相较于HIRT,HVRT更大的运动量和更短的间歇时间可能更有利于促进肌肉肥大。

4 结论

研究表明,HVRT引起的神经肌肉疲劳程度、刺激后的急性神经肌肉反应和神经肌肉功能变化均显著大于HIRT。因此,HVRT可能对肌肉产生更大的刺激,引起机体产生更大的外周疲劳,以此促进肌肉产生适应性变化。同时,HVRT后肌肉产生更明显的肿胀也可能说明其对于发展肌肉围度更加有效。另外,与有创的血乳酸测试相比,肌肉厚度和横截面积等肌骨超声测试指标同样可以检测出不同负荷结构抗阻训练的急性神经肌肉反应差异。因此,建议教练员和科研人员采用肌肉厚度和横截面积指标来监控运动员抗阻训练后的急性神经肌肉反应和功能变化。

本研究也存在一些局限性:1)除了负荷量和负荷强度是影响抗阻训练效果的主要因素,训练动作和速度等变量也可能对神经肌肉反应和功能产生影响,但本研究仅针对深蹲这一动作进行研究,也未控制动作速度。2)本研究仅监测了股外侧肌的表面肌电情况,未监测参与运动的其他肌肉。但是已有研究表明,深蹲训练中负荷强度(%1RM)的增加与髋关节和踝关节的贡献度提高有关(Bryanton et al., 2012)。3)在训练实践中应用本研

究的结果时应考虑高水平运动员与其他类型的受试者在训练经历和力量水平上存在的个体差异。

参考文献:

- 路恒, 许贻林, 王然, 2020. 影响等长大腿中部拉测试信效度的方法学因素综述[J]. 体育与科学, 41(6): 75-87.
- 路恒, 许贻林, 王然, 2022. 等长大腿中部拉测试在下肢肌肉力量诊断中的应用[J]. 成都体育学院学报, 48(1): 129-142.
- 汤静, 2018. 高强度力量训练对青年男性淋巴细胞凋亡的影响及其机制研究[J]. 山东体育学院学报, 34(6): 91-98.
- 王贝, 2013. 抗阻训练方案研究进展: 科学研究优化训练方案[J]. 北京体育大学学报, 36(8): 45-54.
- 张英媛, 王国栋, 陆阿明, 2014. 下肢优势侧评定方法的比较研究[J]. 北京体育大学学报, 37(10): 83-88.
- AHTIAINEN J P, HOFFREN M, HULMI J J, et al., 2010. Panoramic ultrasonography is a valid method to measure changes in skeletal muscle cross-sectional area[J]. Eur J Appl Physiol, 108(2): 273-279.
- AMERICAN COLLEGE OF SPORTS MEDICINE, 2009. American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults[J]. Med Sci Sports Exerc, 41(3): 687-708.
- BARCELOS L C, NUNES P R P, DE SOUZA L R M F, et al., 2015. Low-load resistance training promotes muscular adaptation regardless of vascular occlusion, load, or volume[J]. Eur J Appl Physiol, 115(7): 1559-1568.
- BARTOLOMEI S, NIGRO F, LANZONI I M, et al., 2021. Acute effects of a high volume vs. high intensity bench press protocol on electromechanical delay and muscle morphology in recreationally trained women[J]. Int J Environ Res Public Health, 18(9): 4874.
- BARTOLOMEI S, SADRES E, CHURCH D D, et al., 2017. Comparison of the recovery response from high-intensity and high-volume resistance exercise in trained men[J]. Eur J Appl Physiol, 117(7): 1287-1298.
- BESIER T F, LLOYD D G, ACKLAND T R, 2003. Muscle activation strategies at the knee during running and cutting maneuvers[J]. Med Sci Sports Exerc, 35(1): 119-127.
- BRYANTON M A, KENNEDY M D, CAREY J P, et al., 2012. Effect of squat depth and barbell load on relative muscular effort in squatting[J]. J Strength Cond Res, 26(10): 2820-2828.
- CAIRNS S P, KNICKER A J, THOMPSON M W, et al., 2005. Evaluation of models used to study neuromuscular fatigue[J]. Exerc Sport Sci Rev, 33(1): 9-16.
- CAMPOS G, LUECKE T, WENDELN H, et al., 2002. Muscular adaptations in response to three different resistance-training regimens: Specificity of repetition maximum training zones[J]. Eur J Appl Physiol, 88(1-2): 50-60.
- CHESTNUT J L, DOCHERTY D, 1999. The effects of 4 and 10 repetition maximum weight-training protocols on neuromuscular adaptations in untrained men[J]. J Strength Cond Res, 13(4): 353-359.
- DANKEL S J, JESSEE M B, MATTOCKS K T, et al., 2017. Training to fatigue: The answer for standardization when assessing muscle hypertrophy?[J]. Sports Med, 47(6): 1021-1027.
- DELMONICO M J, KOSTEK M C, JOHNS J, et al., 2008. Can dual energy X-ray absorptiometry provide a valid assessment of chang-

- es in thigh muscle mass with strength training in older adults? [J]. *Eur J Clin Nutr*, 62(12): 1372-1378.
- DIRNBERGER J, WIESINGER H P, KÖSTERS A, et al., 2012. Reproducibility for isometric and isokinetic maximum knee flexion and extension measurements using the IsoMed 2000-dynamometer [J]. *Isokinet Exerc Sci*, 20(3): 149-153.
- FLECK S J, KRAEMER W, 2014. *Designing Resistance Training Programs* [M]. Champaign, IL: Human Kinetics Publishers: 63-150.
- FOLLAND J P, WILLIAMS A G, 2007. The adaptations to strength training: Morphological and neurological contributions to increased strength [J]. *Sports Med*, 37(2): 145-168.
- GONZALEZ A M, HOFFMAN J R, TOWNSEND J R, et al., 2015. Intramuscular anabolic signaling and endocrine response following high volume and high intensity resistance exercise protocols in trained men [J/OL]. *Physiol Rep*, 3(7): e12466 [2023-10-29]. <https://doi.org/10.14814/phy2.12466>.
- HAFF G G, TRIPLETT N T, 2015. *Essentials of Strength Training and Conditioning 4th Edition* [M]. Champaign, IL: Human Kinetics Publishers: 439-470.
- HARRY J R, PAQUETTE M R, SCHILLING B K, et al., 2018. Kinetic and electromyographic subphase characteristics with relation to countermovement vertical jump performance [J]. *J Appl Biomech*, 34(4): 291-297.
- HAUN C T, VANN C G, ROBERTS B M, et al., 2019. A critical evaluation of the biological construct skeletal muscle hypertrophy: Size matters but so does the measurement [J/OL]. *Front Physiol*, 10: 247 [2023-10-29]. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00247>.
- HENNEMAN E, SOMJEN G, CARPENTER D O, 1965. Functional significance of cell size in spinal motoneurons [J]. *J Neurophysiol*, 28(3): 560-580.
- HERMENS H J, FRERIKS B, DISSELHORST-KLUG C, et al., 2000. Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 10(5): 361-374.
- JURELL K C, 1998. Surface EMG and fatigue [J]. *Phys Med Reh Clin N*, 9(4): 933-947.
- MANGINE G T, HOFFMAN J R, GONZALEZ A M, et al., 2015. The effect of training volume and intensity on improvements in muscular strength and size in resistance-trained men [J/OL]. *Physiol Rep*, 3(8): e12472 [2023-10-29]. <https://doi.org/10.14814/phy2.12472>.
- MAUGHAN R J, WATSON J S, WEIR J, 1983. Strength and cross-sectional area of human skeletal muscle [J]. *J Physiol*, 338(1): 37-49.
- OLIVEIRA V B, CARNEIRO S P, OLIVEIRA L F, et al., 2016. Reliability of biceps femoris and semitendinosus muscle architecture measurements obtained with ultrasonography [J]. *Res Biomed Eng*, 32(4): 365-371.
- PLACE N, YAMADA T, BRUTON J D, et al., 2010. Muscle fatigue: From observations in humans to underlying mechanisms studied in intact single muscle fibres [J]. *Eur J Appl Physiol*, 110: 1-15.
- REEVES N D, MAGANARIS C N, NARICI M V, 2004. Ultrasonographic assessment of human skeletal muscle size [J]. *Eur J Appl Physiol*, 91(1): 116-118.
- SANCHEZ-MEDINA L, GONZÁLEZ-BADILLO J J, 2011. Velocity loss as an indicator of neuromuscular fatigue during resistance training [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 43(9): 1725-1734.
- SCANLON T C, FRAGALA M S, STOUT J R, et al., 2014. Muscle architecture and strength: Adaptations to short-term resistance training in older adults [J]. *Muscle Nerve*, 49(4): 584-592.
- SCHOENFELD B J, 2010. The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training [J]. *J Strength Cond Res*, 24(10): 2857-2872.
- SCHOENFELD B J, 2013. Postexercise hypertrophic adaptations: A reexamination of the hormone hypothesis and its applicability to resistance training program design [J]. *J Strength Cond Res*, 27(6): 1720-1730.
- SCHOENFELD B J, PETERSON M D, OGBORN D, et al., 2015. Effects of low- vs. high-load resistance training on muscle strength and hypertrophy in well-trained men [J]. *J Strength Cond Res*, 29(10): 2954-2963.
- SCHOENFELD B J, RATAMESS N A, PETERSON M D, et al., 2014. Effects of different volume-equated resistance training loading strategies on muscular adaptations in well-trained men [J]. *J Strength Cond Res*, 28(10): 2909-2918.
- SHOEMAKER J K, HUGHSON R L, 1999. Adaptation of blood flow during the rest to work transition in humans [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 31(7): 1019-1026.
- STONE M H, CHANDLER T J, CONLEY M S, et al., 1996. Training to muscular failure: Is it necessary? [J]. *Strength Cond J*, 18(3): 44-48.
- SUCHOMEL T J, NIMPHIUS S, STONE M H, 2016. The importance of muscular strength in athletic performance [J]. *Sports Med*, 46(10): 1419-1449.
- TAN B, 1999. Manipulating resistance training program variables to optimize maximum strength in men: A review [J]. *J Strength Cond Res*, 13(3): 289-304.
- TOIGO M, BOUTELLIER U, 2006. New fundamental resistance exercise determinants of molecular and cellular muscle adaptations [J]. *Eur J Appl Physiol*, 97(6): 643-663.
- WANG R, FUKUDA D H, STOUT J R, et al., 2015. Evaluation of electromyographic frequency domain changes during a three-minute maximal effort cycling test [J]. *J Sports Sci Med*, 14(2): 452-458.
- WELLS A J, HOFFMAN J R, JAJTNER A R, et al., 2016. Monocyte recruitment after high-intensity and high-volume resistance exercise [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 48(6): 1169-1178.
- WUNSCH S A, MULLER-DELP J, DELP M D, 2000. Time course of vasodilatory responses in skeletal muscle arterioles: Role in hyperemia at onset of exercise [J]. *Am J Physiol-Heart Circulat Physiol*, 279(4): H1715-H1723.

(收稿日期: 2023-11-10; 修订日期: 2024-02-10; 编辑: 金乃婧)