

基于速度的力量训练中不同速度损失阈值的疲劳恢复研究

米亚舒 王奕坤

中北大学体育学院, 山西 太原 030051

[摘要]目的: 本研究旨在比较三种不同速度损失阈值 (VLT: 10%、20%、30%) 下的深蹲训练对机体疲劳恢复特征的差异效应, 为教练员制定科学训练计划提供理论依据。方法: 招募 15 名健康男性大学生受试者, 采用自身交叉对照试验设计。每名受试者依次完成三种 VLT 的深蹲训练。分别在训练前 (基线)、训练后即刻、6h、12h、24h 及 48h 采集以下指标: 心率变异性 (HRV (RMSSD 值))、血乳酸浓度、反向跳跃高度 (CMJ)、下肢主要肌群表面肌电信号 (sEMG (MF 值)) 以及主观感知恢复程度量表得分。结果: 双因素 (VLT 水平、时间点) 重复测量方差分析显示: VLT 主效应: 对血乳酸浓度、CMJ 跳跃高度、sEMG 中位频率 (MF) 及主观恢复程度均存在极显著影响 ($P<0.001$); 对 HRV (RMSSD) 有显著影响 ($P<0.05$)。时间主效应: 对 HRV (RMSSD)、血乳酸浓度、CMJ 跳跃高度、sEMG 中位频率 (MF) 及主观恢复程度均存在极显著影响 ($P<0.001$)。交互效应: VLT 水平与时间点对血乳酸浓度、CMJ 跳跃高度、sEMG 中位频率 (MF) 及主观恢复程度的交互作用极显著 ($P<0.001$); 对 HRV (RMSSD) 的交互作用显著 ($P<0.05$)。与训练前基线值 (T0) 相比, 三种 VLT 训练后即刻 (T1), 所有监测指标均发生显著变化 ($P<0.05$)。恢复时间特征: 10%VLT: 训练后 24h, 各项指标基本恢复至运动前水平; 20%VLT: 训练后 48h, 各项指标恢复至运动前水平。30%VLT: 训练后 48h, 各项指标恢复至运动前水平。结论: 在以深蹲为训练动作的速度基础力量训练中, 提高速度损失阈值 (VLT) 会加剧机体疲劳程度, 并显著延长所需恢复时间。VLT 可作为量化评估训练所致疲劳及其恢复动态的有效指标。

[关键词]基于速度的力量训练; 速度损失阈值; 深蹲训练; 疲劳; 恢复

DOI: 10.33142/jscs.v5i5.17655

中图分类号: G84

文献标识码: A

Research on Fatigue Recovery with Different Speed Loss Thresholds in Speed based Strength Training

MI Yashu, WANG Yikun

College of Physical Education, North University of China, Taiyuan, Shanxi, 030051, China

Abstract: Objective: this study aims to compare the differential effects of squat training under three different speed loss thresholds (VLT: 10%, 20%, 30%) on the fatigue recovery characteristics of the body, and provide theoretical basis for coaches to develop scientific training plans. Method: recruit 15 healthy male college students and use a self crossover controlled trial design. Each participant completed three types of VLT squat training in sequence. Collect the following indicators before training (baseline), immediately after training, at 6 hours, 12 hours, 24 hours, and 48 hours: heart rate variability (HRV (RMSSD value)), blood lactate concentration, reverse jump height (CMJ), surface electromyographic signals of major muscle groups in the lower limbs (sEMG (MF value)), and subjective perceived recovery score scale. Result: two factors (VLT level, time point) repeated measures ANOVA showed that VLT had a significant effect on blood lactate concentration, CMJ jump height, sEMG median frequency (MF), and subjective recovery degree ($P<0.001$); It has a significant impact on HRV (RMSSD) ($P<0.05$). Time main effect: There was a highly significant impact on HRV (RMSSD), blood lactate concentration, CMJ jump height, sEMG median frequency (MF), and subjective recovery degree ($P<0.001$). Interaction effect: the interaction between VLT level and time point on blood lactate concentration, CMJ jump height, sEMG median frequency (MF), and subjective recovery degree was extremely significant ($P<0.001$); The interaction effect on HRV (RMSSD) was significant ($P<0.05$). Compared with the baseline value before training (T0), all monitoring indicators showed significant changes ($P<0.05$) immediately after training (T1) for the three VLTs. Recovery time characteristics: 10% VLT: 24 hours after training, all indicators have basically recovered to pre exercise levels; 20% VLT: 48 hours after training, all indicators return to pre exercise levels. 30% VLT: 48 hours after training, all indicators return to pre exercise levels. Conclusion: in speed based strength training with squats as the training action, increasing the velocity loss threshold (VLT) can exacerbate body fatigue and significantly prolong the required recovery time. VLT can serve as an effective indicator for quantitatively evaluating fatigue caused by training and its recovery dynamics.

Keywords: speed based strength training; speed loss threshold; squat training; fatigue; recover

引言

基于速度的力量训练 (Velocity Based Training, VBT)

是当今国际体能领域的研究热点, 其已成为数字化体能训练体系的核心构成要素^[1]。VBT 依托动作速度与最大力量

百分比（%1RM）、重复次数及疲劳状态间的强相关性，通过对训练负荷进行科学设计、实时监控及动态调整，形成了一种革新性的力量训练方法^[2-3]。

机体疲劳在运动中被视为维持人体动态平衡的重要手段。适度的疲劳状态能有效推动运动员身体机能持续发展，但过度疲劳，则显著提升运动损伤的发生风险。在体能活动中，人体消耗的能源必须经过充分恢复期，方能达成身体功能水平的实质性提升。因此，精确监测训练后疲劳状态及其恢复动态，并据此科学配置训练负荷，是实现最佳训练成效的核心要素。

基于速度的力量训练（VBT）通过利用动作速度的量化关联及其速度损失阈值（VLT）与传统负荷参数（如%1RM）和重复次数的紧密联系，能够在实际训练中以实时速度指标替代常规负荷设定方式^{[2][4]}。现有文献大多聚焦于 VLT 对训练适应的作用，但较少探讨不同 VLT 所诱发的疲劳深度差异及其恢复时间特征。因此，本研究首要任务是比较不同 VLT 干预导致的机体疲劳程度；其次，监控深蹲训练后各时间段的指标变化，识别最优 VLT 水平，为教练员提供科学依据，使其在训练中合理运用 VBT 技术，优化训练与休息周期的协调性。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

本研究以“不同速度损失阈值（VLT）深蹲训练对机体疲劳恢复特征的影响”为研究对象。实验招募 15 名 18 至 22 周岁的健康男性大学生受试者，纳入标准为：（1）不吸烟、不喝酒；（2）自愿签署知情同意书，且群体基线数据经统计检验无显著差异。

表 1 实验对象一般资料

测量指标	受试者（n=15）
年龄（岁）	20±2
身高（cm）	177±5
体重（kg）	76.3±7.1
深蹲 1RM（kg）	103±19
训练年限（年）	3±1

1.2 研究方法

1.2.1 实验法

在正式实验启动前，受试者需参与两次熟悉训练课。第一次由研究人员详细讲解并指导深蹲动作要领及测试流程，严格遵循 NSCA 制定的规范。随后依据表 2 进行 10min 功能性热身活动，完成后立即执行最大重复次数（1RM）评估测试。第二次熟悉训练课，受试者先在实验室内静坐休息 5min，用于测定心率变异性（HRV）。然后依次测量其他指标，包括血乳酸浓度、反向纵跳（CMJ）表现、表面肌电信号以及主观恢复感知量表得分。72h 后，方进入正式实验阶段。

正式实验由三个阶段构成：准备阶段（热身）、运动干预阶段（实施三种不同速度损失阈值的深蹲训练）以及恢复阶段（于特定时间点采集数据）。受试者抵达实验室后，首先进行 10%VLT 深蹲训练干预。此后间隔一周，受试者返回实验室完成 20%VLT 训练干预干预。再间隔一周后，进行最后一次 30%VLT 干预实验。

表 2 功能性热身计划

动作	重复次数及时间
跳绳	5min
自重深蹲	10 次
原地高抬腿	30s
熊爬	10m
行进抱膝	10m
摇篮抱腿	10m
单腿直腿硬拉	每侧 5 次

本实验采用严格标准化的训练参数控制：所有受试者均以 75%最大重复负荷（1RM）为恒定负重，完成标准深蹲动作；组间休息时长统一设定为 90s，每组训练总量固定为 4 组。重复次数依据实时速度动态调控，共设计三种基于速度损失阈值的训练干预方案（10%、20%及 30%VLT）。参与者被要求在维持技术动作规范性的前提下，以最大爆发速度完成每次动作。实验全程安排研究人员提供口头激励。测试时点覆盖干预前基线状态及干预后即刻、6h、12h、24h、48h 共六个，每次实验间隔期为 7d 见图 1 示。

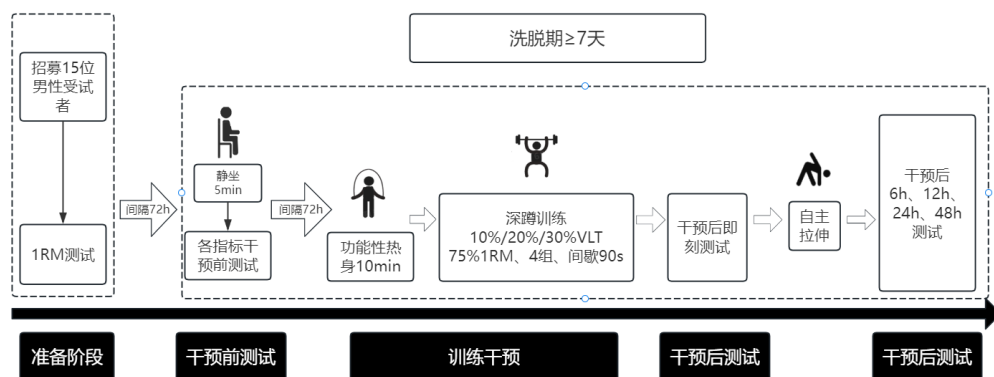


图 1 实验流程图

1.2.2 数理统计法

本研究采用重复测量双因素方差分析 (Two-way repeated measures ANOVA, 自变量为时间与速度损失阈值) 处理受试者在六个恢复时点采集的数据。执行 Mauchly 球形度假设验证, 若检验显著性 P 值超过 0.05, 表明数据满足 Huynh-Feldt 条件, 可直接采纳一元方差分析结论; 反之, 当 $P \leq 0.05$ 时则拒绝球形假设, 需通过 Greenhouse-Geisser 系数校正自由度, 并以多元方差分析输出作为最终推断依据。进一步分析中, 若时间与速度损失阈值的交互效应显著, 则采用 Bonferroni 进行多重比较检验。所有统计显著性阈值均设定为 0.05。

2 结果

2.1 不同速度损失阈值的深蹲训练前后心率变异性 RMSSD 值的变化

表 3 不同速度损失阈值的深蹲训练前后 RMSSD 值的变化

时间	10%VLT	20%VLT	30%VLT
T0	53.68 $\pm$ 12.57	57.71 $\pm$ 8.25	51.17 $\pm$ 14.95
T1	32.89 $\pm$ 18.26 [▲]	26.24 $\pm$ 12.49 [*]	16.42 $\pm$ 9.03 ^{*#}
T2	45.54 $\pm$ 16.20 [▲]	38.46 $\pm$ 18.22 [*]	20.37 $\pm$ 6.17 ^{*#}
T3	46.69 $\pm$ 10.09 [▲]	39.79 $\pm$ 11.85 [*]	33.31 $\pm$ 6.63 ^{*#}
T4	53.24 $\pm$ 10.49	57.93 $\pm$ 11.37	47.10 $\pm$ 20.11
T5	57.15 $\pm$ 10.22	58.78 $\pm$ 11.84	52.61 $\pm$ 17.53
F 速度损失阈值, P 速度损失阈值	5.49, <0.05		
F 时间, P 时间	82.22, <0.001		
F 交互, P 交互	3.746, <0.05		

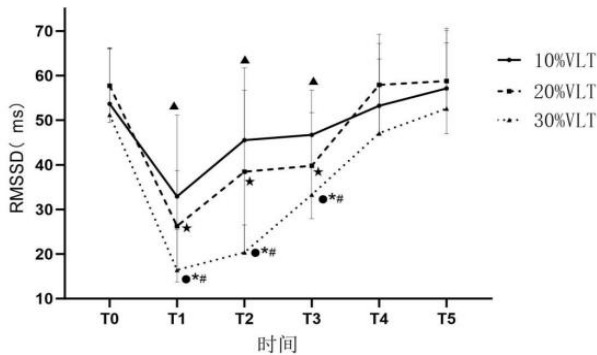


图 2 不同速度损失阈值的深蹲训练前后 RMSSD 值的变化趋势

本研究采用双因素 (时间 $\times$ 速度损失阈值) 重复测量方差分析, 评估不同 VLT 深蹲训练前后受试者心率变异性指标 RMSSD 的变化, 具体数据见表 3。首先进行了 Mauchly 球形检验, 发现拒绝球形假设, 后续分析采用 Greenhouse-Geisser 法对自由度进行了校正。校正后的方差分析结果揭示: 速度损失阈值的主效应具有统计学意义 ($F=5.49, P<0.05$), 表明不同的 VLT 对受试者的 RMSSD 值产生了显著影响; 时间因素的主效应同样极为显著 ($F=82.22, P<0.001$), 说明测试时间点对 RMSSD 值变化具有决定性作用; 值得注意的是, 时间与速度损失阈值

之间的交互作用也达到了显著水平 ($F=3.746, P<0.05$), 这提示不同 VLT 组别在各个时间点上的 RMSSD 值变化模式存在差异, 该趋势可由图 2 直观展示。

进一步的 Bonferroni 多重比较检验结果具体如下: (1) 在 T1 至 T5 的所有时间点, 10%VLT 组与 20%VLT 组之间的 RMSSD 值均未呈现统计学差异 ($P>0.05$); (2) 在 T1、T2、T3 时间点 10%VLT 组的 RMSSD 值与 30%VLT 组相比存在显著差异 ($P<0.05$); (3) 在 T1 和 T2 时间 20%VLT 组与 30%VLT 组的 RMSSD 值表现出显著差异 ($P<0.05$)。成对比较显示: 对于 10%VLT、20%VLT 和 30%VLT 三个组别, 其在 T1、T2、T3 所测得的 RMSSD 值, 相较于训练前的基准状态 (T0), 均存在显著差异 ($P<0.05$)。

2.2 不同速度损失阈值的深蹲训练前后血乳酸的变化

经 Mauchly 球形检验, 结果显示校正自由度。校正后的统计分析表明: 速度损失阈值的主效应高度显著 ($F=196.384, P<0.001$), 证实 VLT 水平对血乳酸值具有决定性影响; 时间因素的主效应同样极显著 ($F=1227.817, P<0.001$), 反映测试时点对血乳酸变化的强烈作用; 此外, 时间与速度损失阈值的交互效应达到统计显著水平 ($F=29.731, P<0.001$), 表明不同 VLT 组别在各时间点的血乳酸动态趋势存在明显分化, 见表 4, 图 3。

表 4 不同速度损失阈值的深蹲训练前后血乳酸值的变化

时间	10%VLT	20%VLT	30%VLT
T0	1.25 $\pm$ 0.34	1.06 $\pm$ 0.16	1.24 $\pm$ 0.31
T1	8.89 $\pm$ 0.92 [▲]	9.85 $\pm$ 1.10 ^{*#}	11.21 $\pm$ 0.99 ^{*#}
T2	2.60 $\pm$ 1.12 [▲]	4.52 $\pm$ 0.58 ^{*#}	7.71 $\pm$ 0.51 ^{*#}
T3	1.18 $\pm$ 0.21	1.93 $\pm$ 0.21 ^{*#}	3.92 $\pm$ 0.87 ^{*#}
T4	1.32 $\pm$ 0.19	1.45 $\pm$ 0.21	2.83 $\pm$ 0.34 ^{*#}
T5	1.19 $\pm$ 0.45	1.18 $\pm$ 0.47	1.81 $\pm$ 1.23
F 速度损失阈值, P 速度损失阈值	196.384, <0.001		
F 时间, P 时间	1227.817, <0.001		
F 交互, P 交互	29.731, <0.001		

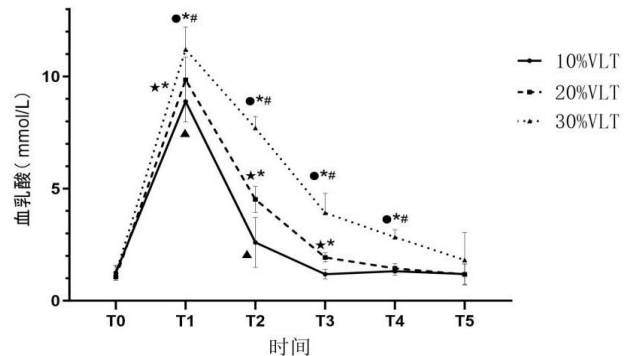


图 3 不同速度损失阈值的深蹲训练前后血乳酸值的变化趋势

Bonferroni 事后检验结果: T1、T2、T3 时点, 10%VLT 组与 20%VLT 组差异显著 ($P<0.05$); T1 至 T4 时点,

10%VLT 组与 30%VLT 组均呈现显著差异 ($P<0.05$)；同样在 T1-T4 阶段，20%VLT 组与 30%VLT 组存在显著差异 ($P<0.05$)。成对比较显示：10%VLT 组：仅 T1、T2 时点血乳酸值与 T0 显著差异 ($P<0.05$)；20%VLT 组：T1 至 T3 时点血乳酸值较 T0 显著改变 ($P<0.05$)；30%VLT 组：从 T1 至 T4 的血乳酸值均显著偏离基线状态 ($P<0.05$)。

2.3 不同速度损失阈值的深蹲训练前后 CMJ 高度的变化

经 Mauchly 球形检验，结果拒绝球形假设需校正自由度。校正后结果显示：VLT 主效应极显著 ($F=149.012, P<0.001$)，表明 VLT 对 CMJ 高度产生决定性影响；时间主效应高度显著 ($F=237.464, P<0.001$)，反映时间对 CMJ 高度变化存在强烈效应；时间与 VLT 的交互作用显著 ($F=26.594, P<0.001$)，证实不同 VLT 组在各时间点 CMJ 高度趋势显著分化。

Bonferroni 检验结果显示：10%VLT 组与 20%VLT 组在 T1-T3 时点存在显著差异 ($P<0.05$)，其余时点无差异 ($P>0.05$)；10%VLT 组与 30%VLT 组在 T1 至 T5 全程呈现显著差异 ($P<0.05$)；20%VLT 组与 30%VLT 组在 T1-T5 阶段差异均达显著水平 ($P<0.05$)。成对比较结果显示：10%VLT 组：T1-T3 时点 CMJ 高度显著偏离基线 (T0) ($P<0.05$)，其他时点恢复至基准；20%VLT 组：T1-T3 时点较 T0 显著变化 ($P<0.05$)；30%VLT 组：T1-T4 时点持续显著偏离基线 ($P<0.05$)，至 T5 时点回归基准状态 ($P>0.05$)，表 5、图 4。

表 5 不同速度损失阈值的深蹲训练前后 CMJ 高度的变化

时间	10%VLT	20%VLT	30%VLT
T0	42.75±2.70	42.40±2.72	41.80±2.63
T1	40.01±0.504 [▲]	36.01±0.99 ^{**}	29.53±1.13 ^{*##}
T2	39.61±0.68 [▲]	33.49±1.58 ^{**}	27.29±1.37 ^{*##}
T3	40.35±2.66 [▲]	37.23±0.70 ^{**}	32.50±0.67 ^{*##}
T4	43.08±0.46	41.97±2.68	36.76±0.69 ^{*##}
T5	43.07±2.68	42.72±2.70	39.08±1.43 ^{*#}
F 速度损失阈值, P 速度损失阈值	149.012, <0.001		
F 时间, P 时间	237.464, <0.001		
F 交互, P 交互	26.594, <0.001		

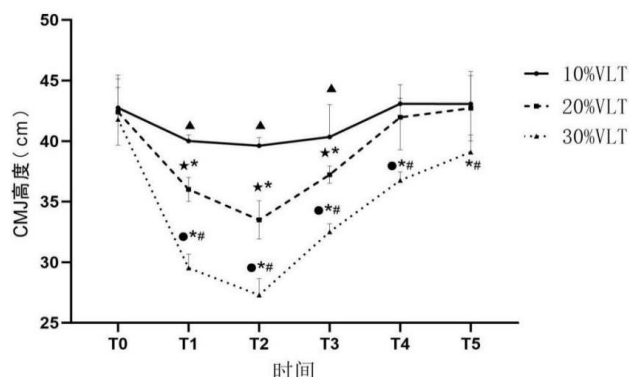


图 4 不同速度损失阈值的深蹲训练前后 CMJ 高度的变化趋势

2.4 不同速度损失阈值的深蹲训练前后肌电信号 MF 值的变化

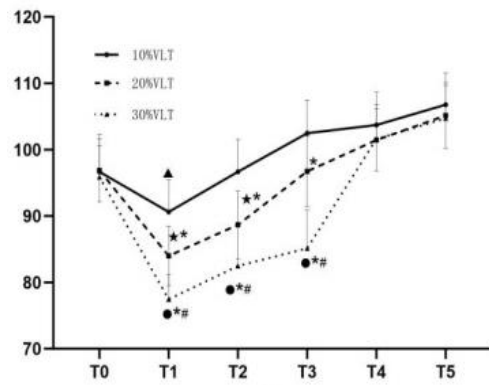
通过双因素 (时间×速度损失阈值) 重复测量方差分析，评估不同速度损失阈值 (VLT) 深蹲训练前后受试者下肢四块肌肉 MF 值的动态响应。拒绝 Mauchly 球形检验球形假设，需采用 Greenhouse-Geisser 方法对自由度进行校正。校正后的统计分析表明：每块肌肉的速度损失阈值主效应均达到高度显著水平 ($P<0.001$)，证实 VLT 差异对 MF 值存在极强影响；时间主效应同样极为显著 ($P<0.001$)，说明测试时点对 MF 值演变具有关键作用；时间与速度损失阈值的交互效应显著 ($P<0.001$)，提示不同 VLT 组别在各时间点的 MF 值变化模式呈现明显分化 (详见图 5)。

交互作用显著执行 Bonferroni 事后检验：在 T1 至 T3 阶段，10%VLT 组的 MF 值相较于 20%VLT 组和 30%VLT 组均显示统计学差异 ($P<0.05$)；同时，T1 至 T3 期间 20%VLT 组与 30%VLT 组的 MF 值比较亦存在显著差异 ($P<0.05$)。成对比较分析显示各组内随时间变化的特征：10%VLT 组在 T1 时点 MF 值与基准值 (T0) 显著偏离 ($P<0.05$)；20%VLT 组于 T1 和 T2 时点较 T0 呈现显著变化 ($P<0.05$)；30%VLT 组在 T1 至 T3 时点持续显著偏离基准 ($P<0.05$)，至 T4 和 T5 时点回归基线状态 (见表 6 和图 5)。

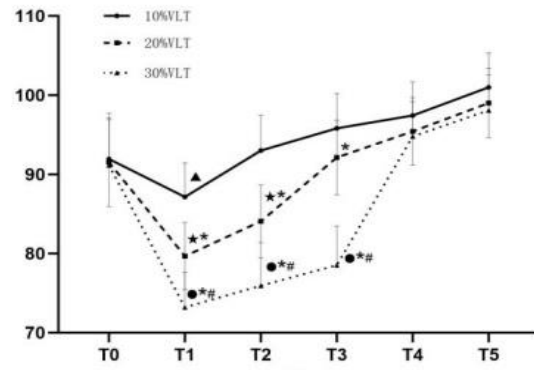
表 6 不同速度损失阈值的深蹲训练前后肌电信号 MF 值的变化

肌肉	时间	10%VLT	20%VLT	30%VLT	F 速度损失阈值, P 速度损失阈值	F 时间, P 时间	F 交互, P 交互
股直肌	T0	91.93±5.78	91.53±5.57	91.13±5.78	22.01, <0.001	234.14, <0.001	25.37, <0.001
	T1	87.13±4.37 [▲]	79.67±4.25 ^{**}	73.20±4.38 ^{*##}			
	T2	93.00±4.47	84.07±4.59 ^{**}	75.93±5.44 ^{*##}			
	T3	95.80±4.40	92.13±4.69 [*]	78.53±4.93 ^{*##}			
	T4	97.42±4.25	95.42±4.25	94.80±4.39			
	T5	100.99±4.35	99.01±4.39	98.09±4.67			
股外侧肌	T0	96.67±5.59	96.87±4.72	95.87±4.75	14.24, <0.001	341.75, <0.001	25.85, <0.001
	T1	90.60±4.82 [▲]	84.00±4.47 ^{**}	77.47±3.74 ^{*##}			

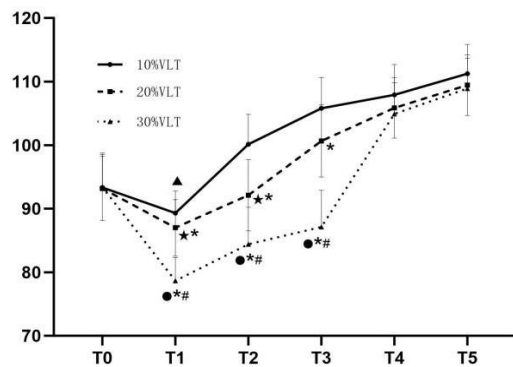
	T2	96.67 ±4.88	88.67 ±5.11**	82.47 ±5.93*##			
	T3	102.47 ±5.01	96.73 ±5.30*	85.13 ±5.76*##			
	T4	103.71 ±4.97	101.44 ±4.65	101.60 ±5.17			
	T5	106.75 ±4.79	105.14 ±4.98	104.71 ±4.79			
续表 6							
股内侧肌	T0	93.33 ±5.17	93.20 ±5.03	93.40 ±5.37	17.21, <0.001	444.12, <0.001	34.17, <0.001
	T1	89.33 ±4.47▲	87.00 ±4.47**	78.67 ±3.64*##			
	T2	100.13 ±4.69	92.13 ±5.63**	84.40 ±5.83*##			
	T3	105.80 ±4.84	100.67 ±5.67*	87.13 ±5.79*##			
	T4	107.93 ±4.77	105.86 ±4.76	104.93 ±4.89			
	T5	111.24 ±4.59	109.45 ±4.78	108.93 ±4.71			
腓肠肌	T0	105.87 ±6.20	105.27 ±6.52	104.33 ±6.99	18.88, <0.001	344.20, <0.001	18.82, <0.001
	T1	98.93 ±3.97▲	92.53 ±4.27★*	86.27 ±4.27●*##			
	T2	105.00 ±5.00	97.00 ±4.78★*	89.73 ±5.65●*##			
	T3	110.40 ±4.61	104.93 ±5.08*	92.27 ±5.26●*##			
	T4	114.63 ±4.53	111.76 ±4.35	111.40 ±4.61			
	T5	118.81 ±4.28	116.91 ±4.50	115.63 ±4.53			



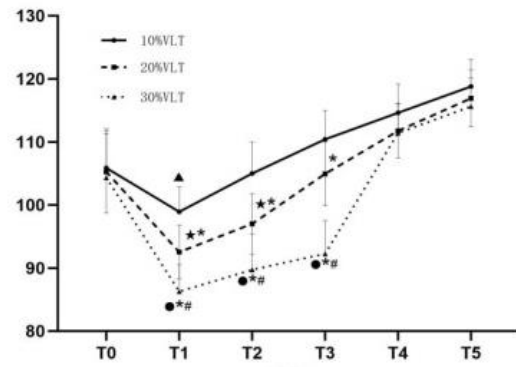
(a)股直肌



(b)股外侧肌



(c)股内侧肌



(d)腓肠肌

图 5 不同速度损失阈值的深蹲训练前后肌电信号 MF 值的变化趋势

2.5 不同速度损失阈值的深蹲训练前后主观感知恢复程度的变化

经 Mauchly 球形检验结果发现拒绝球形假设,需校正自由度。校正后的统计结果显示:速度损失阈值主效应高

度显著 ($F=175.61$, $P<0.001$),表明 VLT 对主观感知恢复程度存在决定性影响;时间主效应极为显著 ($F=2480.17$, $P<0.001$),反映时间对主观感知恢复程度发挥关键作用;时间与速度损失阈值的交互作用达统计显著水平

($F=118.07$, $P<0.001$), 证实不同 VLT 组在各时间点的主观感知恢复程度变化模式存在显著异质性(详见图 6), 这一发现需进一步开展事后检验, 见表 7。

表 7 不同速度损失阈值的深蹲训练前后主观感知恢复程度的变化

时间	10%VLT	20%VLT	30%VLT
T0	9.67±0.62	9.53±0.64	9.47±0.64
T1	5.77±0.34 [▲]	4.00±0.22 ^{**}	2.00±0.25 ^{*#}
T2	6.87±0.34 [▲]	4.87±0.35 ^{**}	2.77±0.41 ^{*#}
T3	7.87±0.34 [▲]	5.87±0.34 ^{**}	3.87±0.35 ^{*#}
T4	9.06±0.48	8.60±0.69 ^{**}	7.15±0.50 ^{*#}
T5	9.47±0.64	9.53±0.27	9.06±0.49
F 速度损失阈值, P 速度损失阈值	175.61, <0.001		
F 时间, P 时间	2480.17, <0.001		
F 交互, P 交互	118.07, <0.001		

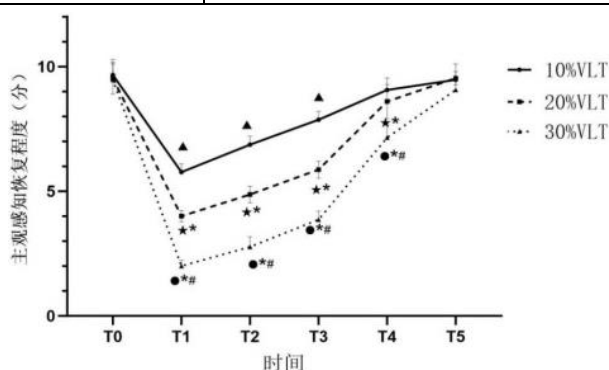


图 6 不同速度损失阈值的深蹲训练前后主观感知恢复程度的变化趋势

Bonferroni 多重比较揭示: T1 至 T4 阶段, 10%VLT 组的主观感知恢复程度得分显著区别于 20%VLT 组及 30%VLT 组 ($P<0.05$); 同期 (T1-T4), 20%VLT 组与 30%VLT 组的主观感知恢复程度比较亦呈现统计学差异 ($P<0.05$)。成对比较结果显示: 10%VLT 组: T1 至 T3 时点主观感知恢复程度显著偏离基线 (T0) ($P<0.05$), 至 T4、T5 时点回归基准状态; 20%VLT 组: T1 至 T4 全程主观感知恢复程度较 T0 存在显著偏移 ($P<0.05$), 仅 T5 时点恢复至无差异水平; 30%VLT 组: T1 至 T4 时点持续显著偏离基线 ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 不同速度损失阈值的深蹲训练对心率变异性的影响

现有研究证实, 抗阻训练可诱发副交感神经活性急性抑制, 该效应通常于 24-48 小时内消退^[5]。副交感神经通过调控静息心率和血压维持内环境稳态, 其活性衰减标志着机体需启动恢复进程。本实验采用 RMSSD (反映相邻心跳间期瞬变) 作为副交感神经活性标志物——其数值升高提示副交感张力增强, 反之则减弱。研究发现不同 VLT 深蹲训练均

导致 RMSSD 值显著下降, 表明副交感神经受到抑制。该现象源于自主神经系统平衡重构: 肌肉收缩引发血压瞬升及气体交换需求增加, 直接刺激交感神经; 儿茶酚胺释放、代谢物 (乳酸/ H^+) 积累、血浆容量波动及快肌纤维募集共同抑制迷走神经活性^[6]; 交感内分泌残留、疲劳清除延迟及血浆容量缓慢恢复, 使机体“压力状态”持续 24~48h^[5]。

心率变异性 (HRV) 恢复至基线是评估运动员恢复的关键指标。本研究显示: 10%VLT 组: 48h 出现超量恢复 (RMSSD>基线), 提示神经兴奋性提升; 20%VLT 组: 24h 接近基线, 48h 恢复但未超量; 30%VLT 组: 48h 仍略低于基线, 表明自主神经过度疲劳。该差异与训练负荷相关: 30%VLT 引发更高重复次数^[7], 而负荷强度直接影响代谢物累积量及清除速率, 进而延缓 HRV 恢复^[7]。实证表明, 负荷增大加剧心血管急性应激 (如 30%VLT 组干预后即刻 RMSSD 最低), 延长恢复周期^[5]。

3.2 不同速度损失阈值的深蹲训练对血乳酸的影响

当训练后期乳酸超载时, 单羧酸转运体 (MCT) 载体饱和, 转运效率降低, 而肝脏科里循环的乳酸转化上限引发细胞内滞留效应^[8]。本研究中, 三种 VLT 深蹲训练后即刻血乳酸浓度均显著升高 (10%VLT<20%VLT<30%VLT), 所有 VLT 训练均激活糖酵解供能; VLT 水平与乳酸积累量呈正相关, 可有效表现代谢应激强度。这与 Weakley 等 (2020) 发现一致: 低负荷训练引发更弱代谢反应^[9]。乳酸通过三途径清除: 组织氧化、糖异生及肝内转化。本实验采用自主拉伸恢复方式, 三组清除时序表现为: 10%VLT 组: 12h 恢复基线; 20%VLT 组: 24h 仍略高于基线, 48h 达标; 30%VLT 组: 24h 显著高于基线, 48h 接近但未完全恢复。

3.3 不同速度损失阈值的深蹲训练对 CMJ 高度的影响

神经肌肉疲劳通过肌浆网钙离子泄漏降低兴奋-收缩耦联 (ECC) 效率, 进而削弱 CMJ 表现。ECC 作为肌肉“点火系统”, 钙泄漏引发“引擎”效能下降^[10,11]。本实验观察到不同 VLT 深蹲训练后 CMJ 高度均显著下降: 10%VLT 组: 降幅 6.41% (最小), 高动作速度维持强化神经协调, 且低负荷减轻疲劳干扰; 20%VLT 组: 下降 15.1%, 训练时长增加及乳酸累积加剧疲劳; 30%VLT 组: 近 30%降幅, 重复次数最多致动作速度大幅衰减^[10]。

三组 VLT 深蹲训练干预后恢复动力学有差异, CMJ 高度复原速率受肌肉状态与代谢清除调控: 10%VLT 组: 12h 略低基线, 24h 超量恢复 (+0.7%), 48h 稳定; 20%VLT 组: 24h 未达基线, 48 小时无超量恢复 (肌纤维损伤影响磷酸原再合成); 30%VLT 组: 48h 仍低于基线 (结缔组织损伤及神经抑制持续^[12])。

3.4 不同速度损失阈值的深蹲训练对表面肌电 MF 值的影响

中值频率 (MF) 作为表面肌电 (sEMG) 功率谱的核心指标, 表征频谱能量分布的平衡点。肌肉疲劳状态下, 功

率谱呈现系统性低频偏移(频谱压缩),导致 MF 值下降^[4]。本研究通过深蹲跳监测股直肌、股外侧肌、股内侧肌及腓肠肌的 MF 响应,发现不同速度损失阈值(VLT)训练后 MF 均显著降低,且降幅呈 VLT 依赖性:10%VLT 组:降幅最弱(股直肌 5.22%→腓肠肌 6.56%),反映非疲劳状态下的神经适应性优化;20%VLT 组:降幅中等(股内侧肌 6.65%→股外侧肌 13.29%),体现代谢与神经疲劳的协同作用;30%VLT 组:降幅最大(股内侧肌 15.77%→股直肌 19.68%),源于深度疲劳诱导的传导速度骤减、II 型纤维放电失能及频谱左移^[13]。研究发现 10%VLT 组 6h MF 复常,20%VLT 组需 12h,30%VLT 组长达 24h,主要是由于 MF 与血乳酸浓度呈中度负相关($r = -0.31$)^[14];较之心血管或主观疲劳指标, MF 受系统干扰更小,直接映射肌肉电生理状态。

3.5 不同速度损失阈值的深蹲训练对主观感知恢复程度的影响

本研究观察到三种速度损失阈值(VLT)深蹲训练后,受试者即刻主观感知恢复程度均显著恶化。其中 30%VLT 组下降幅度最大,受试者普遍报告“恢复不良/明显疲惫”。各组恢复进程呈现 VLT 依赖性梯度:10%VLT 组:干预 24h 后感知评分接近基准水平;20%VLT 组:24h 达“较有精力”水平,48h 完全恢复(评分 9.53);30%VLT 组:48h 后评分仍低于基线 4.96%,未完全复原。此结果与 Sousa 等(2022)对 CrossFit 运动员的观测一致^[15]。

4 结论

在以深蹲为训练动作的速度基础力量训练中,提高速度损失阈值(VLT)会加剧机体疲劳程度,并显著延长所需恢复时间。本研究证实,速度损失阈值(VLT)可作为量化评估训练所致疲劳及其恢复动态的有效指标。

基金项目:中北大学第 20 届研究生科技立项:基于速度的力量训练中不同速度损失阈值的疲劳恢复研究(课题编号:20242051)。

[参考文献]

- [1]闫琪,廖婷,张雨佳.数字化体能训练的理念、进展与实践[J].体育科学,2018,38(11):3-16.
- [2]González-Badillo J J,Marques M C,Sánchez-Medina L.The importance of movement velocity as a measure to control resistance training intensity[J].Journal of human kinetics,2011(29):15.
- [3]Sindiani M,Lazarus A,Iacono A D,et al.Perception of changes in bar velocity in resistance training:Accuracy levels within and between exercises[J].Physiology & Behavior,2020(224):113025.
- [4]González-Badillo J J,Sánchez-Medina L.Movement velocity as a measure of loading intensity in resistance training[J].International journal of sports medicine,2010,31(5):347-352.
- [5]Marasingha-Arachchige S U,Rubio-Arias J A,Alcaraz P E,et

al.Factors that affect heart rate variability following acute resistance exercise:A systematic review and meta-analysis[J].Journal of sport and health science,2022,11(3):376-392.

[6]Buchheit M, Laursen P B,Ahmaidi S.Parasympathetic reactivation after repeated sprint exercise[J].American journal of physiology-heart and circulatory physiology,2007,293(1):133-141.

[7]Rodiles-Guerrero L,Sánchez-Valdepeñas J,Cornejo-Daza P J,et al.Effects of Velocity Loss During Bench-Press Training With Light Relative Loads[J].International Journal of Sports Physiology and Performance,2024,1(aop1):1-11.

[8]Schoenfeld B J.Potential mechanisms for a role of metabolic stress in hypertrophic adaptations to resistance training[J].Sports Med,2013,43(3):179-194.

[9]Weakley J,McLaren S,Ramirez-Lopez C,et al.Application of velocity loss thresholds during free-weight resistance training:Responses and reproducibility of perceptual,metabolic, and neuromuscular outcomes[J].Journal of Sports Sciences,2020,38(5):477-485.

[10]Sanchez-Medina L,González-Badillo J J.Velocity loss as an indicator of neuromuscular fatigue during resistance training[J].Medicine and science in sports and exercise,2011,43(9):1725-1734.

[11]Rodríguez-Rosell D,Yáñez-García J M,Mora-Custodio R,et al.Role of the Effort Index in Predicting Neuromuscular Fatigue During Resistance Exercises[J].The Journal of Strength & Conditioning Research,2020(27).

[12]Pareja-Blanco F,Villalba-Fernández A,Cornejo-Daza P J,et al.Time course of recovery following resistance exercise with different loading magnitudes and velocity loss in the set[J].Sports,2019,7(3):59.

[13]Tsoukos A,Brown L E,Terzis G,et al.Changes in EMG and movement velocity during a set to failure against different loads in the bench press exercise[J].Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports,2021,31(11):2071-2082.

[14]Tesch P A,Komi P V,Jacobs I,et al.Influence of lactate accumulation of EMG frequency spectrum during repeated concentric contractions[J].Acta Physiologica Scandinavica,1983,119(1):61-67.

[15]Sousa Neto I V,Sousa N M F,Neto F R,et al.Time course of recovery following CrossFit®Karen Benchmark workout in trained men[J].Frontiers in Physiology,2022(13):899652.

作者简介:米亚舒(2000—),女,汉族,山西太原人,硕士在读,中北大学,研究方向:体育教育训练学;王奕坤(2005—),女,汉族,山西太原人,中北大学体育学院本科在读,社会体育指导与管理。