

·运动人体科学·

超等长奥举动作在爆发力训练中的生物力学优势

顾耀东, 石智勇, 徐异宁
(宁波大学 体育学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 通过运动生物力学实验探索超等长奥举动作变式在爆发力训练中的生物力学优势。招募10名大学生运动员作为研究对象, 采集受试者在不同负荷下练习传统高抓、传统高翻、超等长高抓和超等长高翻时的运动生物力学数据, 利用数理统计法和机器学习算法, 比较不同动作的运动生物力学特征。结果发现中等相对负荷下, 超等长高翻具有生物力学优势, 但高相对负荷下超等长高抓具有生物力学优势; 奥举动作及其变式的下肢动力学特征相似, 但在中等和次最大强度爆发力负荷下进行爆发力训练时, 超等长动作间的下肢关节动力学差异更小。结果说明, 超等长奥举动作在爆发力训练中具有显著的生物力学优势, 建议结合训练者的需求及技术, 制定个性化训练计划。

关键词: 运动生物力学; 举重; 爆发力; 超等长训练; 拉长缩短周期

中图分类号: G804.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7116(2023)04-0131-07

Advantages of biomechanics from plyometric Olympic weightlifting movement in explosive strength training

GU Yaodong, SHI Zhiyong, XU Yining

(Faculty of Sports Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: This study aims to identify the advantages of biomechanics from plyometric Olympic weightlifting movement in explosive strength training through sports biomechanics experiment. 10 college student-athletes were recruited as research subjects, and they were asked to conduct explosive strength training which contains power cleans, power snatches, plyometric power cleans, and plyometric power snatches during different load conditions. The sports biomechanical characteristics of different movements were compared by using mathematical statistics and machine learning algorithm and the results showed that under moderate relative load, the plyometric power snatch had biomechanics advantages, while at high relative load, the plyometric power clean had biomechanical advantages. The lower limb kinematics of Olympic weightlifting movements and their plyometric variations were similar, but when performing explosive strength training at moderate and submaximal intensity loads, the differences in lower limb joint kinematic patterns between plyometric power movements were smaller. The conclusion revealed that the plyometric Olympic weightlifting movement has the significant sports biomechanical advantages in explosive strength training, and given that, it is recommended to develop a personalized training protocol according to the needs and skills from the weightlifting trainers.

Keywords: sports biomechanics; weightlifting; explosive strength; plyometric training; stretch shortening cycle

爆发力训练是大多数竞技体育项目日常训练的重要组成部分。保持规律、科学、合理且高质量的爆发力训练, 是提升运动员运动表现, 维持运动状态, 保

持运动健康的重要手段之一^[1-2]。除此之外, 大众健身人群保持规律、科学、合理且高质量的爆发力训练, 可以对其神经系统、呼吸系统、心血管系统、循环系

收稿日期: 2023-02-27

基金项目: 浙江省哲学社会科学规划领军人才培养课题 青年英才培育(22QNYC10ZD)。

作者简介: 顾耀东(1981-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 运动生物力学。E-mail: guyaodong@nbu.edu.cn

统和骨骼肌肉系统均带来积极影响,使其保持活跃和强健,继而促进身体健康和^[3]生活质量。

奥林匹克举重(以下简称“奥举”)是公认的提升爆发力的最佳训练之一,被 NSCA、ACSM、NASM 等权威体能协会及运动医学会推荐,并被运用于篮球、足球、美式橄榄球、田径等诸多竞技体育项目的专项体能训练中^[4-6]。其中,被最广泛应用于爆发力训练的奥举动作是“杠铃高翻”(以下简称“高翻”)。高翻是一种常用于训练但在正式比赛中较为少见的奥举动作。当训练者练习高翻时,双手紧握杠铃,而后伸髋发力并且引膝,使杠铃上升,当杠铃过膝后,训练者髋膝踝关节快速伸展,同时上肢发力,将杠铃尽可能拉高,当杠铃达到最高点时,身体迅速下蹲,并以“前架位”姿势接住杠铃,将杠铃架于两侧三角肌前束,但不完全紧贴锁骨。在接铃瞬间,训练者下肢处于非完全深蹲状态,髋关节平行或高于膝关节^[7]。

然而,在运动生物力学视角下,实际运动中对爆发力表现有较高要求的场景,往往包含了一个快速且完整的肌肉拉长缩短周期,即肌肉被快速离心拉长然后向心收缩的超等长收缩过程。而传统的高翻训练及其变式均缺少了其中肌肉离心收缩对外部负荷或自身重力制动的过程。同时,爆发力训练的基本要求之一是实现运动项目的特异性适应,即训练动作所包含的动作成分和负荷类型须尽可能地接近实际运动场景。因此,包含快速肌肉拉长缩短周期的超等长收缩训练,如跳深,同样被认为是提升爆发力的最佳训练之一,在体能训练中应用广泛^[8]。

相比于传统的高翻训练动作,一个包含完整肌肉拉长缩短周期的变式动作可能是提升爆发力的更优选项。本研究假设起始于前架位的高翻动作(以下简称“超等长高翻”)和起始于过顶支撑位的高抓动作(以下简称“超等长高抓”)(见图 1),相比于传统的高翻和高抓动作,在爆发力训练中具有生物力学优势。本研究目的是通过相应的运动生物力学分析,比较不同负荷下传统高翻、传统高抓、超等长高翻和超等长高抓的关节运动学和动力学特征,以验证上述科学推断。



(a)



(b)

图 1 超等长高翻(a)和超等长高抓(b)示意图

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

本研究实验受试者招募期为 2 周,受试者自愿报名。受试者报名后,研究人员会为其登记基础信息,包含性别、年龄、身高、体重和训练年限,基础信息以问卷形式收集。

受试者纳入标准为:(1)年龄 18~25 岁,性别不限;(2)6 个月内无运动损伤史,且 3 个月内无任何临床高强度运动禁忌;(3)须持有国家二级或以上运动员证书;(4)日常训练中包含奥举动作项目且基本掌握传统高翻和高抓动作;(5)传统高翻 1 RM 不低于自身体重;(6)传统高抓 1 RM 不低于体重的 70%。

最终共有 13 名大学生运动员报名参与实验,经过基础信息收集、筛选及 1 RM 测试,10 名符合要求的受试者参与实验,该 10 名受试者均为男性,平均年龄为 (19.5 ± 0.97) 岁,平均身高为 (179.9 ± 3.3) cm,平均体重为 (75.2 ± 5.4) kg,在日常爆发力训练中练习奥举的平均年限均超过 3 年,平均传统高翻 1 RM 为 (98.2 ± 4.5) kg,平均传统高抓 1 RM 为 (75.5 ± 3.1) kg,其中传统高翻 1 RM 的平均最大爆发力为 (562.0 ± 28.5) N,平均最大输出功率为 $(1\ 758.1 \pm 164.0)$ W,传统高抓 1 RM 的平均最大爆发力为 (439.0 ± 16.5) N,平均最大输出功率为 $(1\ 520.5 \pm 96.1)$ W。

本实验经宁波大学体育学院伦理委员会审查(编号:20220096),所有受试者均签署知情同意书。

1.2 整体实验

10 名受试者将统一停训 10 天进行实验,实验包含 4 个训练日,在每个训练日中,除例行热身、冷身和放松整理外,主训练模块分为传统高翻、传统高抓、超等长高翻和超等长高抓 4 种训练内容。每个受试者以随机顺序依次在 4 个训练日中完成 4 项训练内容并进行测试,随机顺序采用 SPSS 软件(版本 23.0,IBM 公司,美国)自带的随机序列生成模块完成。训练过程

允许使用握力带、腰带以及其他运动护具,受试者须穿着专用举重鞋(品牌不限),在实木举重台上完成训练。为保证肌肉骨骼系统和神经募集能力的全面恢复,每2个训练日间包含2个休息日,在休息日中受试者禁止饮酒、暴饮暴食和熬夜,并除日常活动外不得进行任何体育活动,且保证10 h以上睡眠。

1.3 训练流程

1)热身。在热身阶段,首先受试者被要求进行功率自行车骑行,时间为5 min。之后,实验人员带领受试者进行全身的动态拉伸,时间为5 min。在整个热身阶段,实验人员利用6~20分Borg自觉疲劳量表,询问受试者的自觉疲劳程度,以确保热身强度保持在量表分6~10分的范围内。

2)主训练。主训练阶段采用逐级增加杠铃重量的训练方案。首先,受试者从空杆(男子杆20 kg)开始进行3组3次的练习,组间休息2 min。之后,增加杠铃重量至30 kg,同样进行3组3次的练习,组间休息2 min。然后继续增加杠铃重量至50% 1 RM进行3组3次的练习,组间休息为3 min。最后,增加杠铃重量至80% 1 RM进行3组3次的练习,组间休息3 min。

3)冷身。在冷身阶段,受试者需要骑功率自行车5 min,强度以受试者感到舒适为准,实验人员利用6~20分Borg自觉疲劳量表,询问受试者的自觉疲劳程度,以确保冷身强度保持在量表分6~10分的范围内。

4)放松整理。在放松整理阶段,受试者自主选择泡沫轴或筋膜枪放松,时间为10 min。

1.4 数据采集

采集受试者使用重量为30 kg,50%1 RM和80% 1 RM的杠铃进行传统高抓、传统高翻、超等长高抓、超等长高翻动作爆发力训练时的运动生物力学数据。

1)运动学数据。

实验采集的运动学数据包括爆发力训练测试中人体髋关节角度、膝关节角度和踝关节角度,以及杠铃在垂直方向上的运动距离、杠铃速度和杠铃加速度。其中,人体运动学数据由Xsens惯性运动捕捉系统(Xsens Technologies公司,荷兰)^[9]采集。杠铃的运动学数据由FLEX激光杠铃运动跟踪设备(Gymware公司,澳大利亚)^[10]采集。

2)动力学数据。

实验采集的动力学数据包括每位受试者传统高翻和传统高抓的1 RM,正式实验中每次爆发力训练所用杠铃的重量,以及每次试举中人体对杠铃施加的爆发力和对杠铃输出的功率。其中每次试举中人体对杠铃施加的爆发力和对杠铃输出的功率由FLEX激光杠铃运动跟踪设备(Gymware公司,澳大利亚)根据每次试举所采

用的杠铃重量、杠铃在垂直方向上的运动距离、杠铃速度和杠铃加速度数据,利用牛顿运动定律计算获得。

1.5 数据处理和分析

本研究数据定量分析利用Jamovi统计分析软件(版本23.0, <https://www.jamovi.org>),采用配对样本 t 检验,以 $\alpha=0.05$ 为统计学显著性标准,分别比较了杠铃重量为30 kg,50% 1 RM和80% 1 RM传统高抓(或传统高翻)情况下,受试者采用传统高抓或高翻,超等长高翻或高抓动作进行爆发力训练时,人体踝、膝、髋关节的关节角度峰值、关节角速度峰值,以及人体对杠铃输出的爆发力平均值、峰值,以及人体对杠铃输出功率的平均值、峰值,旨在探索超等长奥举动作变式和传统动作之间的运动学和动力学差异。由于在实验所测的动作中,肌肉离心收缩所产生的力对下降中的杠铃做负功,使杠铃减速,因此,在计算做功和输出功率的平均值和峰值时,均采用绝对值进行计算。

同时,考虑到传统高翻和传统高抓,以及超等长高翻和超等长高抓动作中,人体下肢踝、膝、髋关节的动作成分相似,但是在肌肉力量速度关系的影响下,使用不同重量杠铃下进行训练时受试者完成动作的速度不同,继而导致在相同的设备采样率下,数据序列的长度存在差异。因此,本研究在Microsoft Visual Code Studio软件(版本1.64.2, Microsoft公司,美国)中,基于Python语言环境,编写动态时间规整(Dynamic Time Warping, DTW)算法程序,将不同完成时间和速度的举重动作进行数据对齐,以探究不同杠铃重量下,受试者执行传统高翻和传统高抓,超等长高翻和超等长高抓对杠铃输出爆发力的时序特征差异,并通过计算两个待比较动作间的DTW距离,量化分析不同动作中人体对杠铃输出爆发力的时序特征差异的大小。

DTW算法的核心概念是通过寻找最佳路径来最小化两个时间序列之间的距离,本研究采用欧几里得范数(Euclidean norm)作为距离度量,计算公式如下:

$$D(i, j) = |x(i) - y(j)| \quad (1)$$

其中, $D(i, j)$ 为序列 x 的第 i 个元素与序列 y 的第 j 个元素之间的欧几里得范数。通过该公式,可计算累积距离矩阵(accumulated cost matrix) $C(i, j)$,其每个元素表示从序列 x 的起点到序列 y 的起点的最短距离。累积距离矩阵的计算公式如下:

$$C(i, j) = D(i, j) + \min\{C(i-1, j), C(i, j-1), C(i-1, j-1)\} \quad (2)$$

在计算累积距离矩阵后,可以通过回溯累积距离矩阵找到最佳路径(optimal warping path)和DTW距离,其中最佳路径是从序列 x 的起点到序列 y 的起点的最短距离,DTW距离定义为累积距离矩阵 C 中最后一个

元素的值, 可以作为两个序列相似性的量化度量, DTW 距离越小, 表示两个序列之间的相似性越高。

最后, 为了可视化 DTW 路径, 对路径进行归一化处理, 将其映射到[0, 1]区间, 并以百分比(%)形式表示, 代表一次训练动作的完整周期。再利用 Python 语言的 matplotlib 库绘制 DTW 路径图, 以展示两个序列之间的对齐关系。在 DTW 路径图中, 横轴表示序列 x , 纵轴表示序列 y , 路径图上的点代表两个序列中不同时间点的对应关系。其中, 垂直和水平的 DTW 路径用深色实线表示, 代表两个数据序列存在差异, 垂直的路径表示序列 x 中的某个时间点与序列 y 中的多个连续时间点相对应, 这意味着序列 x 在这个时间段内的变化较慢, 而序列 y 在这个时间段内变化较快。类似地, 水平的路径表示序列 y 中的某个时间点与序

列 x 中的多个连续时间点相对应, 这意味着序列 y 在这个时间段内的变化较慢, 而序列 x 在这个时间段内变化较快。对角的 DTW 路径用浅色实线表示, 代表两个数据序列无明显差异。通过观察垂直和水平移动的路径, 可以分析两个序列在不同阶段的相似性和差异性^[11]。

2 结果与分析

2.1 运动学结果

1) 关节角度峰值。

受试者使用不同重量的杠铃练习 4 种动作(传统高翻、传统高抓、超等长高翻、超等长高抓)时, 下肢髋、膝、踝关节的关节角度峰值之间的配对样本 t 检验结果如表 1 所示。

表 1 不同重量的杠铃进行 4 种动作练习时下肢关节角度峰值 ($\bar{x} \pm s$) (°)

部位	负荷	传统高翻	传统高抓	超等长高翻	超等长高抓
踝	30kg 热身	32.02±1.23	33.68±1.01	30.84±1.88	31.18±1.32
	50% 1RM	29.35±2.59	33.62±1.29	26.58±0.75	33.27±1.61
	80% 1RM	32.71±1.96	34.59±0.66	32.91±1.33	38.59±0.66
膝	30kg 热身	115.84±6.25	115.13±4.18	65.40±3.00	77.57±3.04 ²⁾
	50% 1RM	109.37±3.99	126.40±0.15 ¹⁾	67.00±0.75	89.61±0.65 ²⁾
	80% 1RM	107.67±8.44	115.99±1.66	80.33±1.29	100.73±3.57 ²⁾
髋	30kg 热身	100.64±2.24	103.19±3.40	11.27±1.20	45.26±1.85 ²⁾
	50% 1RM	126.68±1.63	104.31±2.03 ¹⁾	47.35±2.58	52.22±1.29
	80% 1RM	130.42±3.15	130.82±2.31	72.77±2.46	73.67±4.43

1)和传统高翻比较, $P<0.05$; 2)和超等长高翻比较, $P<0.05$

2) 关节角速度峰值

受试者使用不同重量的杠铃练习 4 种动作时, 下

肢髋、膝、踝关节的关节角速度峰值之间的配对样本 t 检验结果如表 2 所示。

表 2 不同重量的杠铃进行 4 种动作练习时下肢关节角速度峰值 ($\bar{x} \pm s$) (°)

部位	负荷	传统高翻	传统高抓	超等长高翻	超等长高抓
踝	30kg 热身	403.41±39.26	484.96±36.29 ¹⁾	407.26±66.94	477.43±15.45 ²⁾
	50% 1RM	529.62±23.72	595.15±65.41 ¹⁾	565.31±32.11	731.74±113.11 ²⁾
	80% 1RM	541.39±59.78	651.64±47.98 ¹⁾	655.00±27.90	784.06±48.94 ²⁾
膝	30kg 热身	538.70±16.56	531.90±19.24	529.80±64.72	540.26±99.37
	50% 1RM	606.93±29.53	587.81±34.86	497.56±26.83	580.82±73.15 ²⁾
	80% 1RM	752.19±55.40	779.03±102.75	659.29±59.23	643.85±33.01
髋	30kg 热身	436.69±26.34	572.28±3.86 ¹⁾	288.53±4.55	625.04±74.31 ²⁾
	50% 1RM	545.76±21.90	624.56±39.53 ¹⁾	490.34±17.54	566.01±35.94 ²⁾
	80% 1RM	632.91±24.19	701.91±80.21 ¹⁾	534.72±15.83	632.20±33.16 ²⁾

1)和传统高翻比较, $P<0.05$; 2)和超等长高翻比较, $P<0.05$

2.2 动力学结果

1)人体对杠铃输出功率。

受试者使用不同重量的杠铃练习4种动作时, 对

杠铃输出功率平均值和峰值之间的配对样本 *t* 检验结果如表3所示。

表3 不同重量的杠铃进行4种动作练习时人体输出功率($\bar{x} \pm s$)

W

	负荷	传统高翻	传统高抓	超等长高翻	超等长高抓
平均值	30kg 热身	34.62±4.03	84.08±11.67	59.26±1.81	140.32±2.96
	50% 1RM	51.82±3.21	66.80±5.49	123.00±4.99	119.63±4.15
	80% 1RM	97.14±6.40	114.80±2.78	208.69±3.29	164.82±10.43
峰值	30kg 热身	163.47±8.38	516.01±65.15 ¹⁾	487.07±10.99	844.96±44.77 ²⁾
	50% 1RM	230.85±45.41	528.67±15.95 ¹⁾	927.50±32.14	781.25±49.91 ²⁾
	80% 1RM	356.65±71.31	619.87±32.68 ¹⁾	996.82±62.73	1 145.32±30.39 ²⁾

1)和传统高翻比较, *P*<0.05; 2)和超等长高翻比较, *P*<0.05

2)人体对杠铃输出爆发力。

受试者使用不同重量的杠铃练习4种动作时, 对

杠铃输出爆发力平均值和峰值之间的配对样本 *t* 检验结果如表4所示。

表4 不同重量的杠铃进行4种动作练习时人体输出爆发力($\bar{x} \pm s$)

N

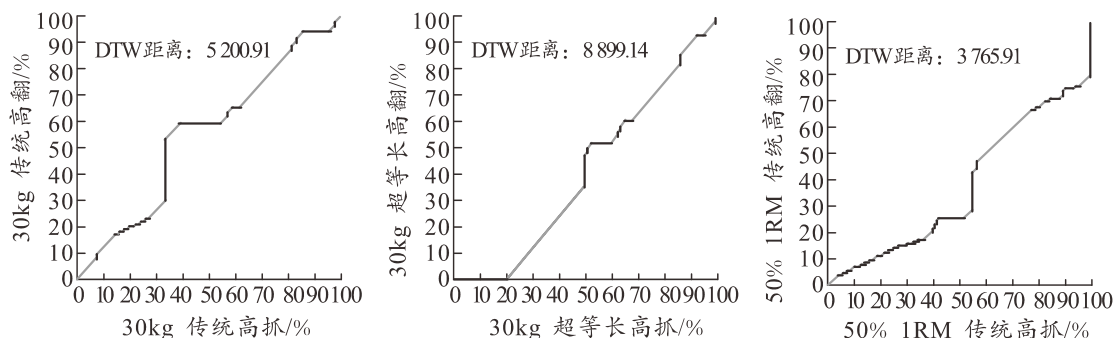
	负荷	传统高翻	传统高抓	超等长高翻	超等长高抓
平均值	30kg 热身	37.9±4.56	60.74±5.51	77.04±3.37	111.78±1.26
	50% 1RM	63.04±1.05	58.41±1.51	133.48±5.24	104.51±2.63
	80% 1RM	132.20±4.05	99.60±5.49	250.37±2.21	159.82±5.22
峰值	30kg 热身	116.85±2.70	212.28±14.52 ¹⁾	496.19±8.70	582.54±25.92 ²⁾
	50% 1RM	203.09±10.06	248.49±5.35 ¹⁾	763.37±33.12	636.15±46.29 ²⁾
	80% 1RM	335.03±22.03	302.33±17.14 ¹⁾	1 038.80±36.00	884.18±37.07 ²⁾

1)和传统高翻比较, *P*<0.05; 2)和超等长高翻比较, *P*<0.05

3)人体对杠铃输出爆发力时序特征。

人体对杠铃输出爆发力的时序特征差异方面, 不同杠铃重量下, 受试者执行传统高翻和传统高抓, 超等长高翻和超等长高抓对杠铃时, 人体对杠铃输出爆发力的时序特征及两个待比较动作间的 DTW 距离如图2所示。由图2可得, 传统高翻和传统高抓, 以及超等长高翻和超等长高抓, 分别拥有类似的下肢关节

动力学模式, 但在中等和次最大强度负荷(50% 1 RM 和 80% 1 RM)下进行爆发力训练时, 传统动作间中的下肢关节动力学差异高于超等长动作间的下肢关节动力学差异(DTW 距离值更大)。同时, 相比于超等长高翻, 超等长高抓在中等和次最大强度负荷(50% 1 RM 和 80% 1 RM)间的动力学差异更小(DTW 距离: 3 119.60 和 5 614.19)。



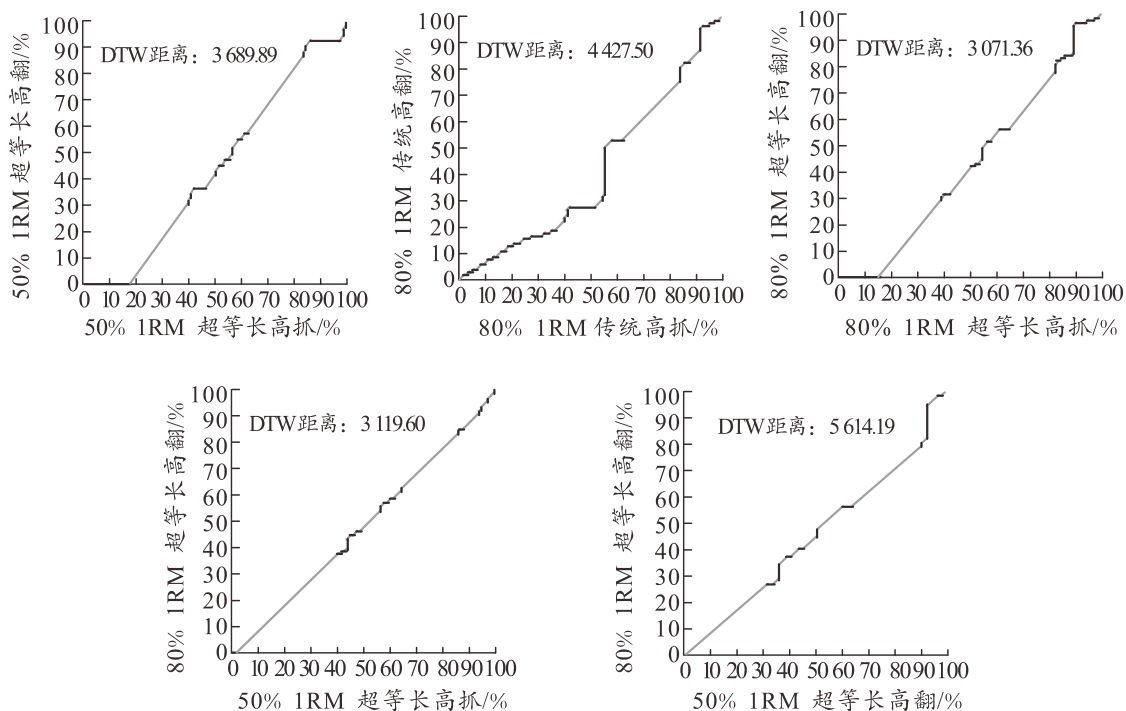


图2 不同杠铃重量下4种动作练习时人体对杠铃输出爆发力的时序特征比较

3 讨论

本研究通过运动生物力学实验,比较了不同负荷下传统高翻、传统高抓、超等长高翻和超等长高抓的关节运动学和动力学特征,探讨了传统奥举高翻和高抓动作的超等长变式在爆发力训练中潜在的生物力学优势。

运动学方面,熊维志等^[12]研究分析了优秀女子举重运动员抓举动作运动学参数与成绩的相关性,挖掘运动学指标,并建立相关多元线性回归方程;刘平等^[13]研究分析了我国优秀男子举重运动员抓举技术结构,但林飞等^[14]对男子举重世界冠军超挺举世界纪录关键技术运动学参数进行了分析。这些研究为本研究提供了一定的理论依据,但未涉及超等长奥举动作。本研究在传统奥举动作基础上,探讨了超等长变式对下肢动力学特征的影响,拓展了相关研究领域。

动力学方面,先前的一些研究探讨了举重运动员肌肉力量与运动成绩之间的关系。熊维志等^[12]研究发现,男子举重运动员下肢肌肉力量与运动成绩呈正相关关系。徐文泉等^[15]对比了不同级别优秀举重运动员抓举技术关键指标的生物力学特征。这些研究表明,对传统奥举动作进行超等长变式的改进,可能对提高运动员的爆发力和运动成绩具有积极意义。本研究发现,在相同的绝对负荷下,超等长高抓训练对训练者峰值爆发力的要求高于超等长高翻。同时,超等长奥举动作变式的峰值爆发力远高于传统动作模式。这一发现证实了本研究假设,即超等长奥举动作在爆发力

训练中存在明显的生物力学优势。同时,本研究结论与Stone等^[16]和Haff等^[17]的研究基本一致,即力量输出的大小和速度对于举重的运动表现至关重要。本研究认为,超等长奥举动作中,杠铃在人体髋关节的“减速后再加速”阶段,要求训练者在更短时间内产生更大的力量,因此在动力学方面存在优势。此外,动力学参数的动态时间规整结果表明,在中等和次最大强度爆发力负荷(50% 1RM和80% 1RM)下进行爆发力训练时,传统动作间中的下肢关节动力学差异高于超等长动作间中的下肢关节动力学差异。同时,相比于超等长高翻,超等长高抓在中等和次最大强度负荷间的动力学差异更小。因此,本研究认为,超等长奥举动作在爆发力训练中具有显著的生物力学优势,建议结合训练者的需求及技术,制定个性化训练计划。

本研究结果对运动员的爆发力训练实践具有重要指导价值。首先,本研究肯定了超等长奥举动作对于提高运动员爆发力水平具有一定的生物力学优势。此外,本研究结合国内外相关文献,进一步研究了传统奥举动作的超等长变式,为爆发力训练提供了新的实践策略。尽管与部分研究在动作模式方面存在差异,但这些差异正是潜在原因分析的起点,有助于更全面地了解运动员爆发力训练的方法和策略。最后,本研究提供了一种新的分析方法——动态时间规整算法,为实际应用提供了新的思路,有助于教练员针对不同运动员的特点,制定更加科学、精细的训练方案。

然而,尽管本研究取得了一定的成果,但仍存在以下不足之处。首先,本研究的实验对象数量有限,可能影响了结论的普遍适用性。未来研究应扩大样本规模,以提高研究的代表性。其次,本研究未对不同年龄、性别、训练经历等因素进行细致分析,这些因素可能对爆发力训练效果产生影响。今后研究可进一步探讨这些因素与爆发力训练之间的关系。最后,本研究仅从生物力学角度分析了超等长奥举动作在爆发力训练中的优势,未涉及生理、心理等其他方面的影响。后续研究可综合多学科理论,全面评价超等长奥举动作的训练效果。

参考文献:

- [1] ZHANG Q, LEAM A, FOURE A, et al. Relationship between explosive strength capacity of the knee muscles and deceleration performance in female professional soccer players[J]. *Frontiers in Physiology*, 2021, 12: 723041.
- [2] TANGHE K K, MARTIN J C. Heavy and explosive training differentially affect modeled cyclic muscle power[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2020, 52(5): 1068-1075.
- [3] MBADA C E, QUADRI S A, OGHUMU S N, et al. Hand grip strength, leg explosive power and vertical jump performance among Nigerian university male basketball players and healthy controls[J]. *Sports Medicine Journal*, 2020, 16(1).
- [4] HUYGHE T, GORISS B, DELOSANGELES E, et al. Exploring the power clean[J]. *International Journal of Strength and Conditioning*, 2021, 1: 1-10.
- [5] VERHOEFF W J, MILLAR S K, OLDHAM A R H, et al. Coaching the power clean: A constraints-led approach[J]. *Strength & Conditioning Journal*, 2020, 42(2).
- [6] ZECCHIN A, PUGGINA E F, HORTOBÁGYI T, et al. Association between foundation strength and weightlifting exercises in highly trained weightlifters: Support for a general strength component[J]. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2023, 1: 9900.
- [7] KARUNARATNE A, JAYASOORIYA C, DEEGALLA S, et al. Objectively measure player performance on olympic weightlifting[C]// 2021 10th International Conference on Information and Automation for Sustainability (ICIAFS), Negambo, 2021: 410-415.
- [8] 李兆林,周家颖. 跳深时下肢伸肌群肌力变化特征研究[J]. *西安体育学院学报*, 2022, 39(2): 224-231.
- [9] ZHANG J T, NOVAK A C, BROUWER B, et al. Concurrent validation of Xsens MVN measurement of lower limb joint angular kinematics[J]. *Physiological Measurement*, 2013, 34(8): 63-69.
- [10] WEAKLEY J, CHALKLEY D, JOHNSTON R, et al. Criterion validity, and interunit and between-day reliability of the FLEX for measuring barbell velocity during commonly used resistance training exercises[J]. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2020, 34(6): 1519-1524.
- [11] WANG S. Pattern-matching kinematic analysis of glide phase after start with different techniques in medley swimming: An Olympic champion case[J]. *Physical Activity and Health*, 2022, 6(1): 246-256.
- [12] 熊维志. 优秀男子举重运动员腰背、膝关节等速肌力与专项成绩的相关性研究[J]. *成都体育学院学报*, 2014, 40(5): 57-62.
- [13] 刘平,张贵敏,佟永典,等. 我国优秀男子举重运动员抓举技术结构研究[J]. *体育科学*, 2005, 25(1): 46-49.
- [14] 但林飞,石智勇,梅齐昌,等. 石智勇超挺举世界纪录关键技术的运动学参数分析[J]. *上海体育学院学报*, 2021, 45(5): 38-47.
- [15] 徐文泉,王向东,任景萍. 不同级别优秀举重运动员抓举技术关键指标的生物力学对比研究[J]. *成都体育学院学报*, 2013, 39(3): 84-87.
- [16] STONE M H, O'BRYANT H S, MCCOY L, et al. Power and maximum strength relationships during performance of dynamic and static weighted jumps[J]. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2003, 17(1): 140-147.
- [17] HAFF G G, WHITLEY A, POTTEIGER J A. A brief review: Explosive exercises and sports performance[J]. *Strength & Conditioning Journal*, 2001, 23(3): 13.