

刘林, 马勇, 龚博琦, 等. 体育高考原地推铅球技术生物力学特征研究[J]. 体育学研究, 2023, 37(5): 106-117.

体育高考原地推铅球技术生物力学特征研究

刘林^{1,2,3}, 马勇^{1,2,3}, 龚博琦⁴, 贾孟尧^{1,2,3}, 王兆毅^{1,2,3}, 黄锐峰^{1,2,3}, 郑伟涛^{1,2,3}

(1. 武汉体育学院 运动健康智能装备湖北省工程研究中心, 湖北 武汉 430079; 2. 武汉体育学院 湖北省运动装备工程技术研究中心, 湖北 武汉 430079; 3. 武汉体育学院 国家体育总局体育工程重点实验室, 湖北 武汉 430079; 4. 武汉体育学院 体育教育学院, 湖北 武汉 430079)

【摘要】目的: 探索体育高考原地推铅球项目满分和非满分考生的技术动作在生物力学指标上的差异性, 为提高原地推铅球的成绩提供科学的指导。方法: 通过Vicon三维运动捕捉系统、Kistler三维测力台、Noraxon表面肌电测试设备获取两组受试者在投掷过程中的运动学、动力学和表面肌电数据, 通过仿真计算并比较两组受试者在快速推球阶段髋、膝、踝、肩、肘关节的角度、角速度峰值和力矩峰值, 出手速度和重心位移, 以及计算地面反作用力和主要肌群的募集程度、发力时序等生物力学指标。结果: ①运动学: 左手的预摆线速度峰值(LHDV-X)、左踝跖屈角速度峰值(LAKAV-X)、右膝伸展角速度峰值(RKEAV-X)、左膝伸展角速度峰值(LKEAV-X)满分组大于非满分组($P < 0.05$), 躯干位移峰值(CLA-V-Z)、右踝跖屈角速度峰值(RAKAV-X)、右髋伸展角速度峰值(RHPAV-X)满分组小于非满分组($P < 0.05$); ②动力学方面: 左髋关节伸展力矩峰值(LHPM-X)满分组大于非满分组($P < 0.05$), 右膝关节伸展力矩峰值(RKEM-X)、右髋关节伸展力矩峰值(RHPM-X)满分组小于非满分组($P < 0.05$); ③表面肌电: 右竖脊肌(ESR)、左腹外斜肌(EOL)、左臀大肌(GML)、右腓肠肌(GAR)募集程度满分组小于非满分组($P < 0.05$)。结论: 与满分组相比, 水平出手速度、右肩前屈角速度、左手在投掷方向上的预摆线速度、右侧上肢用力和右侧三角肌的募集程度等方面的不足是非满分组投掷距离较小的主要原因。左臀大肌、左腹外斜肌、右胸大肌的提早激活是非满分组上肢发力不足和水平出手速度较低的主要原因。

【关键词】体育高考; 原地推铅球; 运动学; 动力学; 积分肌电; 激活时序

【中图分类号】G824.1; G804.6; G633.96 **【文献标志码】**A **【文章编号】**2096-5656(2023)05-0106-12

DOI: 10.15877/j.cnki.nsic.20230913.001

我国普通高校体育类专业招生考试又称体育高考, 目前全国体育高考均采用基础身体素质加专项技能素质的考试模式^[1]。原地推铅球属于基础身体素质考试中的必考项目, 是一项以力量为基础、以速度为核心、以协调性为保障的典型大负荷抗阻力运动^[2-5]。多年的体育类考试和教学发现原地推铅球是目前考生最容易失分的项目之一^[1], 其原因是考生对原地推铅球项目认识度不高, 没有准确把握技术动作的特点, 训练缺乏针对性, 无法深度挖掘自身技能水平^[1,6]。

铅球是田径项目中最受欢迎的项目之一, 需要运动员以完美的力量、速度和技术来获得最优的投掷距离^[2-8]。铅球脱手后的运动性能是由身体各部

分产生力的总和与动作的技术顺序决定^[8], 这一过程通过技术动作完成生物能向机械能的转化^[9]。铅球作为速度力量型项目^[10], 是以力量为基础、以速度为核心, 通过一系列的预摆加速使铅球获得动量的运动^[11]。对铅球飞行轨迹的研究发现, 出手速度是铅球飞行距离的第一影响因素^[12], 下肢力量也是影响铅球投掷距离的因素之一^[13]; 蹬地角度、踝角、

收稿日期: 2023-07-07

基金项目: 湖北省教育厅科学研究计划项目(B2022234); 武汉体育学院东湖学者计划; 武汉体育学院校级科研团队(21KY02); 武汉体育学院“十四五”湖北省优势特色学科(群)(鄂教研[2021]5号)。

第一作者: 刘林(1990—), 男, 湖南常德人, 博士生, 研究方向: 运动生物力学和体育工程学。

通信作者: 龚博琦(1983—), 女, 湖北黄石人, 硕士, 讲师, 研究方向: 田径教学与训练。

膝角、髋角和投掷过程中身体的重心、铅球的移动轨迹有关,通过运动过程中对下肢关节角度的控制,使得器械未出手时身体赶超于器械之前,使最后用力时器械所处的位置到出手点有较长的工作距离,从而获得更好的投掷效果,也就是有助于完成超越器械动作^[14]。超越器械时水平面上的肩髋夹角是反映身体扭转程度的一个重要参数,腹外斜肌是控制身体扭转的关键肌肉,胫骨前肌和腓肠肌是控制足部蹬地的重要肌肉^[15]。对旋转推铅球最后用力阶段的上下肢肌肉的肌电信息分析发现,右侧腹外斜肌、左腿股直肌、右腿股直肌、左腿腓肠肌、右腿腓肠肌是腰腹及下肢肌肉中的主要发力肌群,右三角肌、右胸大肌和右肱三头肌是上肢肌肉中主要发力肌群^[16]。铅球出手瞬间右肩速度的大小可以反映运动员对铅球的加速能力,最后用力阶段的用力顺序是右髋、右肩、右肘、铅球^[17]。通过等速肌力测试发现,投掷臂3个关节屈伸力矩和功率越大,投掷距离越远^[10]。所以,上下肢关节活动度、活动速度、对铅球的有效做功距离、出手速度和肌肉的发力顺序等生物力学特征值是评价铅球投掷水平的重要指标。

原地推铅球是一项在有限空间里需要身体各环节高度配合的运动^[18],在原地推铅球过程中,上下肢关节、肌肉的协调配合会影响动作的完成质量^[19]。目前原地推铅球的教学方法以主观动作指

导为主,缺乏量化生物力学特征参数分析和评价,学生依靠模仿教师动作进行练习,无法深刻理解动作技术要点,成绩提升缓慢或者无法突破瓶颈。而目前对于铅球项目生物力学特征的研究主要集中在下肢的关节和肌肉,少有对上肢的研究。因此本研究基于Vicon三维运动捕捉系统、Kistler三维测力台、Noraxon无线表面肌电设备对原地推铅球动作进行生物力学特征参数采集,对比分析体育高考原地铅球满分和非满分考生的技术动作在运动学、动力学和表面肌电等3方面的差异,研究结果将为提高考生的技术水平提供理论依据。

1 研究对象与方法

1.1 受试对象

如表1所示,本研究招募20名体育学院2022级田径专业新生(男性),其中,满分受试者10名(高考成绩大于12 m)、非满分受试者10名(高考成绩小于10 m)。本实验进行之前对于分组以后学生原地推铅球进行了测试,其中,满分受试者成绩大于12 m、非满分受试者成绩小于10 m。受试者身体状态不影响正常动作发挥。此次测试时所有受试者在此前24 h内未进行高强度训练,且6个月内无上下肢关节运动损伤现象发生,身体状况及运动能力均为正常状态。

表1 受试者基本信息
Tab.1 Basic information of subjects

组别	年龄 /yr	身高 /cm	体重 /kg	成绩 /m
满分组(N=10)	18.4 ± 0.84	180.85 ± 3.30	76.23 ± 4.18	12.85 ± 0.56
非满分组(N=10)	18.9 ± 0.73	177.70 ± 5.47	72.60 ± 4.55	10.00 ± 0.33

1.2 方法

1.2.1 测试仪器

Vicon三维运动捕捉系统(采样频率200 Hz^[20-21],型号T40,Vicon公司,英国)对运动学参数进行采集;采用Kistler三维测力台(采样频率1 kHz^[22],型号9260AA6,Kistler公司,瑞士)对支撑腿和进攻腿的地面反作用力进行采集;Noraxon表面肌电测试系统(采样频率1.5 kHz^[23],型号DTS,Noraxon公司,美国)对选取肌肉表面肌电信号进行采集。

1.2.2 热身准备

本测试已通过学院人体实验伦理审查(审查编

号:2022047),受试者在测试之前接受测试流程注意事项学习。在实验开始前要求所有受试者在跑步机上进行5 min的热身,速度为6.5 km/h^[20,24-25],随后受试者进行后臂伸展、手臂前置后拉、坐式前伸、交叉腿、双边跪膝、屈膝抵胸、站立后扶脚等拉伸练习,拉伸部分包括肩胸肌群、上肢肌群、腰腹肌群、大腿前后肌群、小腿肌群等。受试者热身结束后穿着紧身运动裤,上身裸露,由实验员对受试者的骨性标志点和追踪点进行Marker点的粘贴(本研究在参照Vicon自带的Plug-In Gait 39个点的全身模型的贴点方案基础上,在髋部、大腿、小腿以及足原有骨性标

志点基础上增添了追踪点),根据严格操作流程对测试肌肉的肌腹和电极块表面进行处理后将电极片贴在对应肌肉的皮肤位置上。

1.2.3 数据采集

为了标准化后续试验过程中采集的电生理学数据,首先进行肌肉最大自主收缩(Maximum Voluntary Contraction, MVC)采集。受试者以主观最大抗阻收缩测试肌肉并保持5 s,每块肌肉进行3次测试^[26],每次休息间隔30 s。测试完12块肌肉的MVC之后,针对MVC测试过程中出现的疲劳问题,在给予充分休息时间的同时,一方面给予能量补给,另一方面配备了运动康复专业的学生对受试者所测量的肌肉进行推拿放松,受试者疲劳缓解以后进行原地推铅球动作的数据采集。

利用数字信号转换器使Vicon系统与Kistler系

统同步、利用同步线和端口指令将Vicon与Noraxon肌电设备同步,采集受试者原地推铅球动作的运动学和动力学数据。数据采集时要求受试者双脚分开站立在两块力台上,首先按照人体解剖学姿势打开双臂,采集每名受试者的静态数据;如图1所示,采集完静态数据后,受试者按照原地推铅球的动作要求,身体向右扭转倾斜,压低重心,快速完成侧向推铅球动作,并要求受试者通过压低重心或者旋转身体,保持投掷后身体的稳定,双脚不能超过前方放置泡沫垫(抵趾板替代物)。稳定身体后,受试者快速回到人体解剖学姿态,由一名田径教练对受试者的技术动作进行评判,以确定受试者的测试动作符合原地推铅球的技术要求,本实验采集每名受试者的3次有效技术动作,并计算3次动作的平均值进行数据分析。

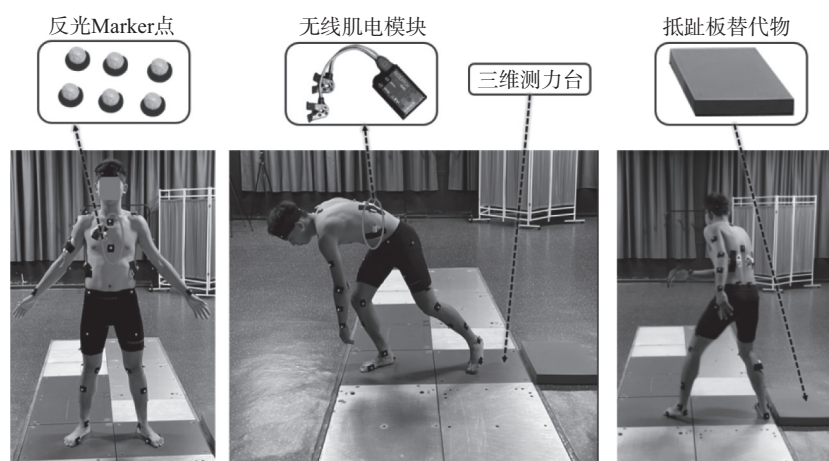


图1 铅球实验现场照片

Fig.1 Shot put experiment site pictures

1.2.4 阶段划分

铅球运动是在一个直径为2.135 m的圆形范围内进行的快速力量运动,该运动可分为准备阶段和投掷阶段^[27]。如图2所示,为了清楚分析满分考生和非满分考生原地推铅球动作的生物力学特征差异性,对原地推铅球动作进行阶段划分。持球站立

时刻(E1):受试者按照人体解剖学方位站立在两块力台上面;转体下压时刻(E2):身体右转下压到最低位置,并保持静止;铅球脱手时刻(E3):铅球脱离投掷手;回收时刻(E4):完成投掷后落地稳定时刻。转体准备阶段(P1):从持球站立时刻末到转体下压时刻初;快速推球阶段(P2):转体下压时刻末到铅

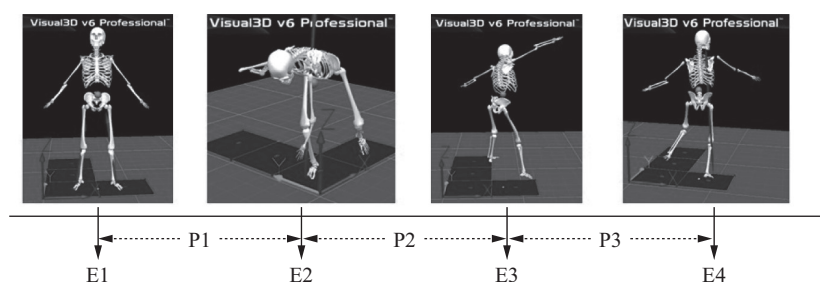


图2 阶段划分图

Fig.2 Phase division picture

球脱手时刻结束; 稳定阶段(P3): 铅球脱手时刻到稳定落地时刻。

1.3 评价指标

铅球的投掷距离受铅球的出手速度、角度和高度的影响, 其中出手速度起决定性作用^[28-29]。铅球的出手速度又是身体各环节协调配合的结果, 身体各环节的协调配合主要通过关节的活动和肌肉的发力来控制。因此, 通过文献调研以及与优秀教练员、

运动员进行讨论, 确定可以通过研究在投掷过程中人体主要关节的运动学和动力学指标、肌肉的表面肌电信号的特征值(包括髋、膝、踝、肩、肘关节的角度、角速度峰值和力矩峰值, 出手速度和重心位移, 以及地面反作用力和主要肌群的募集程度、发力时序等生物力学指标), 对满分组和非满分组的受试者进行比较分析。本研究主要选取的指标如表2和表3所示。

表2 原地推铅球动作分析选取运动学和动力学指标
Tab.2 Kinematic and kinetic indexes selected for action analysis of standing shot put

指标类型	部位	指标名称
运动学	上肢	前后方向右手铅球出手线速度(Right Hand Velocity-X-Axis: RHDV-X)、垂直方向右手铅球出手线速度(Right Hand Velocity-Z-Axis: RHDV-Z)、前后方向左手摆动线速度峰值(Left Hand Velocity-X-Axis: LHDV-X)、左右方向左手摆动线速度峰值(Left Hand Velocity-Y-Axis: LHDV-Y)、垂直方向左手摆动线速度峰值(Left Hand Velocity-Z-Axis: LHDV-Z)、右肘关节伸展角速度峰值(Right Elbow Angular Velocity-X-Axis: REBAV-X)、右肩前屈角速度峰值(Right Shoulder Joint Angular Velocity-X-Axis: RSDAV-X)、前后方向重心位移(Center of Gravity-X-Axis: COG-X)、垂直方向重心位移(Center of Gravity-Z-Axis: COG-Z)、垂直方向胸骨柄上端位移(CLA V-X)、前后方向右手位移(Right Hand Displacement-X-Axis: RHD-X)、垂直方向右手位移(Right Hand Displacement-Z-Axis: RHD-Z)
	下肢	右踝关节跖屈角速度峰值(Right Ankle Angular Velocity-X-Axis: RAKAV-X)、左踝关节跖屈角速度峰值(Left Ankle Angular Velocity-X-Axis: LAKAV-X)、右膝屈曲角度峰值(Right Knee Flexion Angle-X-Axis: RKFA-X)、右膝伸展角速度峰值(Right Knee Extension Angular Velocity-X-Axis: RKEAV-X)、左膝屈曲角度峰值(Left Knee Flexion Angle-X-Axis: LKFA-X)左膝伸展角速度峰值(Left Knee Extension Angular Velocity-X-Axis: LKEAV-X)、右髋伸展角速度峰值(Right Hip Extension Angular Velocity-X-Axis: RHPAV-X)、右髋内旋角速度峰值(Right Hip Rotation Angular Velocity-Z-Axis: RHPAV-Z)、左髋伸展角速度峰值(Left Hip Extension Angular Velocity-X-Axis: LHPAV-X)、左髋内旋角速度峰值(Left Hip Rotation Angular Velocity-Z-Axis: LHPAV-Z)
动力学	上肢	右肘关节伸展力矩峰值(Right Elbow Extension Moment-X-Axis: REBM-X)、右肩关节前屈力矩峰值(Right Shoulder Flexion Moment-X-Axis: RSDM-X)
	下肢	右踝关节跖屈力矩峰值(Right Ankle Moment-X-Axis: RAKM-X)、左踝关节跖屈力矩峰值(Left Ankle Moment-X-Axis: LAKM-X)、右膝关节伸展力矩峰值(Right Knee Extension Moment-X-Axis: RKEM-X)、左膝关节伸展力矩峰值(Left Knee Extension Moment-X-Axis: LKEM-X)、右髋关节伸展力矩峰值(Right Hip Extension Moment-X-Axis: RHPM-X)、右髋关节内旋力矩峰值(Right Hip Rotation Moment-Z-Axis: RHPM-Z)、左髋关节伸展力矩峰值(Left Hip Extension Moment-X-Axis: LHPM-X)、左髋关节内旋力矩峰值(Left Hip Rotation Moment-Z-Axis: LHPM-Z)、前后方向右脚地反力峰值(Right Foot Ground Reaction Force-X-Axis: RGRF-X)、垂直方向右脚地反力峰值(Right Foot Ground Reaction Force-Z-Axis: RGRF-Z)、前后方向左脚地反力峰值(Left Foot Ground Reaction Force-X-Axis: LGRF-X)、垂直方向左脚地反力峰值(Left Foot Ground Reaction Force-Z-Axis: LGRF-Z)

注: 单位: 位移(m)、线速度(m/s)、角度(°)、角速度(°/s)、力矩(N·m/kg)、地反力(BW, 经过体重标准化)

表3 采集肌电信号肌肉表
Tab.3 Muscle names of sEMG signals

序号	肌肉名称	编号	序号	肌肉名称	编号
1	肱二头肌-右	BBR	7	臀大肌-右	GMR
2	肱三头肌-右	TBR	8	股直肌-右	RER
3	三角肌-右	MDR	9	腓肠肌(外侧)右	GAR
4	胸大肌(中)-右	PMR	10	竖脊肌-左	ESL
5	腹外斜肌-右	EOR	11	腹外斜肌-左	EOL
6	竖脊肌-右	ESR	12	臀大肌-左	GML

根据原地推铅球的技术特点, 结合前人的研究基础^[30-33], 本研究选取以下12块肌肉进行表面肌电分析。

1.4 数据处理

通过Vicon自带软件Vicon Nexus 2.9.1将静态下获取的Marker点与Vicon自建模型中的骨性标志点进行匹配连接, 同时对动态下遗漏的Marker点进行补点, 将数据输出为C3D格式导入Visual3D(C-Motion, Inc., Germantown, MD, USA)软件, 建立

原地推铅球的人体全身骨骼静态模型,在Visual3D中导入动态模型进行加载,最后求解运动学和动力学参数。

运动学(动力学)数据采用低通10 Hz(25 Hz)滤波处理^[20,24],地面反作用力和关节力矩经过体重标准化处理,表面肌电数据通过Noraxon软件进行整流、平滑过滤、滤波(带通滤波20—400 Hz)、幅

度归一化处理,计算快速推球阶段肌肉积分肌电值(integral electromyogram, iEMG)^[34]。

关节角度的定义如图3a所示,关节动坐标的选取如图3b所示,足选取实验室坐标系如图3c所示。其中,实验室坐标系为力台上的XYZ坐标系,关节动坐标为各个关节处的坐标系(其中X轴表示冠状轴、Y轴表示矢状轴、Z轴表示垂直轴)。

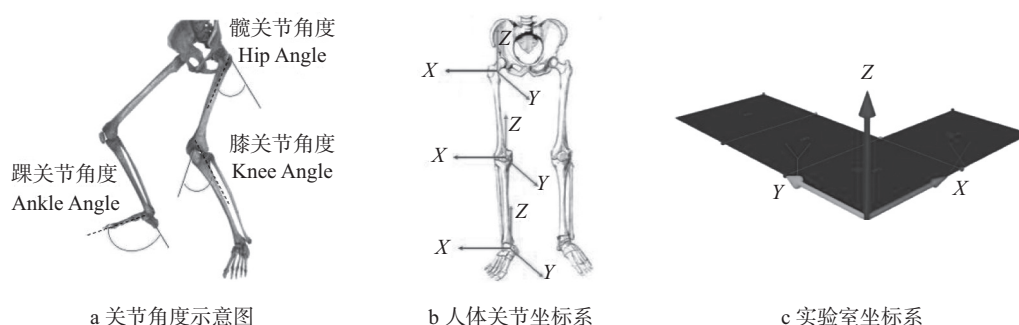


图3 关节角度和坐标系图

Fig.3 Joint angle and coordinate system diagram

1.5 统计学

采用统计学软件SPSS对满分受试者和非满分受试者原地推铅球动作求解的运动学、动力学表面肌电指标参数进行平均值加减标准差($\bar{x} \pm SD$)的求解^[35];采用独立样本 t 检验(Independent Samples t -test)分析两组之间的差异,显著水平设定为 $P < 0.05$ ^[25]。

2 研究结果

2.1 运动学

2.1.1 时间特征

如图4所示,P1和P2阶段非满分组用时都大于

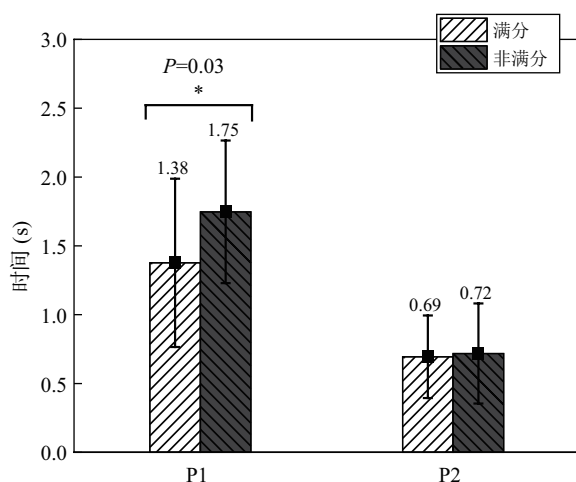


图4 转体准备阶段和快速推球阶段满分组和非满分组用时特征

Fig.4 Characteristics of time spent in full and non-full marks groups during the turn preparation phase and the fast push phase

满分组,且P1阶段($t=-3.05, P<0.05$),两组之间存在显著性差异。

2.1.2 位移特征

如图5所示,快速推球阶段(P2),重心在垂直方向的位移(COG-Z)、重心在投掷方向的位移(COG-X)、右手(投掷手)在投掷方向的位移(RHD-X)、右手在垂直方向的位移(RHD-Z)满分组与非满分组比较差异无统计学意义($P > 0.05$);胸骨柄上端(重要的骨性标志点)在垂直方向的位移(CLAV-Z)满分组小于非满分组($t=-2.11, P < 0.05$)。

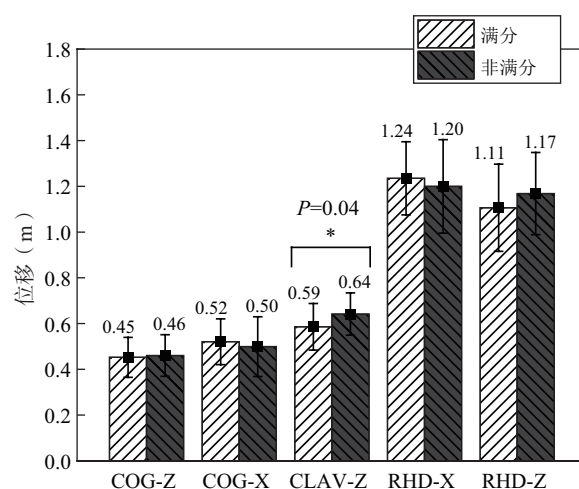


图5 快速推球阶段满分组和非满分组位移特征

Fig.5 Full-mark group and non-full-mark group displacement characteristics during the fast push phase

2.1.3 上肢运动学特征

如图6所示,在快速推球阶段(P2),在投掷方

向铅球出手速度(RHDV-X)、右肩前屈角速度峰值(RSDAV-X)、在垂直方向铅球出手速度(RHDV-Z)、左手在投掷方向的左右方向摆动的线速度峰值(LHDV-Y)、左手在垂直方向摆动的线速度峰值

(LHDV-Z)、右肘关节伸展角速度峰值(REBAV-X)满分组与非满分组比较差异无统计学意义($P > 0.05$); 左手在投掷方向的前后方向的摆动速度峰值(LHDV-X)满分组大于非满分组($t=2.18, P < 0.05$)。

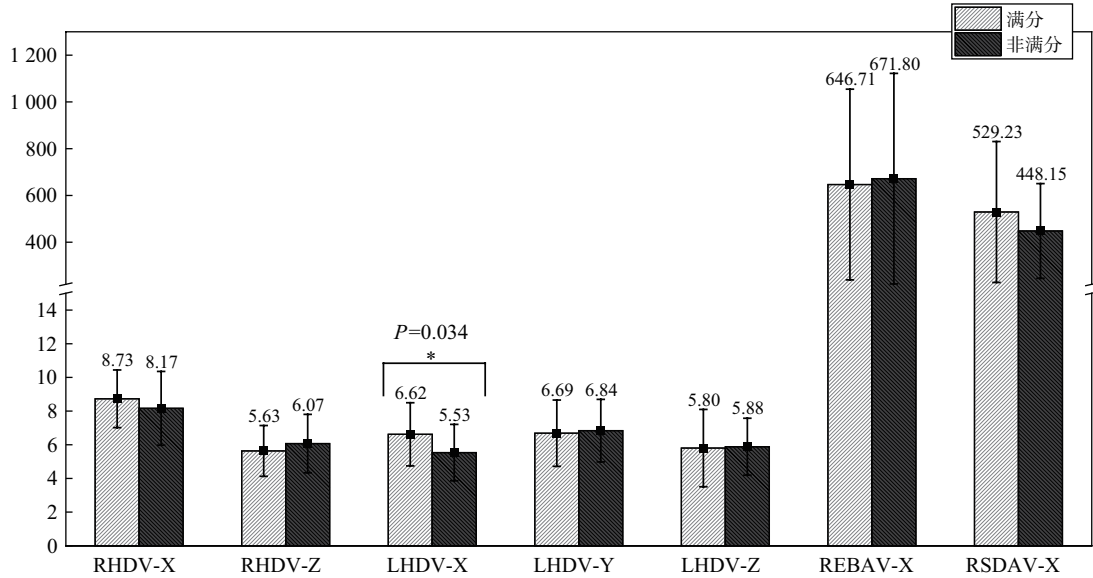


图6 快速推球阶段满分组和非满分组上肢关节运动学特征

Fig.6 Kinematic characteristics of the upper limb joints in full-mark and non-full-mark groups during the fast push phase

注: 角速度单位($^{\circ}/s$), 线速度单位(m/s)

2.1.4 下肢运动学特征

如图7所示, 在快速推球阶段(P2), 右膝关节屈曲角度峰值(RKFA-X)、右髌内旋角速度峰值(RHPAV-Z)、左髌内旋角速度峰值(LHPAV-Z)、左膝关节屈曲角度峰值(LKFA-X)、左髌伸展角速度峰值(LHPAV-X)满分组与非满分组比较差异无统计学意义($P > 0.05$)。右踝关节跖屈角速度峰值大

(RAKAV-X) ($t=-2.32, P < 0.05$)、右髌关节伸展角速度峰值(RHPAV-X) ($t=-2.85, P < 0.05$)满分组小于非满分组; 左踝关节跖屈角速度峰值(LAKAV-X) ($t=2.71, P < 0.05$)、右膝关节伸展角速度峰值(RKEAV-X) ($t=3.17, P < 0.05$)、左膝关节伸展角速度峰值(LKEAV-X) ($t=3.06, P < 0.05$)满分组大于非满分组。

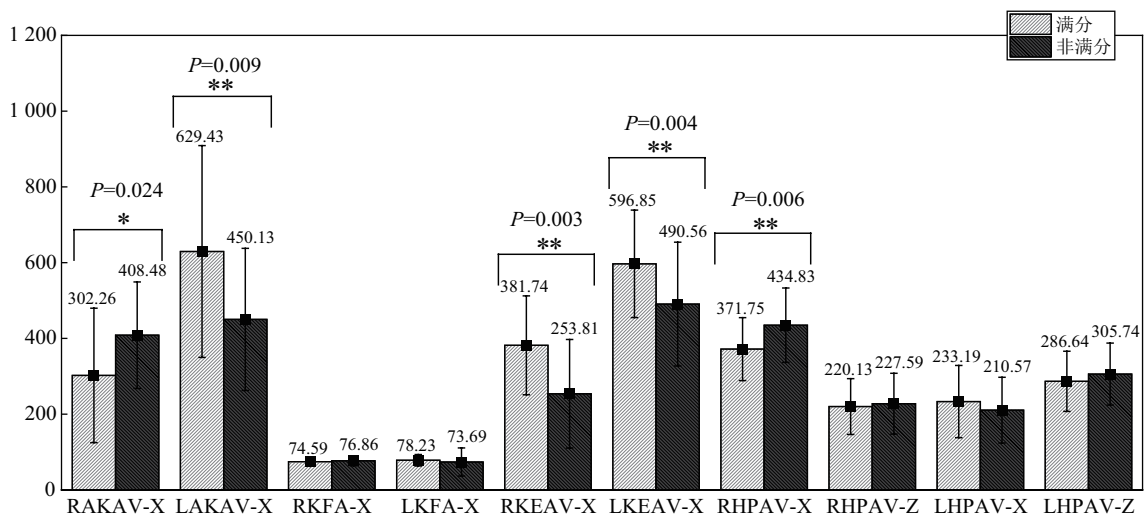


图7 快速推球阶段满分组和非满分组上肢关节运动学特征

Fig.7 Kinematic characteristics of the upper limb joints in full-mark and non-full-mark groups during the fast push phase

注: 角度单位($^{\circ}$), 角速度单位($^{\circ}/s$), 线速度单位(m/s)

2.2 动力学

2.2.1 地反力特征

如图8所示,在快速推球阶段(P2),右脚在投掷方向的前后方向的地反力峰值(RGRF-X)、右脚的垂直地反力峰值(RGRF-Z)、左脚的垂直地反力峰值(LGRF-Z)、左脚在投掷方向的前后方向的地反力峰值(LGRF-X)满分组与非满分组比较差异无统计学意义($P > 0.05$)。

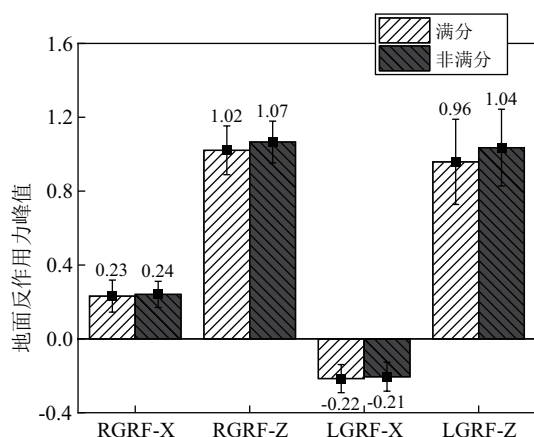


图8 快速推球阶段满分组和非满分组地面反作用力特征

Fig.8 Characteristics of ground reaction forces in full-mark and non-full-mark groups during the fast push phase

2.2.2 上肢动力学特征

如图9所示,在快速推球阶段(P2),右肩关节前屈力矩峰值(RSDM-X)满分组大于非满分组,但两组比较差异无统计学意义($P > 0.05$)、右肘关节伸展力矩峰值(REBM-X)满分组大于非满分组($t=2.19$,

$P < 0.05$)。

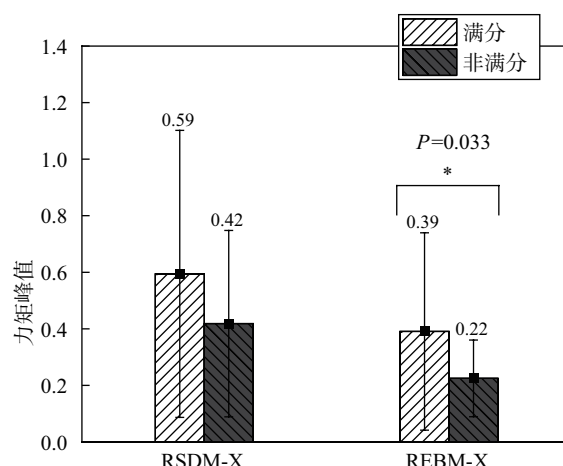


图9 快速推球阶段满分组和非满分组上肢关节动力学特征

Fig.9 Upper limb joint kinetic characteristics of full-mark and non-full-mark groups during the fast push phase

2.2.3 下肢动力学特征

如图10所示,在快速推球阶段(P2),右踝关节跖屈力矩峰值(RAKM-X)、左膝关节伸展力矩峰值(LKEM-X)、左髋关节内旋力矩峰值(LHPM-Z)、左踝关节跖屈力矩峰值(LAKM-X)、右髋关节内旋力矩峰值(RHPM-Z)满分组与非满分组比较差异无统计学意义($P > 0.05$);右膝关节伸展力矩峰值(RKEM-X)满分组小于非满分组($t=-12.07$, $P < 0.05$)、右髋关节伸展力矩峰值(RHPM-X)满分组小于非满分组($t=-2.82$, $P < 0.05$)、左髋关节伸展力矩峰值(LHPM-X)满分组大于非满分组($t=3.08$, $P < 0.05$)。

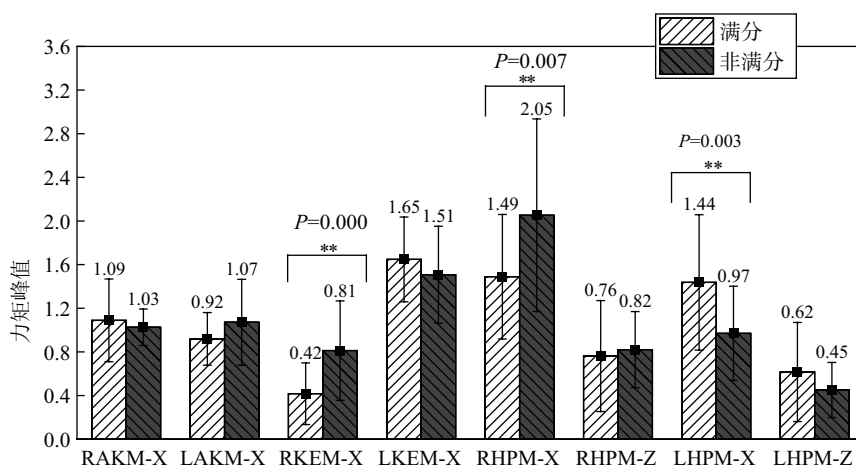


图10 快速推球阶段满分组和非满分组下肢关节动力学特征

Fig.10 Lower limb joint dynamics characteristics of full-mark and non-full-mark groups during the fast push phase

2.3 表面肌电

2.3.1 积分肌电(iEMG)特征

肌肉的积分肌电值(iEMG)可以反应在运动

过程中肌肉被募集的程度。如图11所示,快速推球阶段(P2),在肌肉募集程度的大小方面,满分组募集程度最大的肌肉是左竖脊肌(ESL),其次是右

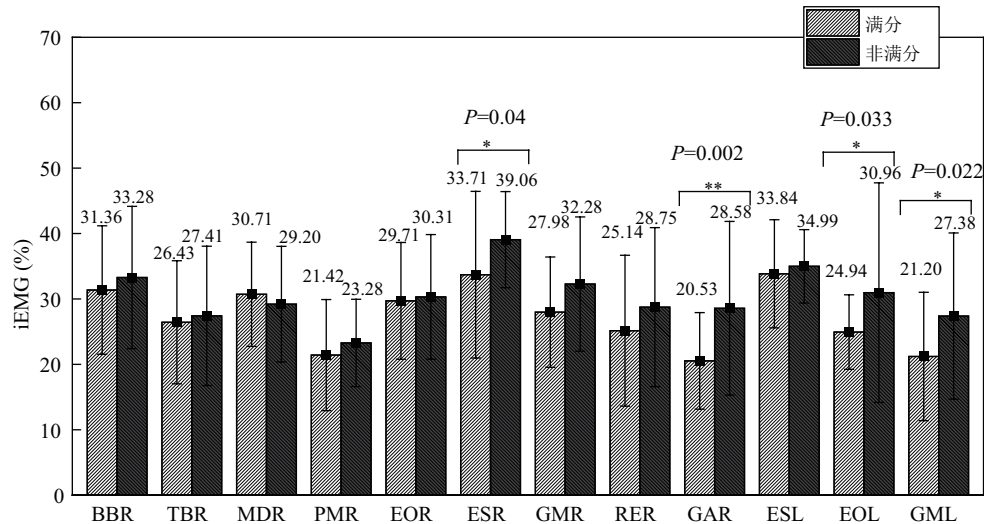


图11 快速推球阶段满分组和非满分组肌群积分肌电值特征

Fig.11 Muscle groups' iEMG values of full-mark and non-full-mark groups during the rapid push phase

竖脊肌(ESR);非满分组募集程度最大的肌肉是右竖脊肌(ESR),其次是左竖脊肌(ESL)。在两组的肌肉募集差异性方面,右竖脊肌(ESR) ($t=-2.09, P<0.05$)、左腹外斜肌(EOL) ($t=-2.17, P<0.05$)、左臀大肌(GML) ($t=-2.35, P<0.05$)、右腓肠肌(GAR) ($t=-3.30, P<0.05$) 满分组小于非满分组。其他所测肌肉的募集程度两组比较差异无统计学意义 ($P>0.05$),在所测试的12块肌肉中,满分组除了右三角肌(MDR)的募集程度大于非满分组之外,其他肌肉的募集程度均不同小于非满分组。

2.3.2 激活时序特征

当肌肉的激活程度超过30%时,定义为肌肉激

活发力的起点^[36]。如图12所示,在快速推球阶段(P2),在肌肉的激活时序方面,前5位的发力肌肉一致依次是:右臀大肌(GMR)、右竖脊肌(ESR)、右腹外斜肌(EOR)、左竖脊肌(ESL)、右肱二头肌(BBR);从第六位开始,满分组依次是:右腓肠肌(GAR)、右股直肌(RER)、右三角肌(MDR)、左腹外斜肌(EOL)、左臀大肌(GML)、右肱三头肌(TBR)、右胸大肌(PMR);非满分组依次是:左臀大肌(GML)、右腓肠肌(GAR)、左腹外斜肌(EOL)、右股直肌(RER)、右三角肌(MDR)、右胸大肌(PMR)、右肱三头肌(TBR)。

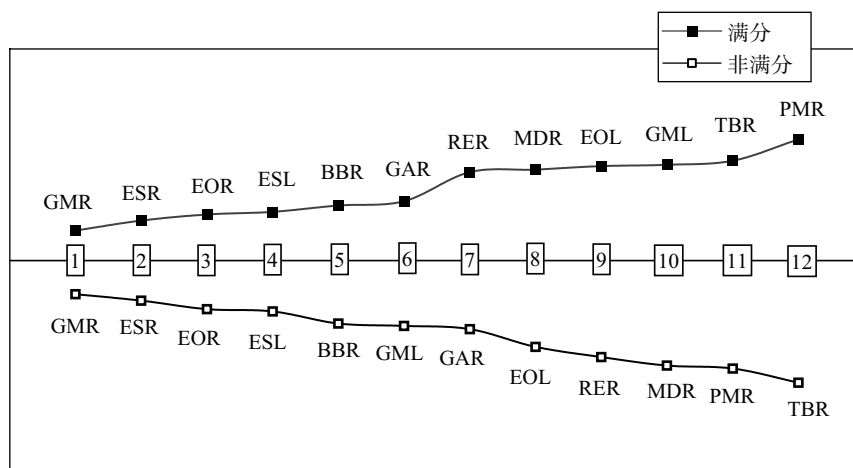


图12 快速推球阶段满分组和非满分组肌群激活时序特征

Fig.12 Muscle groups activation timing characteristics of full-mark and non-full-mark groups during the fast push phase

3 讨论

3.1 运动学特征

推铅球是一项在三维空间内既有前进又有旋转

的运动,投掷过程中人体运动是一个整体的运动,任何一个环节的不足都会影响到整体的效果^[37],身体各关节和环节完成动作的速率会影响人体与铅球相

互作用过程中铅球的机械性能^[38]。如图4中所示,非满分组受试者在转体准备阶段(P1)用时大于满分组,且两组比较存在显著性差异,该阶段身体向右扭转并倾斜,右膝弯曲,重心降低并压在弯曲的右腿上,该阶段用时的差异体现满分组对准备动作具有更快速的反应。铅球脱手前推力的大小与施加力的距离和时间有关,施加力的距离越长、时间越短,铅球获得的机械能越高^[39]。要使原地推铅球获得较大的出手速度,首先是要充分增加对铅球的工作距离,其次是在充分增加工作距离的基础上用最大的爆发力在最短的时间内完成投掷动作^[40]。本研究结果与前人的研究结果一致,在快速推球阶段(P2),满分组对铅球的做功距离大于非满分组,而做功时间比非满分组短,说明满分组在快速推球阶段给铅球传递了更大的机械功率。

重心位置受人体姿态的影响较大,因此选取人体胸骨柄上端的CLAV骨性标志点在垂直方向的位移来对比分析两组受试者在快速推球阶段身体在垂直方向的起伏变化。非满分组在垂直方向的身体起伏(CLAV-Z)大于满分组,由于在投掷过程中身体要在水平面上进行一定幅度的旋转,使得铅球从身体后侧移动到前侧,铅球在水平方向的位移(RHD-X)满分组大,而在垂直方向的位移(RHD-Z)非满分组大。说明非满分组较大的身体起伏(CLAV-Z)使得铅球在垂直方向的位移(RHD-Z)也增大,对铅球在垂直方向的做功也增多,在人体输出的总功不变的情况下,对铅球在水平方向的做功就会减少,就容易形成铅球飞的高,但飞行距离短的现象。如图4所示,原地推铅球过程中,受试者在不到1 s的时间内完成快速推球动作。当受试者向右转体身体下压到最低位置时,通过下肢的蹬伸和左臂的预摆牵引使躯干获得向左转动的扭转力矩。左臂的摆动使得肩部得到预拉伸,此阶段左臂的向前和向上摆对右肩的牵引至关重要^[41]。躯干的扭转主要发生在水平面上,左臂的摆动速度可以通过左手在3个方向上的速度体现,结合原地推铅球的技术特点,左手在投掷方向(X轴)上的摆动速度对肩部的扭转影响最大,从图6中可以发现,左手在前后方向速度峰值(LHDV-X)满分组大于非满分组,且存在显著性差异,说明对于左手而言,在快速推球阶段的预摆动作中在前后方向速度(LHDV-X)会影响投掷的成绩。

因此,在原地推铅球训练过程中,可以通过增大非投掷手在投掷方向上的摆动速度使投掷侧获得更大的扭转力矩,从而获得更大的推力。

在快速推球阶段(P2),右腿的快速蹬伸使身体获得向前和向上的动量,同时完成超越器械动作。如图7所示,在右侧的运动链上,髋、膝、踝关节的伸展角速度峰值满分组与非满分组比较存在显著性差异,且除了膝关节伸展角速度峰值(RKEAV-X)之外,踝关节跖屈角速度峰值(RAKAV-X)和髋关节伸展角速度峰值(RHPAV-X)满分组均小于非满分组,说明满分组着重于使用膝关节的快速伸展来提高铅球的移动速度,并且也获得更好的投掷距离。左腿为最后出手时刻提供支撑作用的同时通过髋关节的内旋和伸展、膝关节的伸展和踝关节的跖屈,使得铅球出手时刻获得最优的出手高度^[42-44],而原地推铅球用时较短,需要受试者左侧下肢关节具有较高的关节运动角速度来实现。如图7所示,从左腿髋、膝、踝关节的角速度峰值的差异可以发现,在快速推球阶段(P2)满分组受试者在左侧支撑期时,踝关节具有更高的跖屈角速度峰值、膝关节具有更高的伸展角速度峰值,从而使身体快速上升获得更好的出手高度。

3.2 动力学特征

原地推铅球过程中强有力的左侧肢体蹬伸用力是加长人体对铅球的工作距离,提高铅球出手速度的可靠保障^[37],左侧腿支撑制动与蹬伸用力除了可以提高铅球的出手速度,还可以影响出手角度^[43]。原地推铅球动作的移动幅度较小,受试者主要完成在投掷方向(X轴)和垂直方向(Z轴)上对铅球做功,能量主要通过左、右脚与地面之间的相互作用而获得,最后通过关节力矩向上传递^[20]。关节力矩值的大小也可以反映关节在运动过程中两侧肌肉的发力大小,如图9和图10所示,在快速推球阶段(P2)通过比较满分组与非满分组右肩前伸力矩峰值(RSDM-X)、右肘伸展力矩峰值(REBM-X)、右膝伸展力矩峰值(RKEM-X)、右髋伸展力矩峰值(RHPM-X)、右髋内旋力矩峰值(RHPM-Z)的数据差异性发现,非满分组受试者存在右侧下肢的用力较大,右侧上肢用力不足的特点。而左侧下肢除了在最后出手时刻提供支撑外,还通过下肢3关节的伸展提高异侧(右侧)上肢的高度,而使铅球获得较好

的出手高度。满分组左膝伸展力矩峰值(LKEM-X)、左髌伸展力矩峰值(LHPM-X)均大于非满分组,说明满分组受试者在铅球出手时刻,左侧下肢的用力强于非满分组,并且通过左侧下肢的有效发力给右侧上肢的投掷提供了较好的空间位置。

3.3 表面肌电特征

原地推铅球属于田径运动中的力量速度型项目,需要在最短时间内以最大的速度以合适的角度推出,投掷过程是一种典型的快速动作,它的速度和力量依赖于参与动作的肌肉产生力量和产生力量的爆发能力^[45]。肌肉产生的力是人体活动的内在动力,各肌肉协同或拮抗共同影响动作的完成。每块参与动作的肌肉,其肌肉募集产生生物电形成的肌电图是目前观察肌肉活动的主要途径,积分肌电(iEMG)在一定程度上反映了肌肉在各个动作阶段的放电总量,体现的是肌肉总的激活和募集程度。

在对铅球项目下肢表面肌电的研究成果中指出,右腹外斜肌(EOR)、右腓肠肌(GAR)、右股直肌(RER)是铅球投掷过程中募集程度较大的肌肉^[42]。本研究中,如图11所示,通过MVC标准化的iEMG特征可以发现在下肢肌群中,右竖脊肌(ESR)、左竖脊肌(ESL)、右腹外斜肌(EOR)是募集程度较大的肌肉,与前人的研究结果不一致,原因可能是选取的肌肉数量和种类有一定差异。在前人研究结果中募集程度较大的肌肉中右腓肠肌(GAR)满分组与非满分组之间存在显著性差异,同时右竖脊肌(ESR)、左腹外斜肌(EOL)、左臀大肌(GML)的募集程度也存在显著性差异,但都是满分组小于非满分组。也有研究指出,投掷侧三角肌的募集程度是影响投掷距离的关键因素^[46-47],在原地推铅球的快速推球阶段(P2),满分组除了三角肌(MDR)的募集程度大于非满分组之外,其他11块肌肉的募集程度都小于非满分组,验证了三角肌对于投掷类项目的重要性,建议非满分组考生尝试通过加强投掷过程中三角肌的发力来提高投掷距离。非满分组虽然其他肌群的募集程度较高,但就原地推铅球项目而言,肌肉的发力顺序对投掷距离也有较大影响^[19]。

肌肉和关节的正确参与顺序有助于投掷距离达到最大^[48],为了达到最佳的投掷表现,原地推铅球需要先使用腿部肌肉来产生力量,然后通过身体的转动,最后才由肩部和手臂肌肉发力来推动和控制

铅球的投掷^[46]。

如图12所示,在快速推球阶段(P2),受试者从向右的转体下压到往左的转体投掷过程中,首先发力的是保持身体向右侧转体下压的肌肉,如右臀大肌、右竖脊肌、右腹外斜肌、左竖脊肌和保持持球动作的右肱二头肌,因此满分组与非满分组的肌肉激活时序在此阶段一致。根据动力链的传递路径,在投掷阶段首先是下肢肌肉发力,通过躯干带动上肢运动,然后再通过身体的制动降低人体运动的速度而使铅球获得更高的出手速度^[39],因此最合理的发力方式是从下肢关节到上肢关节,由近端向远端^[46]。满分组受试者的发力方式为右腓肠肌(GAR)收缩使右踝关节跖屈蹬地,右股直肌(RER)收缩膝关节伸展和左腹外斜肌(EOL)收缩使身体重心向上提升和向左转体,同时右三角肌(MDR)收缩上臂前屈,左臀大肌(GML)紧随其后的收缩完成左侧支撑时髋关节的后伸动作提高出手高度,其后是右肱三头肌(TBR)快速收缩肘关节前伸推球,最后为右胸大肌(PMR)收缩使上臂内收伸直制动,将动量传递给铅球。通过对比分析非满分组的肌肉激活时序发现,左臀大肌(GML)、左腹外斜肌(EOL)、右胸大肌(PMR)过早收缩发力,导致下肢力量未完全传递到上肢时,左侧下肢开始起支撑作用,抵挡了从右侧下肢传递而上的力。同时,上肢右胸大肌(PMR)早于右肱三头肌(TBR)收缩,使得上臂提前内收,增大了铅球在投掷方向左侧的移动速度,从而分散了在投掷方向的速度增量。

4 结论

第一,在快速推球阶段,非满分组存在投掷方向上的水平出手线速度、左手在投掷方向上的预摆线速度和右肩关节的前伸角速度不足;第二,在快速推球阶段,非满分组存在右侧下肢用力较大、右侧上肢用力不足的特点,原因是该阶段末期左侧下肢提前进入支撑状态,抵消了右侧下肢向上传导的力;第三,在快速推球阶段,右侧三角肌的募集程度较低是导致非满分组投掷距离较低的主要原因,同时左臀大肌、左腹外斜肌提早发力影响到右侧动力链的传导;右胸大肌的提早发力使得上臂提前内收,增大了铅球在投掷方向左侧的移动速度,抵消了在投掷方向的部分速度增量。

参考文献:

- [1] 郑文迪. 广东省体育高考“原地推铅球”的考生考训现状分析与优化路径研究[D]. 广州: 广州体育学院, 2020.
- [2] 何瑞华. 备战里约奥运会国家女子铅球集训队推铅球技术的运动学与动力学研究[D]. 北京: 首都体育学院, 2017.
- [3] 甄文华, 胡海平, 曲淑华. 第26届世界大学生选拔赛男子铅球运动员投掷技术运动学分析[J]. 北京体育大学学报, 2012, 35(11): 115-119, 144.
- [4] 马谦. 对我国优秀铅球运动员过渡阶段主要技术特征的研究[J]. 北京体育大学学报, 2008(7): 994-996.
- [5] 阳剑. 我国优秀男子铅球运动员推铅球技术动作的运动学研究[J]. 北京体育大学学报, 2010, 33(5): 55-58.
- [6] 李凤玉. 躯干支柱力量训练对湖北省体育高考生原地推铅球运动成绩影响的实验研究[D]. 武汉: 武汉体育学院, 2022.
- [7] CIACCI S, MERNI F, SEMPRINI G, et al. Shot Put: Which Role for Kinematic Analysis? [J]. Applied Sciences, 2022, 12(3): 1699.
- [8] JUDGE L W, BELLAR D, THRASHER A B, et al. A pilot study exploring the quadratic nature of the relationship of strength to performance among shot putters [J]. International journal of exercise science, 2013, 6(2): 171.
- [9] 黎涌明, 申霖. 能量供应与能量利用——不同运动水平男子皮艇运动员测功仪1000 m模拟比赛的能力差异[J]. 体育学研究, 2018, 1(3): 79-86.
- [10] 苑廷刚, 王国杰, 郑富强, 等. 我国优秀女子铅球运动员投掷臂三关节等速肌力特征[J]. 中国运动医学杂志, 2015, 34(7): 688-691.
- [11] 余章彪, 郭宾. 背向滑步推铅球最后用力时躯干运动的生物力学分析[J]. 首都体育学院学报, 2010, 22(4): 89-92, 96.
- [12] 单信海. 铅球飞行参数即时反馈系统的研制及铅球投掷技术的理论研究[D]. 北京: 北京体育大学, 2001.
- [13] 董海军, 马屹, 丛玉珍, 等. 中外优秀男子铅球运动员旋转投掷技术对比[J]. 医用生物力学, 2021, 36(4): 534-539.
- [14] 杨瑞鹏, 李金刚, 陈小龙. 优秀女子铅球运动员滑步阶段下肢技术的运动学分析[J]. 体育学刊, 2011, 18(5): 102-105.
- [15] 曹杰. 旋转推铅球动作的肌电、足底受力及运动学特征分析[J]. 山东体育学院学报, 2013, 29(6): 57-61.
- [16] 孙威, 贾刚. 旋转推铅球最后用力阶段肌肉用力特征的sEMG分析[J]. 山东体育学院学报, 2014, 30(1): 77-79.
- [17] 董海军, 苏明理, 严波涛, 等. 我国优秀女子铅球运动员最后用力技术特征研究[J]. 中国体育科技, 2009, 45(4): 37-41.
- [18] GUTIÉRREZ-DAVILA M, ROJAS J, CAMPOS J, et al. Biomechanical analysis of the shot put at the 12th IAAF World Indoor Championships [J]. New Studies in Athletics, 2009, 24(3): 45-61.
- [19] YSO-UKLA SKA B, B A KIEWICZ M, KWACZ M, et al. Muscle force patterns in lower extremity muscles for elite discus throwers, javelin throwers and shot-putters-a case study [J]. Journal of Human Kinetics, 2021, 78(1): 5-14.
- [20] 刘林, 马勇, 蒯世杰, 等. 跆拳道运动员前横踢动作优势侧和非优势侧的生物力学偏侧性研究[J]. 武汉体育学院学报, 2023, 57(1): 73-81.
- [21] 臧宇, 许贻林, 项晓琰, 等. 高水平短跑运动员跳深动作表现分析: 下肢关节生物力学视角[J]. 体育科学, 2023, 43(1): 41-49.
- [22] 石林, 韩冬, 郭炜, 等. 基于可变阻力训练的复合式训练对大学生篮球运动员下肢运动表现的影响[J]. 体育学研究, 2022, 36(4): 98-107.
- [23] 姚军威, 韦俏丽, 马勇, 等. 基于Anybody的足球运动员大角度侧切下肢生物力学仿真分析[J]. 中国运动医学杂志, 2022, 41(1): 9-16.
- [24] 彭骞, 刘林, 马勇. 不同重量级别跆拳道运动员旋风踢动作的下肢各关节净力矩特征分析[J]. 医用生物力学, 2021, 36(S1): 235.
- [25] 刘海瑞, 傅维杰, 伍颢, 等. 单腿落地时优势腿与非优势腿的生物力学偏侧性研究[J]. 体育科学, 2014, 34(8): 70-76.
- [26] 熊凯文, 徐蕾, 程珊, 等. 基于表面肌电的模拟飞行时坐姿致腰部肌肉疲劳的研究[J]. 航天医学与医学工程, 2018, 31(6): 590-594.
- [27] KATO T, MAEDA K E I, MIZUSHIMA J U N. Comparison between rotational and glide techniques in shot put based on the performance analysis of competitions [J]. Journal of Physical Education & Sport, 2023, 23(5).
- [28] 王倩, 周华锋, 刘茂辉, 等. 对两名不同水平男子铅球选手投掷技术的生物力学分析[J]. 北京体育大学学报, 2007(3): 404-406.
- [29] 刘建国, 蒋国勤. 世界优秀女子铅球运动员竞技表现过程的稳定性研究[J]. 武汉体育学院学报, 2014, 48(2): 80-83, 92.
- [30] 刘立清. 李玲背向滑步推铅球技术力学及肌电特征研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [31] 李延军, 孙有平, 隋新梅, 等. 旋转推铅球过渡阶段肌肉用力特征的sEMG分析[J]. 北京体育大学学报, 2010, 33(5): 50-54, 65.
- [32] 孙有平, 隋新梅, 钱风雷, 等. 基于sEMG的男子旋转推铅球运动员单支撑阶段肌肉用力特征研究[J]. 体育科学, 2010, 30(1): 44-50.
- [33] 唐小燕. 我国优秀女子铅球运动员滑步技术与最后用力特征的运动学分析[D]. 西安: 西安体育学院, 2018.
- [34] 杨洋. 紧身装备对跑步疲劳前后下肢生物力学特征及肌肉协同控制模式的影响[D]. 上海: 上海体育学院, 2022.
- [35] 吉彦廷, 宋雅伟, 李森. 青少年女子举重运动员腰骶关节的有限元建模及椎间盘生物力学分析[J]. 体育学研究, 2020, 34(5): 76-86.
- [36] 熊启亮. 婴幼儿膝爬运动功能发育状态对肌肉收缩及关节运动协同模式的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [37] 刘建国, 李永辉, 王淑芳, 等. 我国优秀铅球运动员左侧技术对整体技术影响的三维运动学分析[J]. 中国体育科技, 1999(10): 3-7.
- [38] YOUNG M, LI L. Athletics: determination of critical

parameters among elite female shot putters[J]. Sports Biomechanics, 2005, 4(2): 131-148.

- [39] MASTALERZ A, SADOWSKI J. Variability of Performance and Kinematics of Different Shot Put Techniques in Elite and Sub-Elite Athletes—A Preliminary Study[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(3): 1751.
- [40] 辛锋, 孟明亮. 第12届全运会女子铅球运动员最后用力技术的运动学研究[J]. 西安体育学院学报, 2015, 32(2): 252-256.

(注: 由于版面限制, 参考文献[41-49]略, 如需查询, 请与作者联系。)

作者贡献声明:

刘林: 实验设计、安排, 数据采集、分析, 论文撰写;
马勇: 实验设计, 论文构架, 论文修改, 资金支持; 龚博琦: 受试者召集, 实验指导, 技术监督, 论文指导, 资金支持; 贾孟尧: 实验数据采集; 王兆毅: 实验数据采集; 黄锐峰: 实验数据采集; 郑伟涛: 实验设计, 论文修改。

Biomechanical Characteristics of In-Situ Shot Put Action in Sports College Entrance Examination

LIU Lin^{1,2,3}, MA Yong^{1,2,3}, GONG Boqi⁴, JIA Mengyao^{1,2,3}, WANG Zhaoyi^{1,2,3}, HUANG Ruifeng^{1,2,3}, ZHENG Weitao^{1,2,3}

(1. Engineering Research Center of Sports Health Intelligent Equipment of Hubei Province, Wuhan Sports University, Wuhan, 430079, China; 2. Research Center of Sports Equipment Engineering Technology of Hubei Province, Wuhan Sports University, Wuhan, 430079, China; 3. Key Laboratory of Sports Engineering of General Administration of Sport of China, Wuhan Sports University, Wuhan, 430079, China; 4. School of Physical Education, Wuhan Sports University, Wuhan, 430079, China)

Abstract: This study aims to provide scientific guidance for improving the performance of the standing shot put by comparing and analyzing the differences in biomechanical characteristics parameters of the in situ shot put technique between candidates who participated in the physical education entrance examination with full marks and non-full marks. The kinematic, kinetic and surface EMG data of two groups of subjects during the throwing process were obtained by Vicon 3D motion capture system, Kistler 3D dynamometer and Noraxon surface EMG test equipment, and the peak angular velocities and peak moments of the hip, knee, ankle, shoulder and elbow joints, the strike velocity and center of gravity displacement, as well as the calculation of ground reaction forces and biomechanical indices such as the degree of recruitment of major muscle groups and the timing of force generation were calculated and compared between the two groups of subjects during the rapid pushing phase. The results suggest: 1) kinematics: The peak precession line velocity (LHDV-X) of the left hand, peak plantarflexion angle velocity (LAKAV-X) of the left ankle, peak extension angle velocity (RKEAV-X) of the right knee, peak extension angle velocity (LKEAV-X) of the left knee in the full marks group were greater than the non-full marks group ($P < 0.05$), and the peak trunk displacement (CLAV-Z), right ankle peak plantarflexion angular velocity (RAKAV-X), and right hip peak extension angular velocity (RHPAV-X) were smaller than the non-full group ($P < 0.05$); 2) Kinetics: The left hip peak extension moment (LHPM-X) of the full marks group was larger than the non-full group ($P < 0.05$), and the right knee peak extension moment (RKEM-X) and right hip peak extension moment (RHPM-X) of the full group were smaller than the non-full group ($P < 0.05$); 3) sEMG: the right erector spinae (ESR), left external abdominal oblique muscle (EOL), left gluteus maximus (GML), and right gastrocnemius (GAR) of the full marks group were smaller than the non-full group ($P < 0.05$). It is therefore concluded that compared with the full marks group, the deficiencies in horizontal exit velocity, right shoulder forward flexion angle velocity, left hand pre-swing line velocity in the throwing direction, right upper extremity force and right deltoid recruitment degree were the main reasons for the smaller throwing distance of the non-full group. Early activation of the left gluteus maximus, left external abdominal oblique, and right pectoralis major were the main reason for the lack of upper body force and lower horizontal exit velocity in the non-full group.

Key words: sports college entrance examination; standing shot put; kinematics; kinetics; iEMG; activation timing