



## 4×100 m接力接棒运动员起跑方式运动学及动力学特征分析

### Kinematics and Dynamics Analysis of Starting Techniques for 4×100 m Relay Athletes

陈锡航<sup>1\*</sup>,周玉斌<sup>2</sup>

CHEN Xihang<sup>1\*</sup>,ZHOU Yubin<sup>2</sup>

**摘要:**短跑4×100 m接力比赛中,接棒运动员主要采用站立式或单臂支撑的蹲踞式(单撑式)起跑,国际田联2018—2019规则将4×100 m接力区改为30 m,接棒运动员的起跑将影响到比赛成绩,为探究这两种起跑方式的运动学及动力学特征,使用1台高速摄影机和2块三维测力台采集14名短跑运动员在使用单撑式起跑和站立式起跑时的运动学及动力学数据并进行分析。结果:1)单撑式起跑相比站立式起跑的运动学差异是起动-蹬离时间及前腿和后腿蹬伸时间较短,预备姿势时的重心较低且靠前、前腿髋关节与膝关节角较小、躯干前倾角较大,重心垂直位移距离较长,重心水平位移距离较短,离地瞬时水平速度及瞬时合速度较慢,瞬时垂直速度较快( $P<0.05$ );2)单撑式起跑相比站立式起跑的动力学差异是总水平冲量、总垂直冲量、后腿水平冲量、后腿垂直冲量、前腿水平冲量、前腿垂直冲量、垂直合力峰值、前腿水平力峰值、前腿垂直力峰值、前腿垂直发力率较低;水平合力峰值、后腿水平力峰值、后腿水平发力率、后腿垂直发力率、前腿水平发力率较高( $P<0.05$ );3)两种起跑方式的前腿冲量、峰值力、蹬伸时间均比后腿大,且前、后腿发力率具有差异性( $P<0.05$ )。结论:1)运动员使用站立式起跑具有离地瞬时水平速度快的优势,这与预备姿势重心偏后、双腿蹬伸力作用时间较长使总水平冲量较大有关;2)运动员使用单撑式起跑具有起动至蹬离时间短的优势,这与预备姿势重心靠前、蹬伸水平合力峰值较高、双腿水平发力率较高有关,但单撑式起跑离地瞬时水平速度较慢;3)无论运动员使用单撑式或站立式起跑,前腿产生水平冲量的能力对离地瞬时水平速度起更大作用。

**关键词:**4×100 m接力;站立式;单臂支撑的蹲踞式;短跑

**Abstract:** The relay athletes mainly use standing or single-arm supported crouch start (single-arm supported) in the 4×100 m relay race, the international association of athletics federations (IAAF) 2018—2019 rule modifies the 4×100 m relay zone to 30 m, the start of the relay athletes will affect the performance of the game. To explore the kinematic and dynamic characteristics of these two starting techniques, the kinematic and dynamic data of 14 sprinters with single-arm supported and standing start were collected and analyzed with a high speed camera and two 3D force-measuring platforms. Results: 1) The kinematic difference between the single-arm supported start and the standing start is as follows: start-off time, front leg and rear leg extension time are shorter, center of gravity is lower and more forward when preparing for posture, the hip and knee joint angle of the front leg is small, large anteversion angle of the torso, the center of gravity has a long vertical displacement distance and the center of gravity has a short horizontal displacement distance, the instantaneous horizontal speed and instantaneous combined speed of the ground are slower, and the instantaneous vertical speed is faster ( $P<0.05$ ); 2) the dynamic difference between single-arm supported and standing is as follows: Total horizontal impulse, total vertical impulse, rear leg horizontal impulse, rear leg vertical impulse, front leg horizontal impulse, front leg vertical impulse, vertical resultant force peak, fore leg horizontal force peak, front leg vertical force peak, front leg vertical rate of force development is lower, horizontal resultant force peak, rear leg horizontal force peak, rear leg horizontal rate of force development, rear leg vertical rate of force development, front leg horizontal rate of force development is higher

#### 基金项目:

中央高校基本科研业务费专项资金项目(2021MS061)

#### \*通信作者简介:

陈锡航(1993-),男,硕士,讲师,主要研究方向为运动训练,E-mail:786028450@qq.com。

#### 作者单位:

1. 华北电力大学,北京 102206;
2. 北京体育大学,北京 100084
1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Beijing Sport University, Beijing 100084, China.

( $P < 0.05$ ); 3) the front leg's impulse, peak force and extension time of the two starting techniques are larger than the rear leg, the two legs have different rate of force development ( $P < 0.05$ ). Conclusion: 1) The athlete's use of the standing start has the advantage of being faster than the instantaneous horizontal speed of the ground, this is related to the fact that the center of gravity of the preparatory posture is later, and the time of stretching of the legs is longer, which makes the total horizontal impulse larger; 2) the athlete's use of the single-arm supported has the advantage of a short start-off time, which is related to the front of the preparatory posture, the higher horizontal force peak of the legs and the higher horizontal rate of force development of the legs, but the single-arm supported starting horizontal speed is slower; 3) whether the athletes use single-arm supported start or standing start, the ability of the front leg to produce a horizontal impulse plays a greater role in the speed of the instantaneous horizontal speed from the ground.

**Keywords:** 4×100 m relay; standing start; single-arm supported crouch start; sprint

**中图分类号:** G822.7 **文献标识码:** A

4×100 m接力是我国田径重点发展项目(苏炳添等, 2019),如今“接力促单项”策略取得明显成效。2020东京奥运会男子4×100 m接力决赛,中国队以37.79 s追平全国纪录并可能获得铜牌(第2名英国队因违反《反兴奋剂规则》可能被取消成绩),苏炳添100 m半决赛以9.83 s打破亚洲纪录闯入决赛,实现历史性突破。

国际田径联合会(International Association of Athletics Federation, IAAF)2017年发布的2018—2019田径竞赛规则将4×100 m接力区的长度修改为30 m,把旧规则中10 m预跑区设为接力区的一部分。4×100 m接力比赛中,合理的棒次安排、高效的交接棒技术、恰当的交接棒时机等因素至关重要(曾理等,2012; Ward-Smith et al., 2002)。新规则让运动员可以更早完成交接棒,为队伍的棒次安排及比赛战术提供了更多选择。因此,接棒运动员的起跑将影响到比赛成绩。

4×100 m接力接棒运动员主要采用站立式或单臂支撑的蹲踞式(单撑式)进行起跑,通过比赛录像统计发现,2008—2021年4届奥运会男、女4×100 m比赛,获得前3名队伍中的72名接棒运动员,49人选择单撑式起跑,23人选择站立式起跑。中国男子接力队在东京奥运会平全国纪录以及在里约奥运会打破亚洲纪录的比赛中,接棒运动员均使用单撑式起跑。而中国队在亚洲的主要竞争对手日本队,在里约奥运会打破亚洲纪录并获亚军以及2019年多哈田径世锦赛打破亚洲纪录并获季军的比赛中,接棒运动员均使用站立式起跑。从中、日两队来看,同队3名接棒运动员都使用相同的起跑方式,并未根据起跑方式特点及运动员自身特点做出区分。

已有对4×100 m接力的研究主要为交接棒技术(张守伟等,2009;郑建华等,1999)、交接棒时间(汤作夫清等,1997)、交接棒时的速度-时间状态(曾理等,2012; Ward-Smith et al., 2002)、标志距离与棒次安排(Radford et al., 2003; Suchy, 2012)以及接力战术(陈鹏程等,2017)等,对接棒运动员起跑方式的研究较少,且对起跑方式的

研究主要为蹲踞式与站立式起跑下肢肌电及动力学对比(李永智,2002)、蹲踞式和站立式起跑位移速度对比(Ostarello, 2001; Salo et al., 2004; Schultz, 1973)以及单独对蹲踞式或站立式起跑的运动学研究(王国杰等,2019; 马杰等,2017; Debaere et al., 2013; Slawinski et al., 2013)、动力学研究(陈锡航,2019; Mero, 1988; Otsuka et al., 2014)、相关性研究(Standing et al., 2017)及表面肌电研究(王延鹏,1995),对单撑式起跑的相关研究较少(Bonnehchere et al.2014; Haugen et al., 2012)。

在新规则下,接棒运动员起跑方式的选择对比赛成绩具有重要意义。因此,本研究旨在分析单撑式起跑与站立式起跑的运动学及动力学特征。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 实验受试者

北京体育大学14名短跑运动员作为实验受试者,包括1名国际健将级运动员、3名健将级运动员、8名一级运动员、2名二级运动员。受试者年龄 $23.4 \pm 2.1$ 岁,身高 $177.4 \pm 6.0$  cm,体重 $68.50 \pm 6.76$  kg,其中有2名女性以及1名男性俄罗斯人、1名男性泰国人。林某某为2014年亚运会及第13届全运会4×100 m接力冠军,杨某某为第13届全运会400 m、4×400 m接力冠军,另有3名运动员获得过全国大奖赛、锦标赛等赛事前3名,14名受试者均参加过全国大学生及以上级别的4×100 m接力比赛。

### 1.2 实验设备

动力学数据选用2台瑞士产Kistler 9281EA三维测力台进行采集,数据采集频率为1 000 Hz,所用软件为BioWare 5.1.0.0,测力台固定于北京体育大学田径馆测力台专用凹槽中,测力台四周空隙为2 mm,由于运动员穿钉鞋进行实验,因此,在测力台表面铺设塑胶跑道垫。

运动学数据使用1台高速摄影机进行二维平面定点定焦拍摄,拍摄频率为200 Hz,分辨率1 280×720,摄影机摆放在距离跑道中线左侧3 m、高1 m处,摄影机主光轴

正对 2 块测力台中点并垂直于运动平面。

### 1.3 测试流程

每一次起跑测试前,在确保测力台周围 1 m 范围内无人的情况下,实验人员先进行测力台的“清零”校准操作,校准完毕后开始测试。受试者在预备姿势时,将前、后足分别置于相邻的两块测力台上,并用粉笔在受试者足尖处画标记点,以确保在使用两种方式起跑时双腿足间距相同,在单撑式起跑时,支撑臂在测力台外的地面支撑。受试者听到发令声后,以设定的起跑方式尽全力起跑。每种方式起跑两次,按 ABBA 或 BAAB 顺序完成,每次起跑间歇 3 min 以上。

### 1.4 数据处理

#### 1.4.1 运动学数据处理

将拍摄的原始录像导入北京体育大学的视讯软件进行解析,选择扎齐奥尔斯基模型计算人体重心,使用软件自带的低通滤波平滑对数据进行平滑处理,平滑频率 10 Hz。由于 4×100 m 接棒运动员的起跑线在身后,设定运动员预备姿势时的后足着地点后端为起点。

本研究选取的运动学参数为:起动-蹬离时间、前后腿蹬伸时间、腾空时间、重心高度、重心至起点水平距离、重心水平位移距离、重心垂直位移距离、离地瞬时速度、躯干前倾角(躯干与躯干上方地面垂线的夹角)、髋关节角、膝关节角、膝关节角。

#### 1.4.2 动力学数据处理

动力学数据使用 Bioware 5.1.0.0 软件导出至 Excel 中完成相应参数的计算。由于短跑起跑主要在运动员矢状面的二维运动平面中完成,因此,设定运动员跑进方向为水平正方向,重力方向为垂直负方向,动力学数据仅使用水平方向的力  $F_x$  和垂直方向的力  $F_z$  进行相关参数的计算,动力学计算结果按运动员身体质量进行标准化处理。

本研究选取的动力学参数为:水平冲量、垂直冲量、水平地面反作用力、垂直地面反作用力、水平发力率、垂直发力率。

冲量是力对时间的积累效应( $F\Delta t$ )的量度,计算公式:

$$I = \int \frac{(F_t + F_{t+1})}{2} \Delta t$$

力的峰值指运动员在起跑蹬伸时产生的地面反作用力最大值。

发力率指单位时间内力的增加量,即力量-时间曲线的斜率,也称发力率或力的梯度。本研究选用从起动时刻至蹬力峰值的力量差值与所用时间的比值计算发力率:

$$RFD = \frac{F_{max} - F_{start}}{\Delta t}$$

#### 1.4.3 作图

为了对比运动员采用两种技术动作产生的地面反作

用力等参数的曲线波形,以开始起跑蹬伸时前腿或后腿蹬伸至离地时刻的时间为 100%,将所有数据导入 Origin-Pro 2018C 进行 3 次样条插值,之后取 1% 标准化时刻的数值进行处理(施宝兴,2005;钟运健等,2011)。

#### 1.4.4 时刻界定

设定双腿蹬伸的水平合力开始上升并超过一定阈值时为运动员的起动时刻,阈值为运动员预备姿势时选取 100 ms 稳定水平合力计算的平均值加 2 倍标准差(Bezodis et al., 2010, 2014)。设定 2 块测力台垂直合力小于 10 N 为界定离地时刻的阈值(Otsuka et al., 2014)。

### 1.5 统计学方法

将处理后的数据导入 SPSS 19.0 软件中,对运动员在使用单撑式起跑与站立式起跑时的数据进行配对样本  $t$  检验,设定  $P < 0.05$  为 2 组数据的差异具有统计学意义,各数值以平均值 ± 标准差( $M \pm SD$ )表示。

## 2 结果

### 2.1 单撑式起跑与站立式起跑运动学参数

表 1 显示,运动员在使用单撑式起跑时,相比站立式起跑,起动-蹬离时间、前腿蹬伸时间、后腿蹬伸时间较短,且差异具有统计学意义( $P < 0.05$ )。运动员在预备姿势时,单撑式相比站立式重心高度、前腿髋关节角、前腿膝关节角更低或更小,单撑式重心至起点水平距离、躯干前倾角相比站立式较大,且差异具有统计学意义( $P < 0.05$ )。在起跑离地时刻,两种起跑方式的身体重心及各关节角度的差异不具有统计学意义( $P > 0.05$ )。重心位移距离为预备姿势身体重心到离地时刻身体重心的距离,单撑式起跑的重心垂直位移距离较长,站立式起跑的水平位移距离较长,且差异具有统计学意义( $P < 0.05$ )。运动员采用单撑式起跑的离地瞬时水平速度及瞬时合速度相比站立式较慢,瞬时垂直速度较快,且差异具有统计学意义( $P < 0.05$ )。

### 2.2 单撑式起跑与站立式起跑动力学参数

运动员使用单撑式起跑时的总水平冲量、总垂直冲量、垂直合力峰值、后腿水平冲量、后腿垂直冲量、前腿水平冲量、前腿垂直冲量、前腿水平力峰值、前腿垂直力峰值、前腿垂直发力率相比站立式较低,且差异具有统计学意义( $P < 0.05$ );运动员使用单撑式起跑时的水平合力峰值、后腿水平力峰值、后腿水平发力率、后腿垂直发力率、前腿水平发力率相比站立式较高,且差异具有统计学意义( $P < 0.05$ )(表 2)。两种起跑方式双腿蹬伸产生的水平方向和垂直方向的地面反作用力曲线波形均为双波峰、单波谷(图 1)。

### 2.3 前腿与后腿运动学、动力学参数

运动员使用单撑式起跑时,前腿与后腿参数进行比较,前腿蹬伸时间较长,在水平方向上,前腿产生的水平

冲量较大、蹬伸时间较长、水平力峰值较大,而水平发力大、垂直力峰值较大,以上差异均具有统计学意义( $P < 0.05$ ,表3)。

表1 4×100 m接力接棒运动员单撑式与站立式起跑运动学参数

运动学参数	单撑式	站立式	$t$	$P$
起动-蹬离时间/s	0.525±0.080	0.790±0.166	-9.539	0.000*
后腿蹬伸时间/s	0.317±0.065	0.580±0.170	-8.877	0.000*
前腿蹬伸时间/s	0.525±0.080	0.790±0.166	-9.539	0.000*
第一腾空时间/s	0.104±0.023	0.097±0.027	1.630	0.115
离地瞬时水平速度/(m·s <sup>-1</sup> )	3.41±0.35	3.73±0.26	4.339	0.000*
离地瞬时垂直速度/(m·s <sup>-1</sup> )	0.75±0.26	0.61±0.19	2.231	0.035*
离地瞬时合速度/(m·s <sup>-1</sup> )	3.49±0.35	3.79±0.26	-3.898	0.001*
重心水平位移距离/m	0.73±0.06	0.94±0.07	15.852	0.000*
重心垂直位移距离/m	0.17±0.05	0.07±0.04	10.484	0.000*
预备姿势				
重心高度/m	0.62±0.04	0.73±0.05	-12.571	0.000*
重心至起点水平距离/m	0.70±0.10	0.52±0.10	-8.145	0.000*
躯干前倾角/(°)	109.5±4.4	92.0±6.6	12.262	0.000*
前腿髌关节角/(°)	43.0±6.0	56.3±9.7	-6.872	0.000*
前腿膝关节角/(°)	113.0±8.2	134.4±8.1	-13.246	0.000*
后腿髌关节角/(°)	74.5±11.4	76.6±15.7	-0.606	0.550
后腿膝关节角/(°)	124.2±13.3	124.3±13.4	-0.020	0.984
离地时刻				
重心高度/m	0.84±0.05	0.84±0.05	-0.271	0.789
重心至起点水平距离/m	0.83±0.07	0.83±0.05	0.156	0.877
躯干前倾角/(°)	63.2±7.7	61.5±9.2	1.492	0.148
支撑腿髌关节角/(°)	149.7±26.6	158.3±10.6	-1.736	0.094
支撑腿膝关节角/(°)	159.4±19.4	164.7±6.1	-1.355	0.187
摆动腿髌关节角/(°)	61.2±26.3	59.6±9.5	0.336	0.739
摆动腿膝关节角/(°)	87.4±21.8	85.4±9.5	0.499	0.622

注:\*为 $P < 0.05$ ,2组数据的差异具有统计学意义,下同。

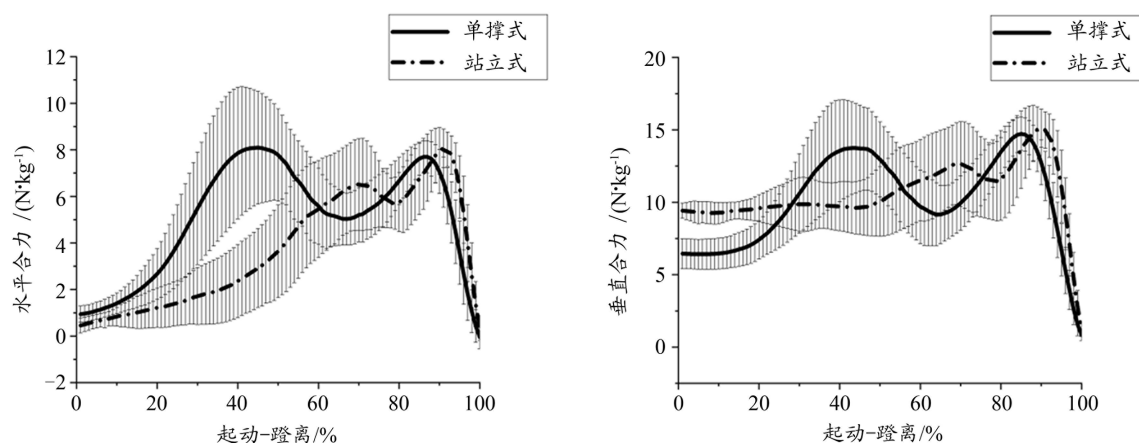


图1 4×100 m接力接棒运动员单撑式与站立式起跑双腿蹬伸产生的地面反作用力合力

Figure 1. Ground Reaction Force Generated by the Speed Force of the Legs of the 4×100 m Relay Athletes

表 2 4×100 m 接力接棒运动员单撑式与站立式起跑动力学参数

动力学参数	单撑式	站立式	<i>t</i>	<i>P</i>
总水平冲量/(Ns·kg <sup>-1</sup> )	2.51±0.37	2.83±0.25	-4.739	0.000*
总垂直冲量/(Ns·kg <sup>-1</sup> )	5.18±1.09	8.38±1.54	-10.768	0.000*
水平合力峰值/(N·kg <sup>-1</sup> )	9.74±1.53	9.18±0.87	2.077	0.049*
垂直合力峰值/(N·kg <sup>-1</sup> )	16.41±1.27	17.31±1.25	-3.067	0.005*
后腿				
水平冲量/(Ns·kg <sup>-1</sup> )	0.79±0.25	0.90±0.32	-2.293	0.030*
垂直冲量/(Ns·kg <sup>-1</sup> )	1.58±0.47	2.51±0.87	-6.281	0.000*
水平力峰值/(N·kg <sup>-1</sup> )	5.75±2.33	4.75±1.72	2.774	0.010*
垂直力峰值/(N·kg <sup>-1</sup> )	10.50±3.54	10.44±3.09	0.108	0.915
水平发力率/(N·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	26.82±15.85	11.16±4.74	5.546	0.000*
垂直发力率/(N·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	54.82±38.47	27.11±13.98	3.757	0.001*
前腿				
水平冲量/(Ns·kg <sup>-1</sup> )	1.72±0.42	1.93±0.35	-2.912	0.007*
垂直冲量/(Ns·kg <sup>-1</sup> )	3.61±1.04	5.87±1.58	-9.003	0.000*
水平力峰值/(N·kg <sup>-1</sup> )	7.13±1.30	7.99±0.84	-3.424	0.002*
垂直力峰值/(N·kg <sup>-1</sup> )	14.59±2.82	16.14±1.71	-2.409	0.023*
水平发力率/(N·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	15.27±4.57	12.09±2.76	2.930	0.007*
垂直发力率/(N·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	42.44±14.67	49.11±13.32	-2.421	0.023*

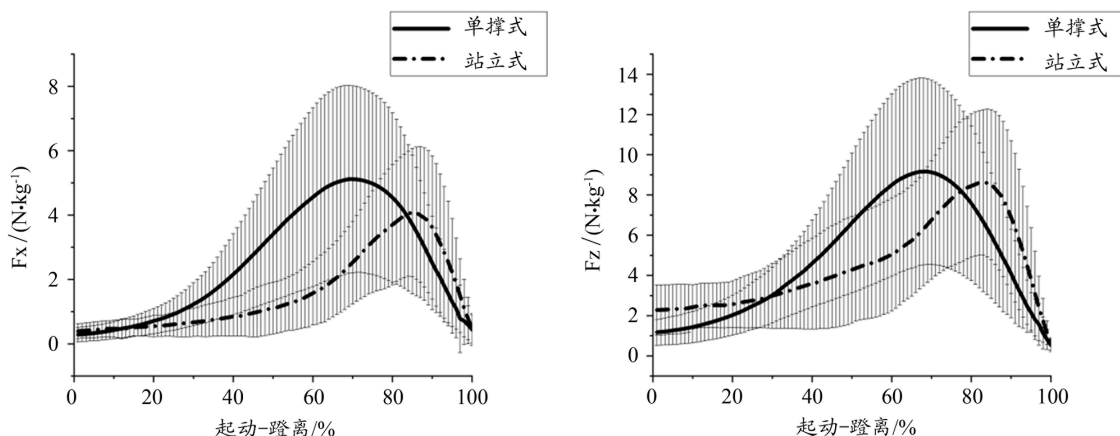


图 2 4×100 m 接力接棒运动员后腿水平(Fx)与垂直(Fz)方向地面反作用力  
Figure 2. Horizontal (Fx) and Vertical (Fz) Ground Reaction Force of Rear Leg of the 4×100 m Relay Athletes

运动员使用站立式起跑时,前腿与后腿参数进行比较,前腿蹬伸时间较长,在水平方向上,前腿产生的水平冲量较大、蹬伸时间较长、水平力峰值较大;在垂直方向上,前腿产生的垂直冲量较大、垂直力峰值较大、垂直发力率较大,差异均具有统计学意义( $P < 0.05$ ,表 3)。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 预备姿势特征及分析

运动员使用单撑式起跑时,预备姿势身体重心相比站立式更靠前更低,这与预备姿势时的身体关节角度差异有关。运动员使用单撑式起跑在预备姿势时,重心至起点的水平距离相比站立式较远(表 1),由于起点设定为

运动员后足着地点后端,并且要求运动员使用站立式和单撑式时的双腿足间距相同,因此,重心至起点的水平距离越远,重心相对双腿支撑点则越靠前。从运动员的躯干前倾角和下肢大关节角度对比来看,单撑式时的躯干前倾角更大,并且前腿的髋关节角、膝关节角要比站立式小。关节角度的差异是让重心降低与前移的主要因素,并且单撑式增加了单臂支撑,更利于身体重心前移,在一定范围内,预备姿势的身体重心较低和较靠前有利于产生更大的水平地面反作用力峰值(李永智,2002;马杰等,2017;王泽峰等,2018)。

#### 3.2 离地瞬时速度特征及分析

运动员使用站立式起跑时的离地瞬时水平速度与瞬

时合速度相比单撑式起跑更快,这与站立式起跑双腿蹬伸产生的总水平冲量较大有关。茅鹏(2013)研究认为,支撑阶段是运动员获得位移速度的关键阶段,离地瞬时水平速度是支撑阶段加速效果的衡量标准。速度是由冲量决定的,根据动量定理,当物体从静止起动且质量一定时,速度与冲量大小成正比,运动员使用站立式起跑时产

生的总水平冲量大于单撑式起跑,因此,出现了运动员使用站立式起跑离地瞬时水平速度较快的结果,这一结果与Salo等(2004)研究中站立式起跑离地瞬时速度快于蹲踞式起跑的结果相近。影响冲量大小的因素有力的作用时间、力的峰值、单位时间内力的增量(发力率)以及波峰波谷的变化形态(刘宇,2010)。

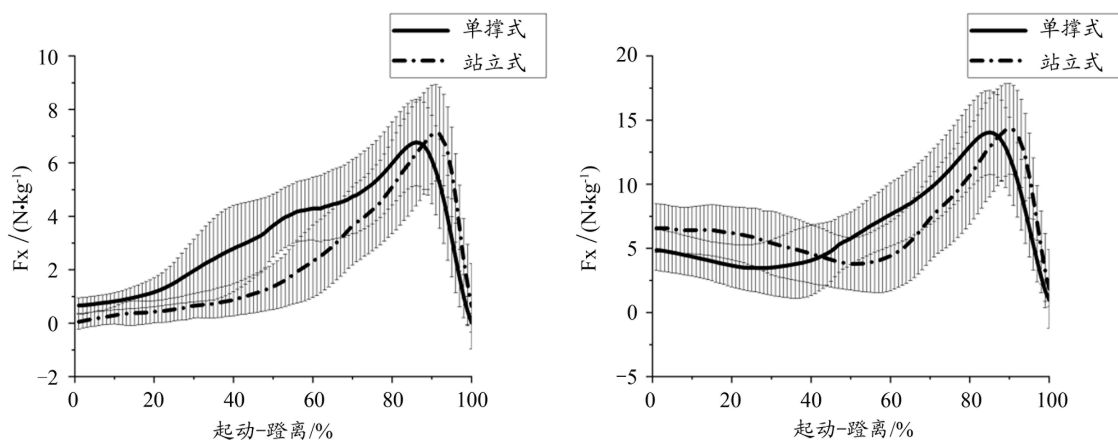


图3 4×100 m接力接棒运动员前腿水平(F<sub>x</sub>)与垂直(F<sub>z</sub>)方向地面反作用力

Figure 3. Horizontal (F<sub>x</sub>) and Vertical (F<sub>z</sub>) Ground Reaction Force of Front Leg of the 4×100 m Relay Athletes

表3 4×100 m接力接棒运动员两种起跑方式前腿与后腿参数

Table 3 Parameters of the Front and Rear Legs on the Two Startings of the 4×100 m Relay Athletes

参数	前腿	后腿	<i>t</i>	<i>P</i>
单撑式				
蹬伸时间/s	0.525±0.080	0.317±0.065	-42.618	0.000*
水平冲量(Ns·kg <sup>-1</sup> )	1.72±0.42	0.79±0.25	-8.466	0.000*
水平力峰值(N·kg <sup>-1</sup> )	7.13±1.30	5.75±2.33	-2.738	0.011*
水平发力率(N·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	15.27±4.57	26.82±15.85	4.404	0.000*
垂直冲量(Ns·kg <sup>-1</sup> )	3.61±1.04	1.58±0.47	-8.878	0.000*
垂直力峰值(N·kg <sup>-1</sup> )	14.59±2.82	10.50±3.54	-4.900	0.000*
垂直发力率(N·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	42.44±14.67	54.82±38.47	1.738	0.094
站立式				
蹬伸时间/s	0.790±0.166	0.580±0.170	-44.822	0.000*
水平冲量(Ns·kg <sup>-1</sup> )	1.93±0.35	0.90±0.32	-8.516	0.000*
水平力峰值(N·kg <sup>-1</sup> )	7.99±0.84	4.75±1.72	-7.389	0.000*
水平发力率(N·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	12.09±2.76	11.16±4.74	-1.045	0.306
垂直冲量(Ns·kg <sup>-1</sup> )	5.87±1.58	2.51±0.87	-8.602	0.000*
垂直力峰值(N·kg <sup>-1</sup> )	16.14±1.71	10.44±3.09	-7.249	0.000*
垂直发力率(N·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	49.11±13.32	27.11±13.98	-6.742	0.000*

### 3.3 冲量相关参数特征及分析

运动员使用站立式起跑时,蹬伸力的作用时间较长是其产生较大总水平冲量的主要原因。虽然单撑式起跑产生的总水平冲量较低,但其起动至蹬离的时间短,这或许与较大的水平合力峰值、水平发力率以及较短的重心水平位移距离有关。运动员起跑过程中,使用站立式起跑的蹬伸作用力时间较长。作用力的时间取决于作用力

推进身体重心加速的距离和作用力的大小。由于两种起跑方式在离地时刻的重心至起点水平距离无明显差异,且使用站立式起跑时身体重心相比单撑式起跑在水平方向上更偏后,因此,站立式起跑时的重心水平位移距离较长,较长的位移距离提供了更长的加速时间(刘宇,2010)。

单撑式起跑产生的水平合力峰值要比站立式起跑

高。马杰等(2017)、王泽峰等(2018)研究认为,重心与前脚跖趾关节水平距离在一定范围内越大越有利于增大水平蹬力。单撑式的预备姿势重心至起点水平距离更长,且同一运动员两种方式起跑时的两足间距相同,因此,预备姿势的重心与前脚跖趾关节水平距离要比站立式更大,这也是造成单撑式水平合力峰值较大的原因之一。另外,李永智(2002)研究发现,蹲踞式起跑产生的水平力峰值比站立式起跑高,且两种方式起跑时下肢肌肉活动顺序及肌电活动时间与幅度存在差异,单臂支撑的蹲踞式起跑和站立式起跑可能也存在肌电活动方面的差异,进而导致蹬力峰值出现差异。

发力率或力的梯度(Rate of Force Development, RFD)主要反映运动员爆发力能力(刘宇,2010;曲峰等,2007)。前、后腿在水平方向上的发力率均是单撑式起跑更大,运动员在使用单撑式起跑时表现出了较大的爆发力。两种方式起跑双腿蹬伸产生的地面水平合力的曲线形态均为双波峰、单波谷曲线波形。双波峰的出现主要源于前腿和后腿蹬伸产生峰值力的时间不同,从前后腿蹬伸时间与作用力曲线图对照可知,后腿能较早产生水平蹬力峰值,前腿产生水平蹬力峰值则较晚。从地面水平合力曲线波形中可以看出,站立式起跑水平合力第一波峰之前存在作用力、斜率较低的一段曲线,约占蹬伸期 50%,而单撑式起跑水平合力第一波峰之前,作用力、斜率较低的曲线仅占蹬伸期约 10%,表明运动员使用站立式起跑时的预备姿势不利于快速产生较大力量。

#### 3.4 前腿与后腿参数特征及分析

运动员在起跑时,前腿产生冲量的能力在更大程度上决定了总冲量大小,这与前腿蹬伸作用力时间较长且产生的峰值力较大有关。运动员起跑产生的总冲量由前腿与后腿蹬伸产生的冲量构成。运动员在使用单撑式起跑和站立式起跑时,两种方式前腿产生的水平力峰值和垂直力峰值均要大于后腿,且前腿蹬伸力的作用时间均长于后腿,这与蹲踞式起跑前腿蹬力峰值较大且蹬伸时间较长的结果相同。因此,使用这两种方式起跑时,前腿产生的两方向冲量均比后腿产生的大。虽然单撑式起跑后腿水平发力率比前腿大,但并未对冲量大小造成明显影响。另外,前腿产生的水平冲量(1.72 Ns/kg、1.93 Ns/kg)占总水平冲量(2.51 Ns/kg、2.83 Ns/kg)约 69%,因此,前腿蹬伸产生的水平冲量占总水平冲量的主要部分。

#### 3.5 研究局限性

站立式起跑时下肢产生的总垂直冲量以及前、后腿的垂直冲量均比单撑式大,且产生的垂直合力峰值、前腿垂直力峰值、前腿垂直发力率也大于单撑式起跑,此结果也印证了预备姿势重心偏后会增加垂直力峰值的观点(马杰等,2017;王泽峰等,2018),但由于只采集了两种起跑方式的下肢动力学数据,缺少单撑式支撑臂产生的

垂直冲量数据,因此,结果中的垂直冲量无法用于评价离地瞬时垂直速度,仅作为两种起跑方式的下肢参数对比。

在使用测力台采集动力学数据过程中需要铺设塑胶跑道垫,塑胶跑道垫会与周围地面发生力学作用而影响数据精度,但两种起跑方式是在相同实验条件下进行的,因此,采集的数据可以用于对比研究。

#### 3.6 对后续研究展望

单撑式起跑时的离地瞬时垂直速度要比站立式快。较快的离地瞬时垂直速度会增加腾空时间,但两种技术在腾空时间上没有明显差异,可能是由于两种方式在第 2 步的支撑阶段存在技术动作差异,此问题有待后续进一步研究。

本研究仅对单撑式、站立式起跑的第 1 步进行了运动学、动力学研究,关于两种起跑方式的表面肌电特点、运动控制机制以及起跑后 30 m 接力区内的特征等方面有待进一步的研究。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

1) 运动员使用站立式起跑时,具有离地瞬时水平速度快的优势,这与站立式的预备姿势重心偏后,重心水平位移距离较大,使双腿有较长的蹬伸力作用时间,进而产生了较大的总水平冲量有关。

2) 运动员使用单撑式起跑时,具有起动至蹬离时间短的优势,这与预备姿势重心靠前、重心水平位移距离短、双腿蹬伸产生的水平合力峰值较高、双腿水平方向发力率较高有关。但由于使用单撑式时双腿蹬伸作用力时间短,产生的总水平冲量低,导致离地瞬时水平速度较慢。

3) 无论运动员使用单撑式或站立式起跑,前腿产生水平冲量的能力对离地瞬时水平速度的快慢起更大作用,这与前腿蹬伸产生的水平力峰值及作用力时间相比后腿更大、更长有关。

### 4.2 建议

1) 运动员在选用站立式起跑时,为了获得更快的离地瞬时水平速度,可以将预备姿势时的重心进一步后移,增加重心水平位移距离,进而增加蹬伸力的作用时间,使水平方向总冲量增大。

2) 运动员使用单撑式或站立式起跑时,前腿蹬伸产生的水平力峰值更大且作用时间更长,建议运动员将优势腿作为预备姿势的前腿。

3) 单撑式起跑时,双腿蹬伸具有更大的水平发力率,适合爆发力强的运动员使用。

4) 站立式起跑或许适合绝对速度快,且速度保持能力强的运动员。运动员选用站立式起跑时具有更快的离地瞬时水平速度,或许能在较短的距离内加速到交接棒

所需的位移速度,运动员可更早完成交接棒,进而增加此名接棒运动员的持棒跑动距离。

5)接棒运动员起跑至交接棒时刻的时间包含起动-蹬离时间和加速时间,且在一定程度上决定了预跑标志点距离。单撑式起跑具有较短的起动-蹬离时间,预跑标志点距离相比站立式起跑应适当缩短,但仍要根据运动员的实际加速能力进行调整。

#### 参考文献:

陈鹏程,阿英嘎,2017.日本男子4×100米接力队技战术研究:基于“双子模型”理论视角[J].山东体育学院学报,33(5):105-108.

陈锡航,2019.两种摆动腿技术下蹲踞式起跑加速运动学及动力学研究[D].北京:北京体育大学.

李永智,2002.2种不同起跑动作的生物力学实验研究[J].中国体育科技,38(5):54-55.

刘宇,2010.生物力学在运动控制与协调研究中的应用[J].体育科学,30(11):62-73.

马杰,王泽峰,代强,2017.我国男子百米运动员苏炳添起跑加速技术研究[J].山东体育学院学报,33(2):92-97.

茅鹏,2013.论步幅:张培萌的步幅嫌小吗?[J].体育与科学,34(6):37-40.

曲峰,张美珍,尹彦,等,2007.测力台测试方法及分析指标的筛选[C]//第十二届全国运动生物力学学术交流大会.太原:中国体育科学学会.

苏炳添,邓民威,徐泽,等,2019.新时代中国男子100 m短跑:回顾与展望[J].体育科学,39(2):22-28.

施宝兴,2005.短跑途中跑支撑阶段运动学与动力学特征新研究[J].广州体育学院学报,25(2):53-59.

汤作夫清,沼泽秀夫,江道吉,等,1997.优秀短跑运动员4×100 m接力时间分析[J].中国体育科技,(9):28-32.

王国杰,苏炳添,章碧玉,等,2019.优秀短跑运动员苏炳添的技术优化训练研究[J].成都体育学院学报,45(6):82-87.

王延鹏,1995.试用肌电图分析短跑起跑技术肌肉用力特点[J].西安体育学院学报,12(3):84-85.

王泽峰,何文捷,王新娜,等,2018.我国优秀男子百米运动员起跑加速技术分析[J].中国体育科技,54(5):108-111,145.

曾理,梁建平,王磊,2012.4×100 m接力中交接棒时段速度-时间曲线状态特征的分析[J].首都体育学院学报,24(2):165-169.

张守伟,孟立嘉,赵鹏,等,2009.田径项目4×100 m接力下压式和上挑式的特征比较[J].北京体育大学学报,32(1):133-135.

郑建华,崔文惠,1999.4×100 m接力跑高效率传接棒技术要点分析[J].西安体育学院学报,16(4):58-59.

钟运健,刘宇,魏书涛,等,2011.优秀短跑运动员途中跑时下肢关节力矩及肌群功率分析[J].中国运动医学杂志,30(1):26-31.

BEZODIS N E, SALO A I, TREWARTHA G, 2010. Choice of sprint start performance measure affects the performance-based ranking within a group of sprinters: Which is the most appropriate measure? [J]. Sports Biomech, 9(4):258-286.

BEZODIS N E, SALO A I, TREWARTHA G, 2014. Lower limb joint kinetics during the first stance phase in athletics sprinting: Three elite athlete case studies[J]. J Sports Sci, 32(8):738-746.

BONNECHERE B, BEYER B, ROOZE M, et al., 2014. What is the safest sprint starting position for american football players? [J]. J Sports Sci Med, 13(2), 423-429.

DEBAERE S, DELECLUSE C, AERENHOUTS D, et al., 2013. From block clearance to sprint running: Characteristics underlying an effective transition[J]. J Sports Sci, 31(2):137-149.

HAUGEN T A, TØNNESSEN E, SEILER S K, 2012. The difference is in the start: Impact of timing and start procedure on sprint running performance[J]. J Strength Cond Res, 26(2), 473-479.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ATHLETICS FEDERATION, 2017. IAAF Competition Rules 2018—2019[M]. Monaco: Imprimerie Multiprint.

MERO, ANTTI, 1988. Force-time characteristics and running velocity of male sprinters during the acceleration phase of sprinting[J]. Res Q Exerc Sport, 59(2):94-98.

Ostarello A, 2001. Effectiveness Of Three Sprint Starts: A Longitudinal Case Study[C]// Biomechanics Symposia 2001. San Francisco: University of San Francisco.

OTSUKA M, SHIM J K, KURIHARA T, et al., 2014. Effect of expertise on 3D force application during the starting block phase and subsequent steps in sprint running [J]. J Appl Biomech, 30(3):390-400.

RADFORD P F, WARD-SMITH A J, 2003. The baton exchange during the 4 x 100 m relay: A mathematical analysis[J]. J Sports Sci, 21(6):493-501.

SALO A, BEZODIS I, 2004. Which starting style is faster in sprint running: Standing or crouch start?[J]. Sports Biomech, 3(1):43-53.

SCHULTZ J R, 1973. A comparison of the standing start with the crouch start in sprinters[D]. La Crosse: University of Wisconsin-La Crosse.

SLAWINSKI J, DUMAS R, CHEZE L, et al., 2013. Effect of postural changes on 3d joint angular velocity during starting block phase [J]. J Sports Sci, 31(3):256-263.

STANDING R J, MAULDER P S, 2017. The biomechanics of standing start and initial acceleration: Reliability of the key determining kinematics[J]. J Sports Sci Med, 16(1):154-162.

SUCHYD, 2012. 4 x 100m Relays[J]. Modern Athlete Coach, 50(4), 8-11.

WARD-SMITH A J, RADFORD P F, 2002. A mathematical analysis of the 4 × 100 m relay[J]. J Sports Sci, 20(5):369-381.

(收稿日期:2019-10-24; 修订日期:2022-02-08; 编辑:李晴慧)

