

棒球投手投球速度关键影响因素

王钰婷^{1,2}, 贺业磊^{1*}, 张玉峰³

摘要:为进一步明确影响棒球投手投球速度的关键因素,通过中国知网、Web of Science 和 PubMed 等平台以棒球投手、投球速度、运动生物力学和鞭打动作等为关键词,检索并整理归纳 20 世纪 90 年代至今的相关文献资料。通过对比国内外优秀棒球投手投球速度和专项技术能力,发现投球时投掷臂肩关节外旋角度、肩关节水平外展角度、肘关节角度、躯干前倾幅度、前腿膝关节角度等运动学指标,投掷臂各环节受力峰值、前腿受到的最大地面反作用力等动力学指标均对投球速度起关键性影响作用。教练员和棒球投手可通过改善上下肢关节角度和角速度等指标参数的大小、增强肌肉力量和柔韧性等手段,完善投手投球技术动作,提高投球速度。

关键词: 棒球投手; 投球速度; 运动学; 动力学

中图分类号: G804 文献标志码: A 文章编号: 1006-1207(2024)02-0089-08

DOI: 10.12064/ssr.2022122601

Key Factors Affecting Baseball Pitching Velocity

WANG Yuting^{1,2}, HE Yelei^{1*}, ZHANG Yufeng³

(1. Shanghai Research Institute of Sport Science & Shanghai Anti-Doping Agency, Shanghai 200030, China; 2. Key Laboratory of General Administration of Sport for Exercise Performance Evaluation, Shanghai 200030, China; 3. Shanghai Competitive Sports Training and Management Center, Shanghai 202162, China)

Abstract: In order to further clarify the key factors affecting the pitching speed of baseball pitchers, relevant literature from the 1990s up to the day was searched and summarised by using the keywords of baseball pitchers, pitching speed/velocity, sports biomechanics and whipping action from CNKI, Web of Science and PubMed data bases. By comparing the pitching speed and specialised technical ability of elite baseball pitchers at home and abroad, the study found that kinematic indexes such as shoulder external rotation angle, shoulder horizontal abduction angle, elbow joint angle, trunk forward tilt range, knee joint angle of front leg, and kinetics indexes such as peak stress of each link of throwing arm and maximum ground reaction force of front leg, have the primary effect on the pitching velocity. Therefore, the baseball coaches and pitchers can improve their pitching skills and speed by changing the size of upper and lower limb joint angles and angular velocity, enhancing muscle strength and flexibility.

Keywords: baseball pitcher; pitching velocity; kinematics; kinetics

棒球运动最早起源于 15 世纪,1992 年被列为奥运会比赛项目。中国棒球协会前副主席梁友德教授和美职联纽约洋基队著名棒球教练员罗根都曾强调棒球投手投球速度在棒球比赛中的重要性,且多名研究人员通过研究证实了以上说法^[1-2]。据统计,我国棒球投手平均球速为 37.78 m/s,而美国职业棒球大联盟(Major League Baseball, MLB)平均投球速度为 41.56 m/s^[3],说明我国棒球投手投球能力与世界优秀棒球投手尚存在较大差距,因此,帮助我国棒球

投手提高投球速度是现阶段我国棒球运动科研服务工作的重点任务之一。

为进一步研究探讨棒球投手投球速度的重要影响因素,帮助棒球投手提高投球能力,本文通过中国知网、Web of Science 和 PubMed 等平台以棒球投手、投球速度、运动生物力学和鞭打动作等为关键词,检索并整理归纳了 20 世纪 90 年代至今的相关文献资料。在现阶段研究中,研究人员根据棒球投手投球动作专项技术特点,通常将整个投球过程拆分

收稿日期: 2022-12-26

基金项目: 奥运备战数据监测和分析平台的应用示范(22dz1204900)。

第一作者简介: 王钰婷,女,硕士,研究实习员。主要研究方向:运动生物力学。E-mail: 1320359534@qq.com。

* 通信作者简介: 贺业磊,男,硕士,助理研究员。主要研究方向:运动训练学。E-mail: knight_lei@163.com。

作者单位: 1. 上海市体育科学研究所(上海市反兴奋剂中心),上海 200030; 2. 国家体育总局竞技运动能力综合评定重点实验室,上海 200030; 3. 上海市竞技体育训练管理中心,上海 202162。



成各个阶段,并筛选各阶段中具有代表性的动力学指标和运动学指标,运用运动生物力学原理和方法分析讨论各指标参数与投球速度的关系,归纳总结棒球投手投球速度重要影响因素。

1 棒球投手投球动作技术阶段划分相关研究

投手投球是一个相对复杂的运动过程,为了更准确地了解投球动作的专项技术特征,通常先将整个投球过程划分成各个阶段,计算分析各阶段特征性的运动学、动力学参数,从而筛选总结出影响投手投球速度的关键因素。在前期研究中,多数研究人员将从投手持球准备到球出手后随摆动动作结束定义为完整的投球动作,并将其划分为6个阶段,但对于各阶段的名称和包含的具体动作过程存在差异性。投手投球动作技术阶段划分方式及结果,不对投手投球速度产生直接影响,仅用于研究人员更科学且具有针对性地筛选分析影响投球速度的指标参数。

2000年以前国内外学者通常采用三维高速摄像的研究方法研究探讨投手上肢动作生物力学特征,投球技术动作可分为6个阶段:准备姿势、球离手套、前腿脚触地、引臂投球、球出手和随摆^[4]。但近年来,随着相关研究的深入开展,国内外研究人员主要以投手在投球过程中的动作姿态为划分标准,由繁入简,进一步明确了投球动作各阶段的定义和其包含的运动过程^[5]。2009年,马秀杰^[6]在其研究中将投手的投球动作划分为6个动作时相和5个动作阶段。其中6个动作时相分别为前腿离地瞬间、前腿抬腿的最大屈膝、前腿触及投手坡瞬间、肩关节的最大外旋、球出手瞬间和肩关节最大内旋,且以6个时相为基础进一步总结为5个动作阶段,分别为提膝转轴阶段、前腿伸蹬阶段、上肢后摆阶段、手臂加速阶段和手臂减速阶段。2017年,Flesig等^[7,9]使用红外三维运动捕捉系统进行不同场地长时间投掷投球技术的运动学和动力学差异研究中,将投球过程划分为前腿触地、引臂投球和球出手3个阶段。2018年,王安^[10]在高校比赛投手投球战术研究中提出,投球技术可分为3个动作过程:准备阶段、投球阶段和结束阶段。准备阶段主要的专项技术动作为踏板和摆臂。投球阶段则要求运动员先将左脚抬起(右手投球),重心移至右脚,向右自然旋转上身躯干,左脚抬至最高位置,上肢手臂紧握并置于身体右侧,随后身体向左侧快速用力旋转,左脚向前伸蹬,右手持球抛向右前方,左手顺势向前伸展,上身躯干同时向前弯曲,用力向前上方投球。投手重心处于最低时,所产生的

反作用力最大,同时产生的投球力量也最大。

综上,本文进一步归纳总结了投手投球动作流程,如图1所示,在研究分析投手投球动作时,按照投手动作特征,可将整个连续的动作划分为准备投球、投球和投球结束3个阶段,其中准备投球阶段由踏板和摆臂组成;投球阶段由抬腿、转体、送髋、前腿伸蹬、前脚触地、投掷臂肩关节外旋、用力向前投球和球出手组成;投球结束阶段则为球出手后的随摆动动作。



图1 棒球投手投球动作流程

Figure1 Flow chart of baseball pitching action

2 影响棒球投手投球速度的关键指标参数相关研究

2.1 运动学参数

美国、日本等国家棒球运动普及性高,投手专项技术能力较强、投球速度较快,研究人员通常采用视频解析、三维运动捕捉等生物力学研究方法对投手专项技术特征进行深入探讨^[11-15]。通过归纳总结相关文献资料(表1),影响投手投球速度的关键性运动学指标因素按身体部位可分为投掷臂相关指标和躯干及下肢相关指标,且集中出现在投球阶段投手前脚触地至球出手这一过程中,准备投球阶段和投球结束阶段对投球速度影响相对较小。

2.1.1 投掷臂相关运动学参数

前脚触地瞬间,投手投掷臂肩关节向后做水平外展动作,前臂与地面约呈 90° ,手持球高度约在投手头部位置,肩关节水平外展角度越大,肩关节肌肉充分拉长,从而为后续阶段的超等长运动奠定较好的动作基础。同时,投掷臂肩关节水平外展角度的大小变化反映了肩部肌肉力量的强弱和肩部柔韧性的好坏。Escamilla等^[18]提出前脚触地瞬间投手投掷臂肩关节水平外展角度与投球速度存在显著正相关性($P < 0.05$)。马秀杰^[6]提出我国优秀棒球投手前脚触地瞬间投掷臂肩关节水平外展角度均值为 $(148 \pm 11.87)^\circ$,美国、日本、韩国优秀投手均值分别为 $(200 \pm 5)^\circ$ 、 $(198 \pm 13)^\circ$ 和 $(203 \pm 9)^\circ$,我国棒球投手肩关节水平外展角度与国外优秀投手差距较大,说明该阶段我国棒球投手投掷臂后摆不充分,做功距离较短,是造成投球速度较低的关键因素之一。



表 1 棒球投手投球动作运动学影响参数文献研究一览表

Table 1 Literature research list of kinematic influencing parameters of baseball pitcher pitching

作者 (发表年份)	研究对象	研究方法	主要研究结果	
投掷臂相关运动学参数	Glenn 等 ^[16] (1999)	231 名美国健康棒球投手, 包括高中投手、大学投手和职业投手	视频解析法	投手投掷臂肘关节屈曲角度随运动水平的增强而增大
	Mastuo 等 ^[17] (2001)	健康美国大学生投手和职业投手	红外三维运动捕捉测试, 使用独立样本 <i>t</i> 检验分析数据指标	肩关节最大外旋角度、球出手时躯干前倾幅度和球出手时前腿膝关节蹬伸角速度, 与投手投球速度呈正相关
	Escamilla 等 ^[18] (2001)	在各国参加 1996 年奥运会的棒球投手中选取 48 名优秀棒球投手作为研究对象	三维录像解析法	各国投手投球速度存在明显差异, 投球速度较快的投手在投球过程中投掷臂肩关节外展角度和外旋角度均大于低球速投手
	马秀杰等 ^[19] (2011)	中国国家优秀棒球投手 6 名	Ariel Dynamics 三维录像解析法	与国外投球速度较快的投手相比, 我国棒球投手前脚触地时投掷臂肩关节水平外展角度较小, 球出手瞬间投掷臂肘关节角度较大
	Dowling 等 ^[20] (2020)	美国大学生棒球投手和日本大学生棒球投手各 11 名	红外三维运动捕捉测试, 采集频率为 480 Hz	美国大学生棒球投手平均投球速度较快, 在投球过程中美国大学生投手投掷臂肩关节外旋角度大于日本投手, 球出手瞬间前脚膝关节屈曲角度小于日本投手
躯干及下肢相关运动学参数	Escamilla 等 ^[21] (2002)	8 名韩国职业棒球投手和 11 名美国职业棒球投手	三维录像解析法	美国职业棒球投手投球速度大于韩国投手, 在球出手瞬间, 美国投手表现出较大的躯干前倾角度和较小的前脚膝关节屈曲角度
	Wight 等 ^[22] (2002)	9 名高中棒球投手和 11 名大学生棒球投手	三维录像解析法	在投球过程中, 投手髋关节转动时机的早晚与投球速度无显著相关
	Stodden 等 ^[23] (2005)	19 名不同运动水平的棒球投手	三维录像解析法	投球过程中髋关节角度随投球速度的增加而增加
	Escamilla 等 ^[24] (2007)	10 名健康美国大学生棒球投手	三维录像解析法	当投手产生疲劳时, 躯干前倾角度随投球速度的降低而减小
	张胜年等 ^[25] (2008)	在参与 2004 年全国棒球联赛的投手中选取 2 名外援投手, 3 名国家队投手和 5 名上海队投手	SBCAS2 三维图像解析法	投球速度较快的投手身体重心前移幅度相对较小, 前腿的制动能力较强
	Solomito 等 ^[26] (2018)	在全国体育大学学会 (National Collegiate Athletic Association, NCAA) 中选取 99 名棒球投手	红外三维运动捕捉测试	矢状面躯干倾斜角度大小与投球速度显著相关, 投球速度随球出手时矢状面躯干前倾角度的增大而增大
	Takanori Oi 等 ^[27] (2019)	19 名日本棒球投手和 19 名选自美国职业棒球小联盟 (Minor League Baseball, MILB) 投手	红外三维运动捕捉测试	在球出手瞬间, 日本投手前腿膝关节屈曲程度均大于美国投手
	Horiuchi 等 ^[15] (2021)	98 名日本棒球投手	红外三维运动捕捉测试	在投球过程中投手躯干的运动对机械能由下到上的传递有着非常重要的作用, 髋关节角度大小的变化与投球速度显著相关
	Masahiro 等 ^[14] (2022)	36 名高中棒球投手和 172 名职业棒球投手	红外三维运动捕捉测试	在投球过程, 前脚触地瞬间棒球投手骨盆旋转角度与投球速度无显著相关

投手前脚触地后投掷臂持续向后摆动直至肩关节出现最大外旋后, 投掷臂快速前摆做投球动作, 其中投掷臂后摆阶段也可称为超越器械阶段。因此, 投手投掷臂肩关节水平外展角度越大、充分后摆以增大做功距离, 有利于将躯干的力传递至手臂。在完成向前投球动作时, 可通过肩关节外旋缩短肩部肌肉的拉伸周期, 且肩关节外旋角度越大投掷臂获得的运动范围更大, 所以投球速度较快的投手通常表现出更大的肩关节外旋角度。Dowling 等^[20]通过对比分析了美国和日本大学生棒球投手运动学和动力学参数特征, 验证了以上结论, 发现美国投手投掷臂肩关

节最大外旋角度大于日本投手。因此, 美国投手肩肘的运动能力更强且投掷臂产生的动能更大, 有助于提高投球速度。从投掷臂肩关节出现最大外旋角度到球出手这一过程, 投手手臂加速向投球方向摆动, 此阶段投掷臂肘关节角度和角速度均出现较大变化, 通过肘关节的快速鞭打动作向环节末端传递动量, 有利于提高球出手时的初速度。Fleisig 等^[17]在对美国青少年棒球投手技术动作和训练方法的研究中也提出可以通过提高投掷臂的挥臂速度, 来提高投手的投球速度。

球出手瞬间, 投手投掷臂肘关节向前伸展, 马秀



杰等^[6,19]测得球出手瞬间我国棒球投手肘关节角度平均值约为 135°, Escamilla 等^[18,24]测得该瞬间国外优秀投手肘关节角度约为 115°, 说明我国棒球投手球出手瞬间投掷臂肘关节角度太大, 即手臂向前伸展过多, 反而降低了棒球的出手速度。

2.1.2 躯干及下肢相关运动学参数

在棒球投球过程中, 躯干在人体整体动力链中扮演着非常重要的角色, 是上下肢能量传递的链条, 现阶段相关研究集中在躯干转动时机、左右倾斜角度和前倾幅度 3 个方面。球出手瞬间, 投手的躯干前倾幅度是影响投球速度的重要因素。Matsuo^[17]的研究结论表明投球速度较快的投手通常表现出更大的躯干前倾幅度。Stodden 等^[23]提出投手投球速度随着球出手躯干前倾幅度和前移速度增大而增大。Escamilla^[21]发现球出手时, 美国投手投球速度较快且躯干前倾幅度较大。该团队在 2007 年以 10 名美国大学生投手为研究对象, 发现当肌肉接近疲劳时, 球速和躯干前倾幅度都大幅减小^[24]。但张胜年等^[25]则强调用躯干的旋转带动躯干的前移, 在技术上通过控制前腿跨步幅度使躯干获得有效旋转, 从而获得更大的动能。Solnto 等^[26]在后续研究中进一步明确了躯干前倾幅度对投球速度的影响, 在投球过程中, 躯干前后屈伸运动最佳幅度范围为 -10°~28°。球出手瞬间, 躯干前倾角度在 28°的基础上每增加 10°, 投球速度相应增加 0.7 m/s, 投手投掷臂肘外翻应力增加 2.2 N·m, 说明躯干前倾幅度过大会增加肘关节损伤风险, 但球速未出现显著提高。

由于身体形态和棒球文化等因素的差异, 投手在投球过程中下肢运动模式略有不同, Chen 等^[28]在研究中提出可通过骨盆的转动时机和身体重心的运动轨迹将投手下肢运动模式分为 tall-and-fall (TF)、dip-and-drive (DD) 和 mixed (MX) 3 种模式。TF 模式要求投手尽可能将身体重心保持在较高位置, 且在球到达最高处将球扔出, 故 TF 模式的投球动作要求投手具有较强的躯干和手臂肌肉力量。DD 模式则更强调投手的下肢肌肉力量, 通过前腿的蹬伸动作获得投球的动力, MX 模式的动作机制与 DD 模式相似。其中 TF 模式和 DD 模式投球动作示意图如图 2、图 3 所示。美国投手多使用 TF 模式, 日本投手则更倾向于 DD 模式, MX 模式则多出现在中国台湾投手投球动作中。马秀杰^[6]通过对比 16 名优秀中国棒球投手身体重心移动特征发现, 中国棒球投手重心速度在前脚跨阶段变化较大, 身体做向下俯冲动作。研究人员发现下肢运动呈现 TF 模式的投手平均投球速度略高于 DD 和 MX 模式, 但 3 种运动

模式与投手投球速度不存在显著相关性。Stodden 等^[23]提出投手投球过程中引臂投球阶段身体重心速度与投球速度成正比。



图 2 棒球投手 TF 模式投球动作示意

Figure 2 Time-lapse photographs of the pitching motion of a typical tall-and-fall-type pitcher



图 3 棒球投手 DD 模式投球动作示意

Figure 3 Time-lapse photographs of the pitching motion of a typical dip-and-drive-type pitcher

在投球过程中, 投手通过前腿膝关节快速蹬伸动作将下肢动力传递给躯干和投掷臂, 从而帮助投手提高投球速度。Dowling 等^[20]研究发现美国投手平均球速略快于日本投手, 投球过程中球出手时, 美国投手膝关节弯曲角度小于日本投手。Dowling 等^[29]在后续研究中通过对比高低球速的投手投球过程中膝关节角度特征 (图 4) 发现, 在前脚触地—肩关节最大外旋—球出手—随摆 (肩关节出现最大内旋) 这一过程中高球速组投手 [平均投球速度为 (40.3±0.9)m/s] 膝关节屈膝角度呈下降趋势, 即膝关节持续完成蹬伸动作直至投球动作结束, 且高球速投手主动蹬伸程度大于低球速组投手 [平均投球速度为 (36.1±1.2)m/s]。Matsuo 等^[17]提出膝关节屈曲角度过大会阻碍投手躯干向前旋转, 导致投手以直立的身体姿态完成投球动作, 从而影响投球速度, 所以投手若想在球出手瞬间获得更快的球速应保证其膝关节未进行过度的屈曲动作。Oi 等^[27]提出可通过缩小步幅等方式帮助投手在投球过程中提高前腿蹬伸能力。

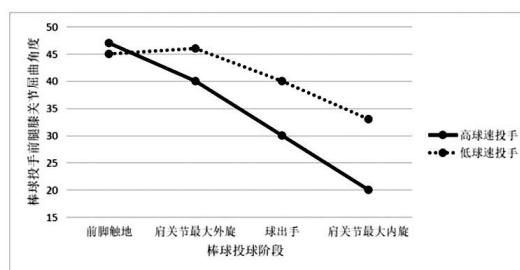


图 4 高低球速投手投球过程中膝关节屈膝角度对比
Figure 4 Comparison chart of knee flexion angle during pitching by baseball pitcher with different ball speeds



投手腕关节角度和角速度的变化幅度反映了前腿的运动情况,前腿触地至球出手这一过程中,投手腕关节角度不断减小,角速度变化率出现峰值,说明前腿用力蹬伸导致躯干前倾幅度增大^[30-32]。髌关节作为下肢和躯干的重要连接环节,其角度的快速变化有利于动量从下肢到躯干的转移。髌关节的转动时机在现有研究中尚未发现对投手投球速度有直接影响作用,Jeff 等^[22]研究发现髌关节转动时机的早晚虽然对各运动学参数和时间参数具有一定的影响,但投球速度没有显著性差异。

2.1.3 小结

在投球过程中,影响投手投球速度的运动学关键因素包含肩关节水平外展角度、肩关节最大外旋角度、肘关节伸展角度、躯干前倾幅度和膝关节蹬伸

屈曲角度等指标参数。增大各关节在运动过程中的做功距离,有利于帮助投手提高投球速度,因此,高球速投手通常表现出以下技术特征:在前脚触地至投掷臂后摆这一过程中,投掷臂呈现出较大的肩关节水平外展角度和肩关节外旋角度,向前快速投球过程中肘关节角速度较大,但向前伸展角度不易过大;在前脚触地至球出手过程中,前腿膝关节主动蹬伸,躯干前后屈伸运动最佳幅度范围为 $-10^{\circ}\sim 28^{\circ}$,球出手时刻前腿膝关节通过蹬伸带动躯干向前旋转。

2.2 动力学参数研究

在投球过程中,投手身体的动力链由下肢屈伸动作、躯干的转动和屈曲动作,以及投掷臂的鞭打动作组成。投手投球动作动力学相关研究概况如表 2 所示。

表 2 棒球投手投球动作动力学影响参数文献研究

Table2 Literature research list of parameters influencing the dynamics of baseball pitching action

作者 (发表年份)	研究对象	研究方法	主要研究结果
上肢鞭打 动作动力 学研究 Werner 等 ^[33] (2002) Stodden 等 ^[23] (2005) Post 等 ^[34] (2015)	40 名职业棒球投手	使用 Peak Performance Motus 系统建立三维人体模型并使用 Andrews 提出的算法程序计算近端环节动力学参数	在投球过程中,应着重关注投手投掷臂肘关节外翻应力的大小
	19 名美国大学生棒球投手	使用 Motion Analysis 系统采集并建立三维人体运动模型并通过逆动力学方程计算肩肘关节力和力矩大小	在投球过程中,投手投掷臂肘关节屈曲力矩、肩关节近端力量与肘关节近端力量和提高投球速度显著相关
	69 名来自 NCAA 的棒球投手	使用 Motion Analysis 系统和 Expert Vision 软件采集并建立三维人体运动模型,使用 Feltner 和 Dapena 描述的方法计算肘部和肩部的动力学数据	投球速度与投掷臂肩部运动产生的离心力呈弱正相关,但投球速度与投掷臂肘外翻应力和肩关节外旋扭矩均无显著相关
下肢屈伸 动作动力 学研究 马秀杰等 ^[35] (2010) 王祥茂 ^[36] (2017)	16 名参加中国 2008 年棒球联赛的棒球投手,分别来自北京队、天津队、上海队、四川队和广州队	使用三维视频分析法采集并分析上肢动力学参数,使用 kistler 三维测力台采集计算下肢动力学参数	上肢各环节受力峰值、最大做功功率和下肢动作在不同方向受到的地面反作用力、最大冲量和最大做功功率等指标的影响
	7 名中国优秀棒球投手	使用 Kistler 三维测力台进行三维测力	影响投手投球速度的关键动力学因素是投手前腿的地面反弹力和后腿蹬伸冲量

2.2.1 上肢鞭打动作动力学研究

研究^[37-40]发现上肢鞭打动作各环节的能量转移是肌肉力矩和关节反作用力产生的力矩共同配合作用的结果,且在三维空间内,上肢各环节速度变化表现为从上臂到手的依次加速与制动。投手投球过程中前脚触地瞬间到棒球出手时刻,投手投掷臂上臂、前臂和手的力值随着动作的进行一直增加,直到棒球出手瞬间时刻达到最大值,其中前臂增加幅度最大。通过对比不同投球速度投手投掷臂各环节受力峰值出现时刻,发现各环节受力峰值出现在球出手时刻,说明投手投掷臂鞭打动作最后的加速效果越好,投球速度越快。优秀的投手依靠身体的旋转,完成上肢鞭打动作,从而获得较大的投球速度。

肘外翻应力是指在投球过程中,肘关节受到的向外侧旋转的应力。这种应力是由于投球动作中,肘关节需要承受较大的外翻力矩而引起的。当肘外翻应力过大时,可能导致肘关节的损伤,如肘关节外侧副韧带损伤等,进而影响到投手的投球速度。Werner 等^[33,41]曾提出在投球过程中应着重关注投手投掷臂肘关节外翻应力的大小,并提出投手所受到的肘关节外翻应力的大小与前腿触地瞬间肩关节水平外展角度、最大肩关节外展角速度、最大外翻应力时的肘关节角度和最大肩关节外旋转动力矩等指标参数密切相关。Sabick 等^[42-43]研究发现肘外翻应力峰值通常出现在投掷臂肩关节最大外旋之前且肘关节外翻扭矩的大小与投掷臂最大肩外展力矩和最大肩内旋力



矩具有较强的相关性。Agurnaido 等^[44]在投手肘臂载荷的相关性研究中进一步证实了以上研究结论,躯干开始旋转时机、肩关节最大外展角度、肘关节最大屈曲角度出现时机、肘关节最大外翻时刻的屈曲角度、球出手时肘关节屈曲角度和外翻负荷率共 6 个指标参数对肘关节外翻应力的大小具有显著相关性,其中肩关节最大外展角度、肘关节最大外翻时刻的屈曲角度和外翻负荷率影响最大。但 Post 等^[34]表明投手投球速度与投掷臂肘外翻应力不存在显著相关性。

2.2.2 下肢屈伸动作动力学研究

地面反作用力在投手前腿触地和球出手时出现最大峰值,前腿的地面反弹力最大,这是因为投手在前脚落地和球出手时,全身肌肉收缩作用于前脚落地点形成地面最大反作用力。马秀杰等^[35]和王祥茂^[36]分别在其研究中使用 Kistler 三维测力台测试分析了投手下肢动力学参数对投球速度的影响作用,研究结论均证明了以上观点。投球速度较快的投手在投球过程中,后腿最大蹬伸力发生在前腿伸踏阶段,说明前腿通过伸踏动作保持了重心的稳定性,更有利于重心向前加速,并且球速较快的投手在前脚着地时,其后脚水平推力值远大于球速慢的投手。

2.2.3 小结

在投球过程中投手投掷臂各环节受力峰值、肌肉力矩和前腿受到的地面反作用力等动力学参数都是影响投手投球速度的重要因素。投手应学习运用多关节运动控制策略,通过协调优化不同关节的运动,实现对整体技术动作的控制,提升力的传递效率,提高投球速度^[45]。为更好地完成身体的鞭打动作获得更快的投球速度,投手在投球过程中应该做到在准备阶段动量从后腿转移至前腿,前腿在脚触地后通过膝关节稳定的蹬伸动作将动量依次传递到躯干和投掷臂,当肩关节外旋达到最大值时,投掷臂开始向前加速,躯干向前加速移动并沿矢状轴旋转。

3 结论和展望

3.1 结论

棒球投手投球过程按照动作特征可分为准备投球阶段、投球阶段和投球结束阶段,其中投手投球速度关键影响因素主要集中在投球阶段的前脚触地至球出手这一过程。

影响投手投球速度的关键运动学因素主要有投掷臂肩关节水平外展角度、肩关节最大外旋角度、肘关节向前伸展角度,躯干前倾幅度和膝关节屈曲角度等。投球速度较快的投手在投球过程中通常表现

出较大的肩关节外旋和水平外展角度,肘关节快速向前伸展,但角度不宜过大,前腿膝关节主动蹬伸,躯干向前移动适宜的幅度,同时强调以躯干的旋转带动躯干的前移。

影响投手投球速度的关键动力学因素主要有投掷臂各环节受力峰值、肌肉力矩和前腿受到的地面反作用力,且上述指标均与投球速度呈正相关性。

3.2 启发和展望

提高投手的投球速度、准确性及多变性,是世界棒球投球技术的发展趋势。近年来美国、日本等棒球技术发达国家均已建立红外三维运动捕捉实验室,通过采集分析投手的投球姿势和运动学参数,分析各关节发力时序和力量传递特征,保证前脚着地点、提升出手点的高度稳定性,了解投手各时刻,各环节的力值力矩的大小,有利于正确全面地评价投手投球动作,进一步提升投手的运动表现能力。但目前,我国在该领域相关研究较少,缺乏系统、科学的方法帮助投手提高投球速度。在后续研究中,应根据我国棒球投手现阶段竞技能力和科研需求,选取具有针对性的运动学和动力学指标参数,进一步推广在棒球训练和比赛中通过使用视频解析、红外运动捕捉和测力台测试等运动生物力学研究方法,监控投手的专项技术动作,为我国棒球教练员和运动员制定训练比赛计划提供科学的理论依据,提高我国投手的专项竞技能力,在今后的比赛中获得更加优异的成绩。

参考文献:

- [1] 黄海燕,黄嫒.美国职业棒球的运作机制[J].体育科研,2010,31(3):38-44.
- [2] 张一兵,席翼,谭思洁,等.中国优秀棒球运动员竞技能力结构模型的研究[J].西安体育学院学报,2007,24(3):84-88.
- [3] 陈小敏,易胜.世界优秀棒球队投手特征分析:兼论中国棒球投手与世界优秀棒球投手的差距[J].北京体育大学学报,2013,36(12):137-140.
- [4] 和平,孟繁林,孙晓菊,等.棒球投手投掷臂动作的生物力学特征[J].天津体育学院学报,2000,15(3):38-40.
- [5] 李韦良.对我国优秀棒球投手技术特点的分析[J].当代体育科技,2017,7(26):197-200.
- [6] 马秀杰.中国优秀棒球投手肩上投法投球动作的运动生物力学研究[D].天津:天津体育学院,2009.
- [7] FLEISIG G S, BOLT B, FORTENBAUGH D, et al. Biomechanical comparison of baseball pitching and long-toss: Implications for training and rehabilitation[J].



- Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy, 2011, 41(5):296-303.
- [8] FLEISIG G S, BARRENTINE S W, ESCAMILLA R F, et al. Biomechanics of overhand throwing with implications for injuries[J]. Sports Medicine, 1996, 21(6):421-437.
- [9] FLEISIG G S, ANDREWS J R, DILLMAN C J, et al. Kinetics of baseball pitching with implications about injury mechanisms[J]. The American Journal of Sports Medicine, 1995, 23(2):233-239.
- [10] 王安. 棒球投手投球战术在高校比赛中的运用探析[J]. 当代体育科技, 2017, 7(33):181-182.
- [11] FLEISIG G S, DIFFENDAFFER A Z, IVEY B, et al. Do baseball pitchers improve mechanics after biomechanical evaluations?[J]. Sports Biomechanics, 2018, 17(3):314-321.
- [12] FLEISIG G S, DIFFENDAFFER A Z, IVEY B, et al. Changes in youth baseball pitching biomechanics: A 7-year longitudinal study[J]. American Journal of Sports Medicine, 2018, 46(1):44-51.
- [13] NAKATA H, NAGAMI T, HIGUCHI T, et al. Relationship between performance variables and baseball ability in youth baseball players[J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2013, 27(10):2887-2897.
- [14] KAGEYAMA M, SUGIYAMA T, KANEHISA H, et al. Difference between adolescent and collegiate baseball pitchers in the kinemat_x0002_ics and kinetics of the lower limbs and trunk during pitching motion[J]. Journal of Sports Science and Medicine, 2015, 14(2):246-255.
- [15] HORIUCHI G, NAKASHIMA H, SAKURAI S. Mechanical energy flow in torso during baseball toss batting [J]. Sports Biomechanics, 2021:1-11.
- [16] FLEISIG G S, BARRENTINE S W, ZHENG N, et al. Kinematic and kinetic comparison of baseball pitching among various levels of development[J]. Journal of Biomechanics, 1999, 32(12):1371-1375.
- [17] MATSUO T, ESCAMILLA R F, FLEISIG G S, et al. Comparison of kinematic and temporal parameters between different pitch velocity groups[J]. Journal of Applied Biomechanics, 2001, 17(1):1-13.
- [18] ESCAMILLA R F, FLEISIG G S, ZHENG N, et al. Kinematic comparisons of 1996 Olympic baseball pitchers[J]. Journal of Sports Sciences, 2001, 19(9):665-676.
- [19] 马秀杰, 陈亮, 和平, 等. 我国优秀棒球投手投掷臂动作关节角度特征分析[J]. 天津体育学院学报, 2011, 26(1): 86-89.
- [20] DOWLING B, LAUGHLIN W A, GURCHIEK R D, et al. Kinematic and kinetic comparison between American and Japanese collegiate pitchers[J]. Journal of Science and Medicine in Sport, 2020, 23(12):1202-1207.
- [21] ESCAMILLA R, FLEISIG G, BARRENTINE S, et al. Kinematics and kinetic comparisons between American and Korean professional baseball pitchers[J]. Sports Biomechanics, 2002, 1(2):213-228.
- [22] WIGHT J, RICHARDS J, HALL S. Influence of pelvis rotation styles on baseball pitching mechanics[J]. Sports Biomechanics, 2002, 1(3):67-83.
- [23] STODDEN D F, FLEISIG G S, MCLEAN S P, et al. Relationship of biomechanical actors to baseball pitching velocity: Within pitch variation[J]. Journal of Applied Biomechanics, 2005(21):44-56.
- [24] ESCAMILLA R F, BARRENTINE S W, FLEISIG G S, et al. Pitching biomechanics as a pitcher approaches muscular fatigue during a simulated baseball game[J]. The American Journal of Sports Medicine, 2007, 35(1): 23-33.
- [25] 张胜年, 张年娥, 王正利. 棒球投手投球技术生物力学分析[J]. 西安体育学院学报, 2008, 25(3):64-66.
- [26] SOLOMITO M J, GARIBAY E J, NISSEN C W. Sagittal plane trunk tilt is associated with upper extremity joint moments and ball velocity in collegiate baseball pitchers[J]. Orthopaedic Journal of Sports Medicine, 2018, 6(10):2325967118800240.
- [27] OI T, YOSHIYA S, SLOWIK J, et al. Biomechanical differences between Japanese and American professional baseball pitchers[J]. Orthopaedic Journal of Sports Medicine, 2019, 7(2):2325967119825625.
- [28] CHEN S, TANG W, KUNG J, et al. Stride pattern of the lower extremities among stride types in baseball pitching[J]. Frontiers in Sports and Active Living, 2021, 3:670395.
- [29] DOWLING B, MANZI J E, RAAB G, et al. The relationship among lead knee extension, fastball velocity and elbow torque in professional baseball pitchers [J]. Sports Biomechanics, 2022:1-11.
- [30] 王国栋, 陆阿明, 张英媛, 等. 下肢惯性参数对逆向动力学计算的敏感性研究[J]. 体育科研, 2014, 35(1):44-49.
- [31] MANZI J E, ESTRADA J A, QUAN T, et al. The influence of excessive ipsilateral trunk tilt on upper-extremity throwing mechanics: A newly characterized parameter for biomechanical evaluation in high school and professional pitchers[J]. Journal of Shoulder and Elbow Surgery, 2022, 31(9):1909-1921.
- [32] MANZI J E, ZEITLIN J H, DOWLING B, et al. Evaluating pelvis rotation style at foot contact: A propensity scored biomechanical analysis in high school and professional pitchers[J]. American Journal of Sports Medicine, 2022, 50(8):2271-2280.
- [33] WERNER S L, MURRAY T A, HAWKINS R J, et al.



- Relationship between throwing mechanics and elbow valgus in professional baseball pitchers[J]. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, 2002, 11(2):151-155.
- [34] POST E G, LAUDNER K G, MCLODA T A, et al. Correlation of shoulder and elbow kinetics with ball velocity in collegiate baseball pitchers[J]. *Journal of Athlete Training*, 2015, 50(6):629-633.
- [35] 马秀杰,韩志磊,梁占锁. 棒球投手投球动作的运动生物力学研究综述[J]. *中国体育科技*, 2010, 46(2):115-122.
- [36] 王祥茂. 影响棒球投手投球速度的关键因素研究[J]. *河北体育学院学报*, 2017, 31(4):92-96.
- [37] 刘卉,于冰. 动作技术的生物力学分析方法[J]. *体育科研*, 2020, 41(5):64-70.
- [38] 刘卉. 上肢鞭打动作技术原理的生物力学研究[J]. *体育科学*, 2004, 24(11):30-36.
- [39] 王星明,陈斌. 我国优秀男子标枪运动员从交叉步到出手技术的转动力学分析[J]. *体育科研*, 2009, 30(2):71-73.
- [40] 刘卉. 三维摄影解析中人体关节角度的计算方法[J]. *北京体育大学学报*, 2004, 27(6):767-769.
- [41] WERNER S L, FLEISIG G S, DILLMAN C J, et al. Biomechanics of the elbow during baseball pitching[J]. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 1993, 17(6):274-278.
- [42] SABICK M B, TORRY M R, KIM Y K, et al. Humeral torque in professional baseball pitchers[J]. *American Journal of Sports Medicine*, 2004, 32(4):892-898.
- [43] SABICK M B, TORRY M R, LAWTON R L, et al. Valgus torque in youth baseball pitchers: A biomechanical study[J]. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, 2004, 13(3): 349-355.
- [44] AGUINALDO A L, CHAMBERS H. Correlation of throwing mechanics with elbow valgus load in adult baseball pitchers[J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2009, 37(10):2043-2048.
- [45] HIRASHIMA M, KUDO K, WATARAI K, et al. Control of 3D limb dynamics in unconstrained overarm throws of different speeds performed by skilled baseball players[J]. *Journal of Neurophysiology*, 2007, 97(1): 680-691.

(责任编辑:刘畅)

(上接第72页)

- American Journal of Physiology. Endocrinology and Metabolism*, 2016, 310(2):E160-E170.
- [9] SCHELER M, IRMLER M, LEHR S, et al. Cytokine response of primary human myotubes in an in vitro exercise model[J]. *American Journal of Physiology. Endocrinology and Metabolism*, 2013, 305(8):C877-C886.
- [10] 孙景权,上官若男,李松波,等. 长时间不同频率电刺激对 C₂C₁₂ 肌管细胞代谢指标和基因表达的影响[J]. *首都体育学院学报*, 2019, 31(5):459-466.
- [11] BURCH N, ARNOLD A S, ITEM F, et al. Electric pulse stimulation of cultured murine muscle cells reproduces gene expression changes of trained mouse muscle [J]. *PLoS One*, 2010, 5(6):e10970.
- [12] 王华,刘静,刘建民,等. “双固一通”电针对老年阳虚大鼠抗疲劳能力及肝脏线粒体呼吸功能的影响[J]. *针刺研究*, 2013, 38(4):259-264.
- [13] KOLESAR J E, SAFDAR A, ABADI A, et al. Defects in mitochondrial DNA replication and oxidative damage in muscle of mtDNA mutator mice [J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2014, 75(75):241-251.
- [14] NILSSON M I, TARNOPOLSKY M A. Mitochondria and aging-the role of exercise as a countermeasure [J]. *Biology(Basel)*, 2019, 8(2):E40.
- [15] 谈文博. 适度运动对增龄大鼠骨骼肌线粒体能量代谢及自由基代谢的影响[D]. 兰州:西北师范大学, 2014.
- [16] NORDIN T C, DONE A J, TRAUSTADÓTTIR T. Acute exercise increases resistance to oxidative stress in young but not older adults[J]. *AGE*, 2014, 36(6):9727.
- [17] SUNTAR I, SUREDA A, BELWAL T, et al. Natural products, PGC-1 α , and Duchenne muscular dystrophy [J]. *Acta Pharmaceutica Sinica*, 2020, 10(5):734-745.
- [18] COMBES A, DEKERLE J, WEBBORN N, et al. Exercise-induced metabolic fluctuations influence AMPK, p38-MAPK and CaMKII phosphorylation in human skeletal muscle[J]. *Physiological Reports*, 2015, 3(9):e12462.
- [19] 张媛,张念云,丁树哲. AMPK、p38 MAPK 信号通路参与调控电刺激诱导骨骼肌细胞 PGC-1 α 基因表达[J]. *西安体育学院学报*, 2018, 4(1):88-95.
- [20] RUSSELL A P, HESSELINK M K, LO S K, et al. Regulation of metabolic transcriptional co-activators and transcription factors with acute exercise[J]. *FASEB Journal*, 2005, 19(8):986-988.
- [21] LIANG J, ZHANG H, ZENG Z, et al. Lifelong aerobic exercise alleviates sarcopenia by activating autophagy and inhibiting protein degradation via the AMPK/PGC-1 α signaling pathway[J]. *Metabolites*, 2021, 11(5):323.

(责任编辑:刘畅)