

文章编号:1004-7220(2024)04-0563-13

· 专家论坛 ·

竞技体育生物力学 2023 年度研究进展

李上校, 杨进, 郝卫亚

(国家体育总局 体育科学研究所, 北京 100061)

摘要: 运动生物力学是研究人体运动力学规律的多学科交叉的应用学科,在竞技体育科学研究和科技保障中起到关键作用。本文在回顾竞技体育生物力学研究方法基础上,重点阐述 2023 年竞技体育生物力学在提高运动成绩、预防运动损伤和研发运动装备 3 个领域的研究进展,以期为进一步促进运动生物力学在竞技体育的发展研究提供新思路。

关键词: 竞技体育; 生物力学; 动作技术; 运动损伤与康复; 运动装备

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.04.001

Research Progress of Competitive Sports Biomechanics in 2023

LI Shangxiao, YANG Jin, HAO Weiya

(Research Center for Sports Psychology and Biomechanics, China Institute of Sport Science, Beijing 100061, China)

Abstract: Sports biomechanics is a multidisciplinary applied discipline that studies the mechanics of human movement and plays a crucial role in scientific research and technological support in competitive sports. This paper reviews the research methods in competitive sports biomechanics and focuses on research progress in the year 2023 in three key areas: improving sports performance, preventing sports injuries, and developing sports equipment. The goal is to provide new insights to further advance the application of sports biomechanics in competitive sports.

Key words: competitive sports; biomechanics; sports techniques; sports injury and rehabilitation; sports equipment

运动生物力学是研究人体运动力学规律的多学科交叉的应用学科,是体育科学的基础学科。在国外,作为人体运动学(kinesiology)学科的组成部分,采用力学原理和方法探讨人体运动规律的研究始于 19 世纪末期。在 20 世纪 60 年代,生物力学(biomechanics)一词在国际学术界流行起来,运动生物力学也逐步作为生物力学学科组成部分发展起来。为提高我国运动员在国际比赛中的运动成绩,我国于 1959 年在国家体育总局体育科学研究所成立了生物力学研究组,开始进行竞技体育生物力学研究。近年来,国内外竞技体育相关的生物力学

研究快速发展,研究领域拓宽,研究方法和手段不断更新,越来越注重创新和跨学科研究。利用人工智能、大数据和可穿戴设备等现代技术手段,为提高运动员运动表现、预防运动损伤和运动装备研发作出了重要贡献。本文重点阐述 2023 年度竞技体育领域的运动生物力学研究进展。

1 竞技体育生物力学研究方法进展

1.1 运动生物力学传统研究方法

传统运动生物力学研究方法可以分为两大类:实验测试方法和理论分析方法。实验测试方法通

收稿日期:2024-07-31; 修回日期:2024-08-02

基金项目:国家体育总局体育科学研究所基本科研业务费资助项目(基本 24-45),国家自然科学基金项目(12302415)

通信作者:郝卫亚,研究员,博士生导师,E-mail: weiyahao66@126.com

过仪器测试运动员运动过程中相关数据,主要包括运动学测试方法、动力学测试方法和表面肌电测试方法等。运动学测试方法通常采用视频拍摄(二维和三维)和红外运动捕捉系统获得运动学数据,是运动生物力学最基本的测试方法;动力学测试方法是采用内置力传感器的专门仪器测试人体运动过程中受到的外界作用力,常见动力学测试设备包括测力台、足底压力测量鞋垫、压力平板、等速肌力测试系统以及各种专用测力设备等;表面肌电测试方法是一种无创肌肉功能状况的检测方法,采集皮肤表面电信号以记录皮肤下骨骼肌电活动,以便检测肌肉的收缩活动。在实验室条件下,可以将运动学、动力学和表面肌电信号进行同步采集,获取人体如何运动的信息,定量分析人体完成动作过程中不同性质的生物力学指标的相互关系、动作协调控制等特征。

传统运动生物力学理论分析方法指生物力学建模与仿真方法。由于人体运动的本质是人体肌骨系统在神经系统的调节控制下,肢体环节遵循着力学规律在空间中运动。因此,生物力学建模与仿真方法利用计算机软件系统,整合运动相关的生理解剖特征和力学规律,建立人体运动的生物力学模型,并进行计算机仿真研究。生物力学建模与仿真方法能够解释实验测试获得的运动学、动力学和表面肌电数据的相互关系,说明人体运动如何在肌肉驱动下运动。

1.2 实验室研究和现场研究方法

竞技体育是为战胜对手,取得优异运动成绩,最大限度地发挥和提高个人、集体潜力所进行的科学的、系统的训练和竞赛。竞技体育生物力学主要研究内容是探讨运动员完成运动专项中的动作技术的生物力学规律。根据运动员动作技术采集场景不同,竞技体育生物力学可以分为两类研究:实验室研究和现场(训练或者竞赛)研究。

两种研究场景具有较大差异。实验室研究的研究对象大多是运动技术水平较低的业余运动员,国家级和国际级运动员较少能够按照研究的实验设计配合完成实验测试。实验室研究测试的动作技术较简单,但是通过给运动员粘贴红外反光标志点和表面肌电电极、可穿戴传感器、地面埋设的测力台等手段,可同步采集到运动学、动力学和表面

肌电等较为完整的数据,同时通过较为成熟的逆向动力学方法分析关节力和关节力矩等动力学指标。

从技术角度来看,在训练和竞赛场地采集运动员数据的现场研究比实验室研究难度大得多。训练和竞赛中的运动员必须保持无干扰状态,采集运动员的生物力学数据十分困难。通过摄像机拍摄运动员训练和比赛中的动作技术是最常见的无干扰采集方法。但依靠这种方法获得动作技术的运动学数据需要后续人工解析拍摄视频,工作量很大。虽然基于人工智能的无标记点运动学数据采集技术正在逐步推广应用,但拍摄视频和事后解析仍然是当前最可靠、最容易实现的训练和竞赛场地运动员动作技术数据采集的有效手段。为了更加深入了解高水平运动员在训练比赛中完成高难度动作时的动力学和肌肉活动情况,则需要通过生物力学建模与仿真方法。生物力学建模与仿真方法首先要建立人体动作的多体系统模型,模型的动力学方程,例如凯恩(Kane)方程,求解十分复杂,一般只能通过软件系统求解。模型输入可为现场采集的运动员动作技术的运动学数据,输出可为运动员各环节和肌肉的动力学数据。由于研究人员很难主导训练比赛,现场研究具有研究对象少、动作变化大、数据采集难度大的不足,一些情况下只能进行个案研究。但现场研究真实性强、运动员水平高,可以是世界顶级运动员,具有很强的代表性。

总之,虽然竞技体育生物力学的实验室研究和现场研究两种方法在很多方面具有较大差异,但它们各具优势,相辅相成、互相补充,不可偏废(见表1)。

1.3 新科技在竞技体育生物力学中的应用

可穿戴技术、虚拟现实(virtual reality, VR)、大数据和人工智能等新科技正在逐渐应用于竞技体育生物力学中,它们共同推动了体育训练和比赛的科学化、精准化发展。英国《自然》杂志的一系列文章,记录了人类在竞技体育生物力学中研究方法的变化,特别是近3年新发表了几篇新科技在奥运会和足球赛等赛事和训练中的应用论文^[1-6]。1901年,《自然》杂志一篇社论记录到法国科学家Étienne-Jules Marey在1900年巴黎奥运会上最早使用高速摄影技术(将相机像机关枪一样安装起来,像弹药一样给它装上感光板以快速捕捉画面)以

表 1 竞技体育生物力学两种研究比较

Tab. 1 Comparison of two methods used in competitive sports biomechanics

参数	实验室研究	现场研究
研究对象	业余运动员为主	专业运动员, 可为国际顶级运动员
研究动作	简单动作(单一或简化动作)	真实动作, 可为训练比赛中的高难度动作
实验设计	研究者可以主导实验, 重复性好, 样本量大	研究者很难主导训练比赛, 可重复性较差, 样本量小, 但可进行案例研究
运动学测量	基于红外反光标记点, 有干扰	基于视频拍摄, 无干扰
动力学测量	测力台, 压力鞋垫等	无
表面肌电测量	可粘贴电极于运动员皮肤	无
传感器测量	运动员可携带传感器	无
动力学模型	单个刚体(环节), 或者几个可分解的刚体(环节)	全身模型或者多个刚体(环节)组合体
动力学方程	经典力学: 刚体运动动力学方程	高等动力学: 多刚体系统动力学方程
求解方式	存在解析解, 可编程进行数值求解	无解析解, 编程困难, 一般利用计算机软件进行数值求解
求解变量	力、力矩、质点、转动惯量、加速度、角度、角加速度等	各刚体的广义力、广义位移、广义速度等
应用范围	计算较简单, 研究方法成熟规范, 应用研究较多(例如步态、落地)	计算较复杂, 软件系统昂贵, 研究方法逐步成熟规范, 实际研究案例相对较少

1/14 s 时间间隔连续拍摄跳远动作[见图 1(A)], 通过分析人体的生物力学来“发现某些运动员优越的秘密”^[1]。2024 年《自然》报道了在 2022 年世界杯和 2024 年欧洲杯足球赛中引入的基于摄像、传感器和人工智能的全视角裁判辅助系统, 这套系统可以识别记录每个运动员身体上 29 个点动态位置的变化, 同时在足球中心位置放置 14 g 惯性传感器(inertial measurement unit, IMU), 辅助裁判识别比赛中的犯规、越位和进球等重要事件[见图 1(B)]^[5]。2024 年巴黎奥运会开幕前夕, 《自然》杂志在线发表论文指出, 在当代使用智能手机就可以记录很多人体运动信息, 而英特尔公司 3D 运动员追踪(3DAT)技术使用无标志点的人工智能追踪人体上的 21 个点, 较精确地呈现运动员身体运动, 为精英运动员提供“教练寻找的生物力学见解”, 这些技术将带来更激烈的竞争和新的竞赛纪录^[6]。VR 技术可以辅助运动员训练和评估运动技术水平。对于棒球、板球和网球等项目, 来球极快、接球运动员可能无法及时识别来球线路并做出相应接球动作。美国公司基于神经生理和生物力学原理, 开发出一套系统(WIN Reality)来模仿运动员发球动作, 训练运动员通过发球运动员发球前身体和肢体动作预判发球线路; 这套系统还可以用来评估运动员判断准确率和反应时间^[3]。可穿戴设备(传感器背心、GPS 定位、智能手环和 IMU 等)、多角度摄像机能够实时获取足球运动员跑动轨迹和距离、射门和

漏防次数等重要数据, 结合大数据技术开创足球新时代, 改变了球队的战术思想、行为、分析对手的方式以及培养人才和发掘球员的方法^[2]。Fiscutean 等^[4]报道, 一些顶级足球队(如英格兰超级联赛球队)队员身穿安装有 GPS、加速度计、陀螺仪和数字罗盘传感器的紧身背心进行比赛, 收集球员的心率、跑动速度和距离, 在积累海量数据后应用机器学习技术预测球员损伤风险, 提示教练员何时可能出现影响球员职业生涯的损伤。

新科技还可以与传统运动生物力学方法结合, 快速检测一些实验中无法或较难测量的生物力学指标。例如, 由于跑步时地面反作用力与跑步损伤密切相关, 但地面反作用力在运动场景下较难测量, 可穿戴设备结合机器学习则成为无干扰检测地面反作用力的替代手段。研究表明, 机器学习在预测垂直地面反作用力有较高的准确性^[7], 机器学习和 IMU 相结合在实时预测垂直地面反作用力和关节力矩等方面也有较大的进展^[8-10]。

总之, 近年来可穿戴设备、大数据、VR 和人工智能等新科技在对训练比赛中运动员动作技术的无干扰检测、训练监控、运动技术水平评估、运动损伤预测预防和赛事组织裁决等诸多方面都有较好的应用, 正在塑造形成竞技体育生物力学研究和应用的新范式。然而, 新科技的应用, 还受到资金、技术和接受程度等因素的限制。一些受关注、商业化程度较高的运动项目(例如足球、篮球和棒球)已经



图1 训练比赛中运动员动作技术采集分析

Fig.1 Collection and analysis of the movement technique of athletes in training competition

注:(A) 1900年巴黎奥运会上高速摄像拍摄和分析跳远运动员动作技术^[1];(B) 基于摄像、传感器和人工智能的全视角裁判辅助系统^[5-6];(C) 基于VR技术对运动员训练和技术水平评估^[3];(D) 顶级足球队身穿传感器的紧身背心进行比赛,利用大数据和机器学习技术预测球员损伤风险^[4]。

吸引了一批数学、物理和计算机专家,与生物力学和训练专家合作,开发训练比赛中的训练比赛新系统^[5-6],但较为“冷门”的项目尚需大力发展新科技。此外,教练员、运动员、队医和管理人员接受程度也影响着新科技的推广应用。

2 提高运动成绩

运用运动生物力学研究,可以探讨运动专项动作技术规律,对运动员训练及比赛中的动作技术进行诊断与优化。同时,利用生物力学测试指标,在运动训练中进行监测与快速反馈,科学评价技术水平和能力,为教练员进一步制定合理的训练方案提供理论依据。

2.1 运动专项规律

竞技体育中的大部分动作技术,都可以使用运动生物力学方法进行研究。近年来,对动作技术的

研究逐渐细化,更加强调特定的关键动作阶段,也不再局限于动作的简单描述。研究常通过统计分析比较不同水平、不同性别运动员动作技术差异,或者对于精英运动员的个性化分析与诊断,探讨影响运动表现的生物力学因素。2023年间,国内外对于游泳、短跑、跆拳道、举重、攀岩以及冬季运动等项目的动作技术与诊断开展了相关研究,产出了大量的研究成果。

2.1.1 田径类项目 对于短跑项目而言,起跑是关键阶段,起跑器的利用效果是影响运动表现的重要因素。一项基于人体测量学参数的起跑器距离设置的研究结果显示,在中等起跑器间距(即腿长的45%)时,较短的前起跑器至起跑线距离(腿长的50%)会导致更大的后起跑器峰值力和冲量,可能对运动员的短跑起跑训练更为有益^[11]。Cavedon等^[12]计算了短跑运动员起跑过程中下肢各关节的机械功率,结果显示大腿旋转对起跑阶段的水平推进贡献最大,该研究强调了加强髌部伸肌力量的必要性。跑步是由身体多环节共同协同完成的,动作协调特征对运动水平和运动表现有重要的作用^[13-14]。Donaldson等^[14]使用IMU记录了高水平短跑运动员起跑加速阶段的运动学数据,采用矢量编码方法确定环节间协调性,通过层次聚类分析,识别出起跑第1步下肢3种不同的协调模式,以及第2~4步中的两种协调模式(见图2)。了解运动员起跑加速阶段的个性化协调模式特征,有助于提高短跑运动表现。

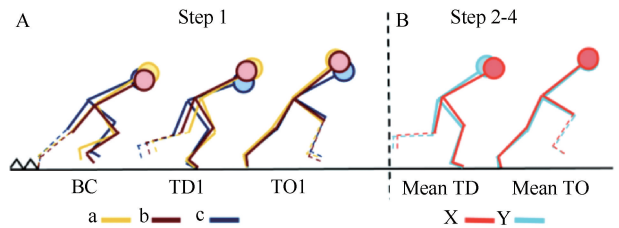


图2 高水平短跑运动员起跑加速阶段特征时刻的身体位置
Fig.2 Body position of a high-level sprinter at the characteristic moment of acceleration phase

注:(A)第1步;(B)第2~4步。虚线表示未分析的环节,BC表示蹬离起跑器瞬间,TD表示着地瞬间,TO表示离地瞬间^[14]。

对于中长跑的生物力学研究结果发现,在世界田径锦标赛男子1500m决赛中,排名靠前的运动员在跑步支撑阶段的髌关节伸展幅度更大、支撑期

膝关节活动范围更大。运动员倾向于增加步频来提高跑步速度^[15]。王松利等^[16]研究发现,在一定速度范围内,下肢整体刚度对中长跑成绩的影响较大,且单腿垂直刚度在成绩改善中起一定的作用。改善弹性能利用率和髋关节屈伸肌群离心力量比,可以提高跑步经济性。

刘威等^[17]探讨撑竿跳核心技术与成绩之间的协同关系,高水平女子撑竿跳高运动员比赛成绩与握竿高度、腾越高度、最高重心高度、倒一步速度、起跳离地水平速度、伸展最大速度、技术参数 7 项指标呈正相关关系。该研究认为,成绩的提升首先取决于握竿高度,其次为腾越高度;在加快助跑起跳速度基础上,提高向伸展速度的转化效率对成绩提升有重要作用。

2.1.2 游泳类项目 近期对于游泳的研究热点主要集中于游泳出发、转身及配速的生物力学特征。研究显示,出发时水平速度与躯干角度可能是影响游泳出发表现的重要指标^[18]。Puel 等^[19]分析了影响转身时间的生物力学因素,结果发现,最佳的转身时间与较大的侧向冲量(接触池壁到推离开始阶段)和较快的水下速度有关。Stosic 等^[20]对出发或转身出水后首个完整游泳运动周期生物力学特征的分析表明,其速度的增加来自划水频率的增加,而不是水下踢腿更快或游泳协调模式的改变。以上研究结果对理解、优化出发或转身表现具有较大的应用价值。

分析高水平游泳比赛中运动员不同阶段的游泳配速,是运动生物力学在游泳项目中的重要应用。研究显示,在 100 m 蛙泳比赛中,相比未进入决赛的游泳运动员,进入决赛的运动员有更大的途中游和滑行速度,这可能是他们在比赛中取得更好成绩的因素之一(见图 3)^[21]。对于 1 500 m 自由泳项目,适度增加划水频率可能会减少途中游阶段时间,从而提高比赛成绩^[22]。Morais 等^[23]在一项游泳配速的研究中,将游泳速度分别作为离散变量和连续变量进行处理,使用统计参数映射(statistical parameter mapping, SPM)和双因素方差分析对运动员的游泳速度进行评估,结果证实,SPM 可以更深入地洞察划水周期内速度的差异。通过两种方法综合评估游泳速度,可以增加对游泳运动员划水周期的理解。该研究也显示了 SPM 作为一种新型统

计方法在游泳动作分析及其他竞技体育动作技术分析中的潜力。

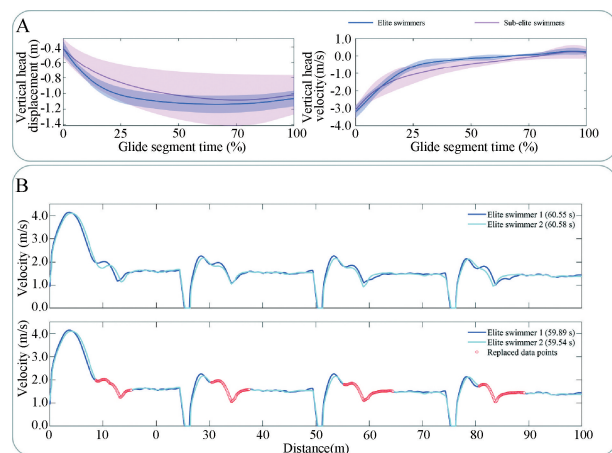


图 3 100 m 蛙泳比赛速度分析图

Fig. 3 Speed analysis diagram for the 100 m breaststroke

注:(A)滑行阶段头部垂直位移和速度的示意图;(B)两位精英游泳运动员的速度曲线示例^[21]。

其他两项游泳生物力学研究结果显示,短距离游泳表现与陆地上的力量(肩关节屈伸力量和纵跳爆发力)有关^[24]。在自由泳中,躯干肌肉在维持脊柱稳定性和控制姿势方面比躯干扭转发挥更大作用^[25]。

结合流体力学分析方法,可以帮助运动员和教练员更好地理解水中动作技术的力学原理,有助于提高运动表现。Kawai 等^[26]分析了水球运动员使用“打蛋器踢腿”(eggbeater kick)技术时的运动学和动力学特征,发现脚趾周围的负压导致背侧压力差异显著大于其他脚部区域(见图 4)。聚类分析结果显示,流体动力学和足部角度参数是评估水球运动员的“打蛋器踢腿”技术主要指标。另一项研究分析了精英花样游泳运动员在仰卧位平面划水和垂直位支撑划水动作的生物力学特征,发现花样游泳运动员在划水时可以持续产生向上推力,这对于维持身体位置和提供推进力至关重要^[27]。

2.1.3 球类项目 投掷动作表现对球类项目的成功至关重要,分析影响球速或准确性的生物力学因素,可以为提高运动表现提供科学依据。Moreno 等^[28]评估运动水平对男子手球运动员投掷动作的运动学和表现的影响,结果发现,精英组运动员相比业余组有更大的投掷速度和投掷高度,但在投掷

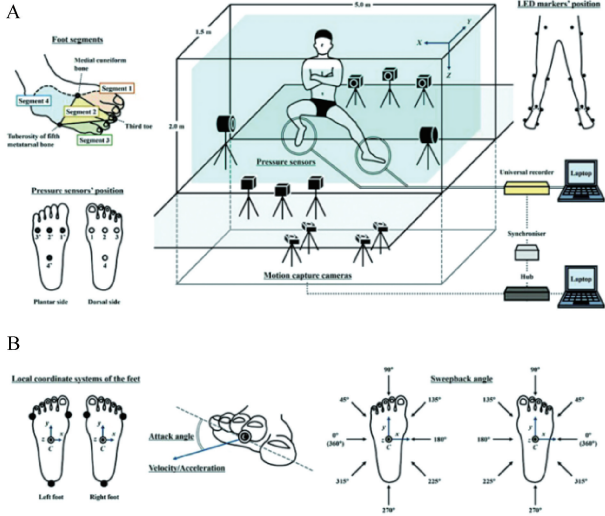


图4 水球运动员踢腿动作测试分析示意图

Fig. 4 Test analysis diagram of water polo players' kick techniques

注:(A) 实验示意图,运动员在实验水槽中完成“打蛋器踢腿”动作,使用12镜头动作捕捉系统记录运动学数据;脚部周围的压力分布由双脚背和足底表面的16个防水压力传感器测量;
(B) 脚部的局部右手坐标系和运动学参数定义^[26]。

准确性方面没有差异。虽然棒球投手使用上肢投球,但下肢力量是棒球投球速度的关键因素之一^[29-30]。对于棒球击球的研究表明,击球时球棒速度与前侧腿的地面反作用力有显著相关性,建议通过一般下肢强化练习和特定运动的击球练习,以提高击球时的下肢力量,从而增加投球速度^[29]。

大数据分析和机器学习在球类项目专项生物力学规律研究中发挥着重要作用。杜宁等^[31]以东京2020奥运周期世界女排强队进攻表现数据为研究基础,并结合高速摄像视频解析分析,发现欧美精英选手与中国选手相比具有击球点高、进攻速度快和前后排纵深掩护性强的优势。另一项基于多场网球赛事的大规模数据分析结果显示,职业网球运动员相比青少年运动员,击球速度更快,击球角度更大,对回球的预判更准确^[32]。Cabarkapa等^[33]通过三维无标记运动捕捉系统对业余运动员罚球投篮动作进行运动学分析,结果显示,更低的膝关节和重心的峰值和平均角速度可能是影响罚球命中率的关键参数。

其他两项球类项目生物力学研究结果显示,橄榄球肩扑接蹬伸主要依赖于臀大肌、优势侧股四头

肌和非优势侧腓肠肌为主左右侧平衡发力,在肩扑接技术中优势侧踝关节是下肢运动链中的薄弱环节,腓肠肌是肌肉链中的薄弱肌群^[34]。对于乒乓球正手拉球动作的肌电研究结果发现,肱二头肌、肱三头肌长头和肱桡肌起到了主要作用,而位于下肢与躯干部分的肌肉在动作中主要发挥维持姿势的作用^[35]。

2.1.4 冬季项目 随着滑雪、滑冰、冰球等冬季运动在全球范围内越来越受欢迎,国内外众多学者在冬季项目的技术诊断和运动能力提升方面进行了深入研究。张栋等^[36]使用风洞测试和视频解析系统探讨北欧两项运动员不同助滑和起跳动作姿态对气动阻力的影响。结果发现不同,助滑和起跳姿态下的气动减阻效应存在一定差异,起跳动作中“膝带动髋式”姿势为最佳减阻姿势。助滑动作中,运动员保持头部平视、躯干水平、手部水平伸展、完全蹲踞式姿态具有最佳减阻效果(见图5)。Mazurek等^[37]研究发现,高水平冰球运动员在向前全步滑行时,倾向于使用更非同步的协调模式,故建议通过不同的滑行练习(包括变化速度、方向性和外部刺激),鼓励运动员发展更优化的协调性。一项研究使用模拟速度滑冰弯道姿态的发力训练器,探讨速度滑冰项目中的双边不对称性^[38]。结果显示,优势侧的肌肉力量是影响运动表现的主要因素,随着运动员侧蹬次数增加,对非优势侧的影响会逐渐加大。束洋等^[39]测试越野滑雪运动员最大力量以及纵跳测试,发现专项运动水平与双侧力亏损之间存在负相关,提示双侧力亏损可以作为评价运动员专项能力的潜在指标。

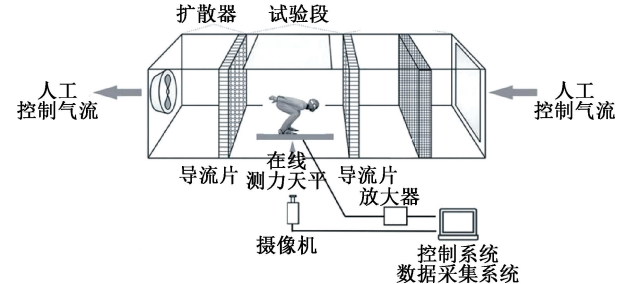


图5 在体育综合训练风洞试验室中模拟跳台滑雪训练示意图^[36]
Fig. 5 Schematic diagram of simulated ski jumping training in the wind tunnel laboratory of sports comprehensive training

2.1.5 其他项目 Goreham等^[40]使用主成分分析(principal component analysis, PCA)方法研究精英国

际皮艇、划艇运动员在静水比赛中的配速策略。结果发现,运动员在 200、500 m 的配速策略中遵循全力以赴和积极配速,而在 1 000 m 比赛中采用了“海马形”的节奏策略。一项探讨女子静水皮艇运动员专项能力测试成绩与训练负荷多指标关联性的研究结果显示,训练中应关注队员划桨功率输出和高速阶段艇速的保持,注重肢体均衡性和对称性力量训练^[41]。此外,两项赛艇生物力学研究结果显示,在划船机上划船时,增加划桨频率,会增加运动员关节运动范围;相比男性运动员,女性在划桨时的腰椎、胸椎和肩部屈伸运动范围更大^[42]。对于赛艇拉桨动作,拉桨时间和入水角是影响拉桨功率的主要因素^[43]。

生物力学分析能够为举重运动员的训练和动作技术优化提供科学依据。Nagao 等^[44]研究发现,举重运动员在杠铃翻转至接住阶段的后向位移差和峰值后向杠铃速度显著影响抓举成功率,避免在翻转阶段身体过度后仰,可能是提高抓举成功率的关键(见图 6)。对于精英运动员生物力学个性化分析结果显示,两届奥运举重冠军石智勇在 69 kg 级上调至 73 kg 级后,增宽了相对站距,减小了引膝动作幅度,下肢发力肌肉控制稳定性更高,抓举动作技术质量有明显提升^[45]。

研究触发电子护具得分时跆拳道运动员动作技术的下肢生物力学特征,有助于提升相关技术的训练效果,提高比赛时的得分率。刘林等^[46]研究发现,双飞踢技术具有较好的连续性和左右对称性,

以优势侧启动和非优势启动完成时间都为 0.583 s,在第 2 次击打时减少进攻时间有助于得分。该团队另一项研究通过分析前横踢动作的生物力学特征发现,优势侧进攻腿前横踢动作的膝关节具有更好的运动表现,而非优势侧进攻腿的不足需要支撑腿进行动作补偿^[47]。此外,疲劳后,精英跆拳道运动员横踢技术运动轨迹会出现形变,动作速度会减缓^[48]。

一项对于影响攀岩项目运动表现分析的生物力学特征的研究结果显示,不同的攀岩项目需要不同的训练重点,例如速度攀岩需要重视下肢力量,而攀岩和难度攀岩则需要更多的上半身力量和协调性^[49]。Dwyer 等^[50]分析了自行车运动员在坐姿和非坐姿时骑行的力-速度特性,结果显示,在较低的踏频下,非坐姿位置产生更大的力矩和功率;在较高的踏频下,坐姿位置产生更大的力矩和功率。该研究对理解骑行过程的坐姿转换有理论参考意义。

2.2 运动训练监控与反馈

生物力学的监控与评估手段能为运动训练提供阶段性或实时检测指标,从而为制定训练计划提供科学依据。在一项柔道项目研究发现,拉伸-缩短周期(stretch-shortening cycle, SSC)疲劳方案会增加柔道运动员双侧不对称性,增加下肢运动损伤风险,但方案后的 24、48 h,双侧不对称性能够恢复到基线水平,研究有助于理解训练中由疲劳引起的不对称性,预防下肢运动损伤^[51]。Zhang 等^[52]研究发现,在跑步机竞走与地面竞走存在一定的运动学差异,即不同的步态特征。然而,与地面竞走相比,在跑步机上的腾空时间和膝角没有发现差异,表明在跑步机上竞走训练不会增加犯规风险,支持跑步机可以作为竞走训练辅助工具的可行性。

定量的运动生物力学指标,可评估体能训练效果,以提高运动员的表现和竞技水平。Feser 等^[53]分析下肢可穿戴阻力(wearable resistance, WR)对跑步冲刺加速阶段运动学参数的影响,显示穿戴 WR 对 10 m 短跑时间和峰值关节角度有显著影响,提示教练和运动员可以考虑在训练中使用 WR 来提高冲刺表现。Valkoumas 等^[54]分析了 11 周的水阻力伞游泳训练对自由泳手臂间协调性的影响,结果支持水阻力伞游泳训练是一种有效的训练形式,可

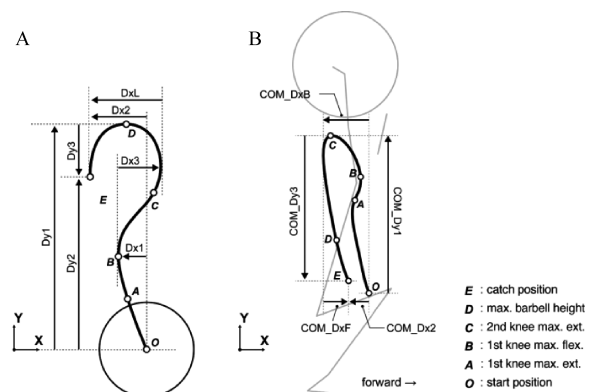


图 6 杠铃及人体质心运动轨迹及其参数

Fig. 6 Motion trajectory of barbell and center of mass and the related parameters

注:(A)杠铃运动学参数;(B)COM 运动学参数^[44]。

以改善双臂协调性,增加划水频率,从而提高自由泳表现。传统训练中,常通过增加跳箱高度来增强跳深训练的强度。Kroll 等^[55]研究发现,频闪视觉可以增加女子排球运动员跳深动作的垂直地面反作用力峰值和垂直加载率,该研究结果为跳深训练提供了新策略。

两项对篮球运动员爆发力训练的研究显示,4周个性化力量-速度不平衡爆发力训练,可提升篮球运动员冲刺和垂直跳跃能力,8周训练可以进一步改善水平跳跃和变向能力^[56]。此外,训练方向对篮球运动员在跳跃、冲刺和转向能力有显著影响,在相同的训练量下,垂直和水平跳跃相结合的爆发力训练比只进行垂直或水平跳跃训练能提高更多的能力,而仅训练垂直或水平跳跃主要改善垂直或水平定向任务的表现^[57]。

结合新科技(人工智能、IMU 以及大数据等)的生物力学监控设备,可以实时监测训练或比赛中的生物力学指标。Ang 等^[58]使用可穿戴鞋内传感器和视频对奥运会举重中的抓举动作进行现场生物力学评估,结果证实所开发的现场生物力学评估方法对于评估奥林匹克举重中抓举运动的生物力学特征是可行的。

3 降低运动损伤研究

所有专业和业余运动员都承受着各种运动损伤,不同项目有不同的损伤形式。整体来说,腰椎/骨盆、膝关节、足踝和肩关节是高水平运动员发病率和费用最高的身体部位^[59]。降低运动损伤的生物力学研究主要包括3个方面:①通过运动生物力学因素与运动损伤关系的前瞻性研究,明确损伤的危险因素;②针对特定运动专项和特定运动损伤的生物力学特征进行分析,探讨运动损伤机制;③通过评估引入减少损伤或降低损伤严重程度的预防措施后的效果,以及评价损伤后是否达到重返比赛或训练的标准^[60]。

3.1 运动损伤危险因素及损伤机制

3.1.1 前瞻性研究 前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)断裂是最常见且花费巨大的运动损伤之一^[61]。ACL 损伤家族史、体重增加、胫骨相对于股骨的前移、膝关节过度伸展和全身关节松弛度增加等都可能引起 ACL 损伤风险增加。此外,ACL

的危险因素存在性别特异性,女性运动员特有的危险因素包括:身体质量指数增加、躯干屈曲力量增加和既往非 ACL 膝关节损伤史。男性运动员特有的危险因素包括:站立时股四头肌角度减少、髌关节外展力量减少和慢性疾病^[62]。

应力性骨损伤(bone stress injuries, BSI)是体育运动中的常见损伤。双侧腰椎 BSI 在青少年足球运动员中的发生率达 26.2%,无症状骨髓水肿、骶骨前倾、未成熟的腰椎骨骺和腘绳肌柔韧性差是导致青少年双侧腰椎 BSI 的危险因素^[63]。此外,Poppe 等^[64]研究表明,有 BSI 损伤史的女性跑者在疲劳时跑步冲击载荷的增加幅度更大,提示与疲劳相关的步态生物力学变化可能增加了 BSI 的风险。另一项研究发现,较大的跑步重心垂直位移和较低的骨密度 Z 分数是 BSI 的危险因素^[65]。

肘部损伤在年轻棒球运动员中的发生率高达 24.2%^[66]。Sakata 等^[67]使用无标记运动捕捉系统和加速度计采集棒球投球动作的生物力学数据,3年的跟踪结果显示,投球时骨盆旋转不足是与投掷伤害相关的危险因素。另一项研究显示,尺侧腕屈肌较高的弹性是棒球运动员肘部损伤的危险因素^[66]。

其他几项骨骼肌肉损伤的前瞻性研究结果显示,既往损伤、自由泳交叉手入水姿势以及对运动损伤的低感知易感性,会增加大学生游泳运动员非接触性肌肉骨骼损伤概率^[68]。腘绳肌柔韧性差、腘绳肌与股四头肌力量比值低和关节松弛度评分低是腘绳肌拉伤的危险因素^[69]。一项研究使用 IMU 对大学生运动员的反应性姿势反应进行测试,结果显示,在双任务条件下测试,能够识别急性下肢肌肉骨骼损伤风险高的运动员。稳定性时间每增加 250 ms,急性肌肉骨骼损伤受伤风险增加 36%^[70]。

此外,机器学习方法在预测伤病方面显示出较大潜力。Haller 等^[71]使用线性支持向量机(support vector machine, SVM)结合综合监测工具进行伤病预测研究,认为监测方法整合到精英青少年足球训练中是可行的。

3.1.2 案例分析 实际运动损伤案例的生物力学数据罕见且珍贵。Fong 等^[72]分析了 1 例羽毛球比赛中发生的外侧踝关节扭伤案例,结果显示,羽毛球运动员在前脚掌着地姿势下,踝关节处于跖屈和

内旋状态。该研究指出,应重视前脚掌着地时的踝关节角度的控制和稳定性,预防羽毛球运动员外侧踝关节扭伤。Hoenig 等^[73]分析了 80 个职业男性足球运动员的跟腱断裂视频,结果发现跖屈肌肌腱负荷突然增加是损伤的主要危险因素。Gill 等^[74]对 2006~2022 年 NBA 比赛 ACL 损伤进行全面的视频分析,结果显示,持球进攻第 1 步、空中接触后落地和跳停是 ACL 断裂的 3 种主要情境。该研究认为,提升伤腿着地至着地后 33 ms 间的膝外翻角和膝屈角的增大,可能是 ACL 损伤危险因素。Markovic 等^[75]报告了 1 例足球运动员腘绳肌拉伤情境,运动员在向前跑动过程用右脚执行后脚跟传球动作(直接向后踢)时,导致了严重的近端腘绳肌腱撕脱伤。以上研究报告均为运动损伤的真实案例,有助于更好地了解损伤发生机制和生物力学规律。

3.2 损伤预防训练与康复评价

对前交叉韧带重建(anterior cruciate ligament reconstruction, ACLR)术后生物力学特征分析,有助于评价和改进康复效果。张嘉源等^[76]测试了 ACLR 术后运动员侧切动作的膝关节生物力学特征,发现 ACLR 运动员患侧表现出较小的膝关节屈曲角度,较大的膝关节内旋力矩和胫骨前剪切力的生物力学特征。在非预期条件下,ACLR 运动员双侧下肢均表现出膝关节内旋力矩增大,侧向地面反作用力增大和胫骨前剪切力增大的生物力学特征。另一项研究结果也发现,ACLR 手术的运动员在恢复运动时的垂直跳跃测试仍然表现出不对称性;建议临床医生的目标要恢复双侧对称性,同时关注恢复跳跃高度和反应强度指数等指标,以减少潜在损伤风险,提高整体运动表现^[77]。此外,Pinheiro 等^[78]分析了 200 名男子职业足球运动员在 ACLR 术后 2 年和 5 年的运动表现,结果显示,软骨病理厚度超过 50%、未进行关节外肌腱固定术的 ACLR,以及手术时年龄大于 25 岁是 ACLR 术后表现率较差的显著危险因素。

损伤预防训练可以降低运动中急性下肢损伤的发生率。一项双臂集群随机试验研究对比分析不同损伤预防训练方案的效果,结果显示,扩展版膝关节控制损伤预防锻炼计划组与自我选择的膝关节控制组相比,能将腘绳肌拉伤、膝关节和踝关节损伤的发生率降低近 1/3^[79]。

4 运动装备研发

对运动鞋、运动服和运动器械等运动装备的研发和评价是竞技体育生物力学的长期研究热点。运动装备研发对竞技体育发展具有积极作用,表现在以下 3 点:① 可以作为运动损伤的预防措施;② 提高运动成绩的“黑科技”;③ 集成式运动装备的研发逐渐实现对运动训练的识别与监测^[5-6,58]。随着新材料、新技术和新设计理念的不断涌现,运动装备的研发效率高且增快,成为预防损伤、提高成绩及训练监测的有力保障。

4.1 运动鞋

运动鞋是人体运动时保护及辅助足部的重要装备,与运动疲劳、下肢损伤和运动表现息息相关。近年来,技术先进的跑鞋(AFT)结合了缓冲、弹性中底和碳纤维板等创新结构和材料,使跑步运动发生了革命性的变化^[80]。一项研究收集了 2015~2016 年 AFT 推出前后男子运动员长跑类项目表现数据,结果证实,使用 AFT 的跑者在 10 km、半程马拉松和全程马拉松比赛中均表现出更好的成绩,平均提升幅度分别为 0.83%、0.50% 和 0.97%;同时,鞋底纵向弯曲刚度越高,跑步经济性越好,步频和步幅也相应增加;在中底材料的影响上,聚醚嵌段酰胺(PEBA)中底材料比乙烯和醋酸乙烯酯(EVA)材料更能提升跑步经济性,但 PEBA 材料的磨损速度更快。因此建议鞋类公司制作以训练目的 EVA 中底 AFT 跑鞋,延长使用寿命。为比赛设计使用 PEBA 中底和全掌碳纤维板的 AFT 跑鞋,以提高跑步表现^[81]。

需注意的是,虽然 AFT 在提升跑步性能方面具有巨大潜力,但对跑者的步态和其他生物力学特征有一定影响。研究显示,使用碳纤维板鞋的跑者步频降低,步幅变长,腾空时间增加,垂直地面反作用力增加,长期使用碳纤维板鞋可能会增加骨应力损伤的风险^[82-83]。跑者在使用碳纤维板跑鞋时,建议充分了解潜在风险,逐渐过渡,做好运动训练监控,结合全面的体能训练和合理的训练计划,以减小损伤风险,实现个人最佳运动表现^[82-83]。

此外,Martin 等^[84]探讨了网球鞋不同扭转刚度对正手跑动和击球过程中生物力学特征的影响,结果表明,较低的鞋扭转刚度,增加前脚掌内翻角度

和活动范围,可能会影响运动员的足踝稳定性;在防守开放式正手击球跑动动作中,鞋的扭转刚度越高,踝关节内翻角度越大,这可能会增加踝关节扭伤的风险。

4.2 其他运动装备

在自行车运动中,下背痛是最常见的运动损伤之一。一项研究对比分析了山地骑行者使用实验鞍座与传统鞍座骑行时的生物力学数据,结果发现,实验鞍座的设计(包括鞍座后部略微凸起、纵向凹陷和轻微的侧向不稳定性),可以减少山地骑行者在爬坡后的急性下背痛^[85]。王虹等^[86]采用计算流体力学方法研究滑雪服面料搭配对跳台滑雪空中飞行气动性能的影响,结果表明,滑雪服四肢和躯干部位搭配不同服装面料差异对跳台滑雪飞行阶段气动性能产生较大影响。Seo等^[87]使用磁悬浮平衡系统测量标枪在飞行过程中所受的力和力矩,并结合计算流体力学进行分析,发现所测试的标枪在较低的攻角下具有正的俯仰力矩系数,研究结果增加了对于标枪的飞行稳定性和距离的理解。

5 结论

生物力学在竞技体育科学研究和科技保障中起到了关键作用。2023年竞技体育生物力学在提高运动成绩、预防运动损伤、研发运动装备3个方面的研究有较大发展,深化了对运动技术规律和运动损伤机制的认识,提高了运动训练和比赛科学化水平。以可穿戴设备、VR、大数据和人工智能为代表的新技术逐渐成为竞技体育生物力学的新趋势,为生物力学在竞技体育领域应用提供无限可能。此外,新型运动装备研发使得竞技体育生物力学成果逐步向大众健康促进辐射。

然而,运动项目复杂多样,今后还需进一步深化和扩展对动作技术规律和运动损伤生物力学机制的认识。此外,建议以个性化运动项目的动作技术或损伤有关的关键指标为导向,发展结合可穿戴设备、大数据和人工智能的检测评估方法。同时,今后应开展多学科综合研究,进行多维度、多尺度精英运动员生物力学相关特征研究,在系统、组织、细胞和分子等不同水平上进行动作控制、肌肉组织和遗传因子等方面开展生物力学研究,为促进人类健康和社会发展作出贡献。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:李上校负责文献搜集整理,论文撰写;杨进参与文献搜集整理,论文撰写;郝卫亚负责论文设计、撰写和修改。

参考文献:

- [1] Photographic analysis of the movements of athletes [J]. *Nature*, 1901(64): 377-379.
- [2] ADAM D. Science and the World Cup: How big data is transforming football [J]. *Nature*, 2022, 611(7936): 444-446.
- [3] DREW L. How athletes hit a fastball [J]. *Nature*, 2021, 592(7852): S4-S6.
- [4] FISCUTEAN A. Data scientists are predicting sports injuries with an algorithm [J]. *Nature*, 2021, 592(7852): S10-S11.
- [5] KULKARNI S. AI and Euro 2024: VAR is shaking up football – and it's not going away [J]. *Nature*, 2024, 630(8017): 538-539.
- [6] KULKARNI S. Three ways AI is changing the 2024 Olympics for athletes and fans [J/OL]. *Nature*, 2024, <https://www.nature.com/articles/d41586-024-02427-0>.
- [7] WANG D, LI S, SONG Q, *et al.* Predicting vertical ground reaction force in rearfoot running: A wavelet neural network model and factor loading [J]. *J Sports Sci*, 2023, 41(10): 955-963.
- [8] HOSSAIN MSB, GUO Z, CHOI H. Estimation of lower extremity joint moments and 3D ground reaction forces using imu sensors in multiple walking conditions: A deep learning approach [J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2023, 27(6): 2829-2840.
- [9] SUN T, LI D, FAN B, *et al.* Real-time ground reaction force and knee extension moment estimation during drop landings via modular lstm modeling and wearable IMUs [J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2023, 27(7): 3222-3233.
- [10] PATOZ A, LUSSIANA T, BREINE B, *et al.* Comparison of different machine learning models to enhance sacral acceleration-based estimations of running stride temporal variables and peak vertical ground reaction force [J/OL]. *Sports Biomech*, 2023, doi: 10.1080/14763141.2022.2159870.
- [11] CAVEDON V, BEZODIS NE, SANDRI M, *et al.* Effect of different anthropometry-driven block settings on sprint start performance [J]. *Eur J Sport Sci*, 2023, 23(7): 1110-1120.
- [12] SADO N, YOSHIOKA S, FUKASHIRO S. Mechanical power flow from trunk and lower limb joint power to external horizontal power in the track and field block start [J]. *Eur J Sport Sci*, 2023, 23(9): 1903-1912.

- [13] WANG L, WANG W, LI S, et al. Stride length mediates the correlation between movement coordination and sprint velocity [J]. *J Sports Sci*, 2023, 41(1): 72-79.
- [14] DONALDSON B, BEZODIS N, BAYNE H. Characterising coordination strategies during initial acceleration in sprinters ranging from highly trained to world class [J]. *J Sports Sci*, 2023, 41(19): 1768-1778.
- [15] HANLEY B, BISSAS A, MERLINO S, et al. Changes in running biomechanics during the 2017 IAAF world championships men's 1500 m final [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2023, 33(6): 931-942.
- [16] 王松利, 许占鸣, 周越, 等. 中长跑运动员下肢肌肉力量、刚度与跑步经济性和运动表现的关系研究[J]. *北京体育大学学报*, 2023, 46(1): 144-156.
- [17] 刘威, 李玲, 孙楚, 等. 高水平女子撑竿跳高运动员核心技术 与成绩协同特征研究[J]. *广州体育学院学报*, 2023, 43(1): 80-87.
- [18] SHEPHERD I, LINDLEY MR, LOGAN O, et al. The effect of body position and mass centre velocity at toe off on the start performance of elite swimmers and how this differs between gender [J]. *Sports Biomech*, 2023, 22(12): 1659-1668.
- [19] PUEL F, MORLIER J, PYNE D, et al. Kinematic and dynamic analyses of the front crawl tumble turn in elite female swimmers [J]. *Sports Biomech*, 2023, 22(12): 1683-1699.
- [20] STOSIC J, VEIGA S, TRINIDAD A, et al. Effect of breakout phase on the stroke kinematics and coordinative swimming variables [J]. *Sports Biomech*, 2023, 22(12): 1669-1682.
- [21] GONJO T, OLSTAD BH. Differences between elite and sub-elite swimmers in a 100 m breaststroke: A new race analysis approach with time-series velocity data [J]. *Sports Biomech*, 2023, 22(12): 1722-1733.
- [22] MORAIS JE, BARBOSA TM, FORTE P, et al. Stability analysis and prediction of pacing in elite 1500 m freestyle male swimmers [J]. *Sports Biomech*, 2023, 22(11): 1496-1513.
- [23] MORAIS JE, MARINHO DA, COBLEY S, et al. Identifying differences in swimming speed fluctuation in age-group swimmers by statistical parametric mapping: A biomechanical assessment for performance development [J]. *J Sports Sci Med*, 2023, 22(2): 358-366.
- [24] CARVALHO DD, MONTEIRO AS, FONSECA P, et al. Swimming sprint performance depends on upper/lower limbs strength and swimmers level [J]. *J Sports Sci*, 2023, 41(8): 747-757.
- [25] ANDERSEN J, SINCLAIR P, FERNANDES RJ, et al. Is torso twist production the primary role of the torso muscles in front crawl swimming? [J]. *Sports Biomech*, 2023, 22(12): 1602-1616.
- [26] KAWAI E, GONJO T, TAKAGI H. Kinematic and kinetic parameters to identify water polo players' eggbeater kick techniques [J]. *Sports Biomech*, 2023, 22(12): 1752-1763.
- [27] HOMMA M, OKAMOTO Y, TAKAGI H. How do elite artistic swimmers generate fluid forces by hand during sculling motions? [J]. *Sports Biomech*, 2023, 22(12): 1764-1778.
- [28] MORENO FJ, HERNÁNDEZ-DAVÓ JL, GARCÍA JA, et al. Kinematics and performance of team-handball throwing: Effects of age and skill level [J]. *Sports Biomech*, 2023, 22(10): 1348-1363.
- [29] ORISHIMO KF, KREMENIC IJ, MODICA E, et al. Lower extremity kinematic and kinetic factors associated with bat speed at ball contact during the baseball swing [J/OL]. *Sports Biomech*, 2023, doi: 10.1080/14763141.2023.2269418.
- [30] LIS R, SZYMANSKI DJ, QIAO M, et al. Exploratory investigation into the impact of bilateral and unilateral jump characteristics on ground reaction force applications in baseball pitching [J]. *J Strength Cond Res*, 2023, 37(9): 1852-1859.
- [31] 杜宁, 李毅钧. 世界女排强队及其精英选手进攻表现的大数据应用研究[J]. *成都体育学院学报*, 2023, 49(3): 85-90.
- [32] 金胜真, 刘占锋, 郭志光. 青少年精英网球运动员与职业网球运动员竞技表现特征差异研究[J]. *武汉体育学院学报*, 2023, 57(2): 91-100.
- [33] CABARKAPA D, CABARKAPA DV, MILLER JD, et al. Biomechanical characteristics of proficient free-throw shooters-markerless motion capture analysis [J]. *Front Sports Act Living*, 2023(5): 1208915.
- [34] 宋校能, 徐辉, 吴贻刚. 优秀女子橄榄球运动员肩扑下肢运动模型及其肌力对撞击力量的影响[J]. *上海体育学院学报*, 2023, 47(2): 76-87.
- [35] 牛剑锋, 孙琦. 乒乓球正手拉球的表面肌电的特征[J]. *北京体育大学学报*, 2023, 46(1): 136-143.
- [36] 张栋, 邹晓双, 刘钰, 等. 动作姿态对北欧两项运动员跳台滑雪助滑和起跳气动阻力的影响[J]. *中国体育科技*, 2023, 59(9): 3-12.
- [37] MAZUREK CM, PEARSALL DJ, RENAUD PJ, et al. Differences in inter-segment coordination between high- and low-calibre ice hockey players during forward skating [J]. *Sports Biomech*, 2023, 22(10): 1303-1318.
- [38] 束洋, 梁志强, 马沐佳, 等. 我国速度滑冰国家队运动员下肢不对称性的生物力学分析[J]. *上海体育学院学报*. 2023, 47(6): 67-75.
- [39] 束洋, 李海鹏, 梁志强, 等. 越野滑雪运动员下肢双侧力亏损研究[J]. *中国体育科技*, 2023, 59(5): 3-11.
- [40] GOREHAM JA, LANDRY SC, KOZEY JW, et al. Using

- principal component analysis to investigate pacing strategies in elite international canoe kayak sprint races [J]. *Sports Biomech*, 2023, 22(11): 1444-1459.
- [41] 尹金玲, 徐菊生, 吕万刚. 国家女子静水皮艇运动员专项能力测试成绩与训练负荷指标关联分析[J]. 广州体育学院学报, 2023, 43(3): 82-91.
- [42] LI Y, KOLDENHOVEN RM, JIWAN NC, *et al.* Trunk and shoulder kinematics of rowing displayed by Olympic athletes [J]. *Sports Biomech*, 2023, 22(9): 1095-1107.
- [43] 闫家祥, 梁志强, 但林飞, 等. 我国男子赛艇双人双桨奥运会奖牌获得者拉桨动作的生物力学分析[J]. 中国体育科技, 2023, 59(4): 11-18.
- [44] NAGAO H, HUANG Z, KUBO Y. Biomechanical comparison of successful snatch and unsuccessful frontward barbell drop in world-class male weightlifters [J]. *Sports Biomech*, 2023, 22(9): 1120-1135.
- [45] 但林飞, 李建设, 石智勇, 等. 精英举重运动员级别调整的关键技术特征变化研究:以石智勇 69/73 kg 级抓举为例[J]. 中国体育科技, 2023, 59(7): 24-32.
- [46] 刘林, 彭骞, 贾孟尧, 等. 得分状态下竞技跆拳道运动员双飞踢动作下肢生物力学特征分析[J]. 医用生物力学, 2023, 38(6): 1226-1234.
- LIU L, PENG Q, JIA MY, *et al.* Analysis on biomechanical characteristics of lower extremities for athletes under effective striking during double roundhouse kick in competitive taekwondo [J]. *J Med Biomech*, 2023, 38(6): 1226-1234.
- [47] 刘林, 马勇, 蔺世杰, 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侧偏性研究[J]. 武汉体育学院学报, 2023, 57(1): 73-81.
- [48] 谢明正, 雷涛, 孙健, 等. 空间运动维度下运动性疲劳对跆拳道横踢技术运动学特征的影响研究[J]. 西安体育学院学报, 2023, 40(5): 607-614.
- [49] WINKLER M, KÜNZELL S, AUGSTE C. Competitive performance predictors in speed climbing, bouldering, and lead climbing [J]. *J Sports Sci*, 2023, 41(8): 736-746.
- [50] DWYER DB, MOLARO C, ROUFFET DM. Force-velocity profiles of track cyclists differ between seated and non-seated positions [J]. *Sports Biomech*, 2023, 22(4): 621-632.
- [51] KONS RL, ORSSATTO L, SAKUGAWA RL, *et al.* Effects of stretch-shortening cycle fatigue protocol on lower limb asymmetry and muscle soreness in judo athletes [J]. *Sports Biomech*, 2023, 22(9): 1079-1094.
- [52] ZHANG X, FONG DTP, ZHANG C, *et al.* Racewalking on a treadmill alters gait characteristics without increasing risk of disqualification [J]. *Eur J Sport Sci*, 2023, 23(3): 355-362.
- [53] FESER EH, NEVILLE J, WELLS D, *et al.* Lower-limb wearable resistance overloads joint angular velocity during early acceleration sprint running [J]. *J Sports Sci*, 2023, 41(4): 326-332.
- [54] VALKOUMAS I, GOURGOULIS V, AGGELOUSSIS N, *et al.* The influence of an 11-week resisted swim training program on the inter-arm coordination in front crawl swimmers [J]. *Sports Biomech*, 2023, 22(8): 940-952.
- [55] KROLL M, PREUSS J, NESS BM, *et al.* Effect of stroboscopic vision on depth jump performance in female NCAA Division I volleyball athletes [J]. *Sports Biomech*, 2023, 22(8): 1016-1026.
- [56] BARRERA-DOMÍNGUEZ FJ, ALMAGRO BJ, SÁEZ DE VILLARREAL E, *et al.* Effect of individualised strength and plyometric training on the physical performance of basketball players [J]. *Eur J Sport Sci*, 2023, 23(12): 2379-2388.
- [57] AZTARAIN-CARDIEL K, LÓPEZ-LAVAL I, MARCO-CONTRERAS LA, *et al.* Effects of plyometric training direction on physical performance in basketball players [J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 2023, 18(2): 135-141.
- [58] ANG CL, KONG PW. Field-based biomechanical assessment of the snatch in Olympic weightlifting using wearable in-shoe sensors and videos—A preliminary report [J]. *Sensors*, 2023, 23(3).
- [59] RANSON C, WOOTTEN M, BISWAS A, *et al.* Year-round longitudinal health surveillance in UK Olympic Summer Sport Athletes 2016–2019 [J]. *Br J Sports Med*, 2023, 57(13): 836-841.
- [60] 郝卫亚. 运动损伤生物力学研究 [J]. 医用生物力学, 2017, 32(4): 299-306.
- HAO WY. The research on biomechanics of sports injuries [J]. *J Med Biomech*, 2017, 32(4): 299-306.
- [61] CLARSEN B, BERGE HM, BENDIKSEN F, *et al.* Injury and illness among Norwegian Olympic athletes during preparation for five consecutive Summer and Winter Games [J/OL]. *Br J Sports Med*, 2023, doi: 10.1136/bjsports-2023-107128.
- [62] BEYNNON BD, TOURVILLE TW, HOLLENBACH HC, *et al.* Intrinsic risk factors for first-time noncontact ACL injury: A prospective study of college and high school athletes [J]. *Sports Health*, 2023, 15(3): 433-442.
- [63] TSUTSUI T, IIZUKA S, TAKEI S, *et al.* Risk factors for symptomatic bilateral lumbar bone stress injury in adolescent soccer players: A prospective cohort study [J]. *Am J Sports Med*, 2023, 51(3): 707-714.
- [64] POPP KL, OUTERLEYS J, GEHMAN S, *et al.* Impact loading in female runners with single and multiple bone stress injuries during fresh and exerted conditions [J]. *J Sport Health Sci*, 2023, 12(3): 406-413.
- [65] JOACHIM MR, KLIETHERMES SA, HEIDERSCHEIT BC. Preseason vertical center of mass displacement during running and bone mineral density Z-score are risk factors for bone stress injury risk in collegiate cross-country

- runners [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2023, 53(12): 1-8.
- [66] SAITO A, OKADA K, SHIBATA K, *et al.* Elasticity of the forearm flexor-pronator muscles as a risk factor for medial elbow injuries in young baseball players: A prospective cohort study of 314 players [J]. *Am J Sports Med*, 2023, 51(13): 3409-3415.
- [67] SAKATA J, TSUTSUI T, UCHIDA T, *et al.* Risk factors of throwing injuries related to pitching mechanics in young baseball players: A longitudinal cohort study [J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 2023, 32(11): 2201-2206.
- [68] POLLEN TR, WARREN M, EBAUGH D, *et al.* Intrinsic risk factors for noncontact musculoskeletal injury in collegiate swimmers: A prospective cohort study [J]. *J Athl Train*, 2023, 58(2): 185-192.
- [69] MIZUTANI Y, TAKETOMI S, KAWAGUCHI K, *et al.* Risk factors for hamstring strain injury in male college American football players—A preliminary prospective cohort study [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2023, 24(1): 448.
- [70] MORRIS A, FINO NF, PELO R, *et al.* Reactive postural responses predict risk for acute musculoskeletal injury in collegiate athletes [J]. *J Sci Med Sport*, 2023, 26(2): 114-119.
- [71] HALLER N, KRANZINGER S, KRANZINGER C, *et al.* Predicting injury and illness with machine learning in elite youth soccer: A comprehensive monitoring approach over 3 months [J]. *J Sports Sci Med*, 2023, 22(3): 476-487.
- [72] FONG DTP, MOK KM, THOMPSON IM, *et al.* A lateral ankle sprain during a lateral backward step in badminton: A case report of a televised injury incident [J]. *J Sport Health Sci*, 2023, 12(1): 139-144.
- [73] HOENIG T, GRONWALD T, HOLLANDER K, *et al.* Video analysis of Achilles tendon ruptures in professional male football (soccer) reveals underlying injury patterns and provides strategies for injury prevention [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2023, 31(6): 2236-2245.
- [74] GILL VS, TUMMALA SV, BODDU SP, *et al.* Biomechanics and situational patterns associated with anterior cruciate ligament injuries in the National Basketball Association (NBA) [J]. *Br J Sports Med*, 2023, 57(21): 1395-1399.
- [75] MARKOVIC G, KARUC I. Backheel pass during forward running as a mechanism of severe acute hamstring injury in football: A case report [J]. *Clin J Sport Med*, 2023, 33(5): 569-570.
- [76] 张嘉源, 马小远, 周志鹏, 等. 非预期条件下前交叉韧带重建术后运动员侧切动作下肢运动生物力学特征[J]. *医用生物力学*, 2023, 38(6): 1127-1133.
- ZHANG JY, MA XY, ZHOU ZP, *et al.* Biomechanical characteristics of lower limb for athletes with anterior cruciate ligament reconstruction during side cutting under unanticipated condition [J]. *J Med Biomech*, 2023, 38(6): 1127-1133.
- [77] KOTSIFAKI R, SIDERIS V, KING E, *et al.* Performance and symmetry measures during vertical jump testing at return to sport after ACL reconstruction [J]. *Br J Sports Med*, 2023, 57(20): 1304-1310.
- [78] PINHEIRO VH, BORQUE KA, LAUGHLIN MS, *et al.* Determinants of performance in professional soccer players at 2 and 5 years after ACL reconstruction [J]. *Am J Sports Med*, 2023, 51(14): 3649-3657.
- [79] LINDBLOM H, SONESSON S, TORVALDSSON K, *et al.* Extended knee control programme lowers weekly hamstring, knee and ankle injury prevalence compared with an adductor strength programme or self-selected injury prevention exercises in adolescent and adult amateur football players: A two-armed cluster-randomised trial with an additional comparison arm [J]. *Br J Sports Med*, 2023, 57(2): 83-90.
- [80] MASON J, NIEDZIELA D, MORIN JB, *et al.* The potential impact of advanced footwear technology on the recent evolution of elite sprint performances [J]. *Peer J*, 2023(11): e16433.
- [81] RODRIGO CARRANZA V. Running footwear matters: Decoding the influence of running shoe characteristics on physiology, biomechanics and running performance (PhD Academy Award) [J]. *Br J Sports Med*, 2023, 57(24): 1581-1582.
- [82] HOENIG T, SAXENA A, RICE HM, *et al.* Navigating the challenges and opportunities with 'super shoes': Balancing performance gains with injury risk [J]. *Br J Sports Med*, 2023, 57(23): 1472-1473.
- [83] TENFORDE A, HOENIG T, SAXENA A, *et al.* Bone stress injuries in runners using carbon fiber plate footwear [J]. *Sports Med*, 2023, 53(8): 1499-1505.
- [84] MARTIN C, TOUZARD P, HORVAIS N, *et al.* Influence of shoe torsional stiffness on foot and ankle biomechanics during tennis forehand strokes [J]. *Eur J Sport Sci*, 2023, 23(6): 914-924.
- [85] RÖHRL F, FEDEROLF P, MOHR M. Ergonomic saddle design features influence lumbar spine motion and can reduce low back pain in mountain biking [J/OL]. *Sports Biomech*, 2023, doi: 10.1080/14763141.2023.2284173.
- [86] 王虹, 刘丹, 郑伟涛, 等. 服装不同部位面料差异对跳台滑雪飞行阶段气动性能的影响[J]. *体育科学*, 2023, 43(3): 89-97.
- [87] SEO K, OKUIZUMI H, KONISHI Y, *et al.* Measurement of aerodynamic force and moment acting on a javelin using a magnetic suspension and balance system [J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 391.