

文章编号:1004-7220(2025)03-0503-011

· 专家论坛 ·

竞技体育运动生物力学 2024 年度研究进展

陈卉萌^{1a}, 刘卉^{1a,1b}, 于冰²

(1. 北京体育大学 a 运动人体科学学院, b 中国运动与健康研究院, 北京 100084;

2. 美国北卡罗来纳大学教堂山分校, 北卡罗来纳州 27599)

摘要: 运动生物力学主要研究体育运动中人体及器械力学运动规律,是竞技体育科学研究的重要支撑学科。本文回顾了近年来运动生物力学数据测量以及计算分析技术的进展。在此基础上,重点综述了 2024 年运动生物力学在提高运动表现、运动损伤的预防与康复,以及运动装备研发方面的研究成果,希望能为我国运动生物力学科研人员提供参考,拓宽研究视野,推动该学科在竞技体育中的深入应用与发展。

关键词: 竞技体育; 运动生物力学; 运动表现; 运动损伤预防; 运动损伤康复; 运动装备

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2025.03.001

Research Progress of Competitive Sports Biomechanics in 2024

CHEN Huimeng^{1a}, LIU Hui^{1a,1b}, YU Bing²

(1a. School of Sport Science; 1b. China Institute of Sport and Health Science, Beijing Sport University, Beijing 100084, China; 2. University of North Carolina at Chapel Hill, North Carolina 27599, USA)

Abstract: Sports biomechanics mainly investigates the mechanical laws governing human movement and equipment in sports, and is an important supporting discipline in the scientific research of competitive sports. This review summarizes recent advancements in data collection and computational analysis techniques in sports biomechanics. On this basis, it focuses on the research progress in 2024 regarding the application of biomechanics in enhancing sports performance, preventing and rehabilitating sports injuries, and developing sports equipment. The aim is to provide a reference for researchers in China, broaden research perspectives, and promote the in-depth application and development of this discipline in the field of competitive sports.

Key words: competitive sports; sports biomechanics; sports performance; sports injury prevention; sports injury rehabilitation; sports equipment

运动生物力学主要研究体育运动中人体及器械力学运动规律,是竞技体育科学研究的重要支撑学科。该学科兴起于 20 世纪 60 年代,以经典力学的理论和方法为基础,融合解剖学、生理学、神经科学和现代信息技术等多学科知识,致力于揭示人体运动的规律,服务于竞技成绩的提升与运动损伤的

预防。随着传感器、人工智能、大数据和可穿戴数据采集设备等新技术的不断发展,运动生物力学的研究手段不断丰富,研究范围持续拓展,在竞技体育中的应用价值日益凸显。本文综述了 2024 年度竞技体育领域的运动生物力学研究进展,以期为中国运动生物力学科研人员提供参考,拓展研究思

收稿日期:2025-05-20; 修回日期:2025-06-05

基金项目:国家自然科学基金项目(12132009)

通信作者:于冰,教授,E-mail: byu@med.unc.edu

路,推动学科在竞技体育中的深入应用与发展。

1 运动生物力学数据测量与计算分析技术

运动生物力学数据测量与计算分析技术是生物力学研究方法的重要组成部分,在一定程度上也是生物力学应用价值的关键支撑。随着竞技体育对动作细化分析,运动表现优化,和对个体差异识别的要求不断提高,运动生物力学数据采集技术经历了从实验室控制环境下的单一测量到多维度、多

通道集成采集的快速演进。当前,生物力学数据测量技术不仅涵盖传统的运动学、动力学与肌电信号测量,还逐渐融合神经科学、工程技术与人工智能等不同领域的研究工具与技术,实现对运动过程从宏观动作到微观机制的多层次、多角度分析与解读。

1.1 运动生物力学数据测量技术进展

运动生物力学研究技术主要依赖各类测量仪器,对运动过程中涉及的运动学、动力学、生物电信号和其他关键参数进行定量分析(见图1)。

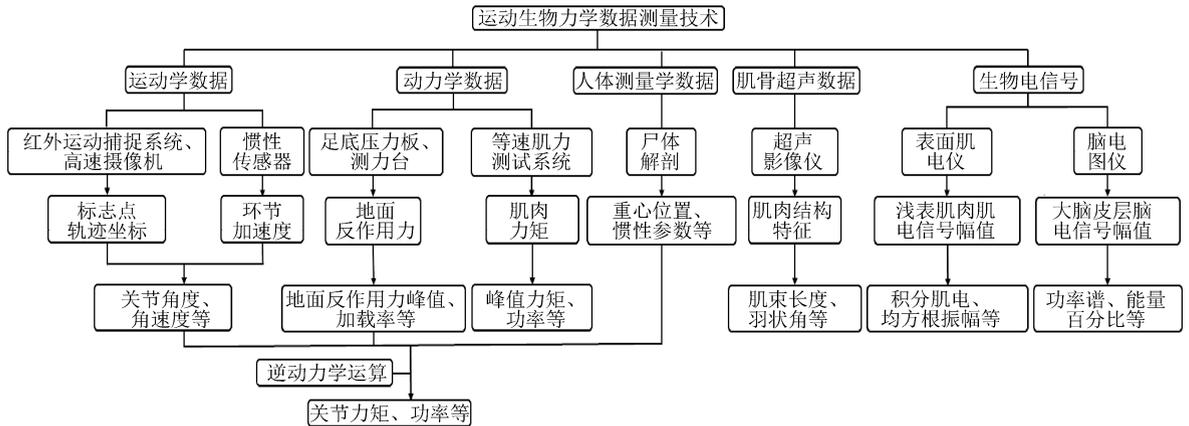


图1 运动生物力学数据测量技术

Fig. 1 Data collection technology of sports biomechanics

运动学数据反映物体在空间和时间维度上的运动特征,包括速度、角度和位移等。在运动生物力学研究中,常用的运动学数据采集设备主要有红外运动捕捉系统、高速摄像机和惯性传感器。这些设备通过采集目标标志点的轨迹坐标或身体各部位的加速度信息来计算关节角度、角速度等运动学参数。近年来,运动学采集设备不断优化,适用性持续提升。例如,水下光学运动捕捉系统的出现,使得准确分析水中运动项目的运动学特征成为可能,拓展了传统设备在特殊环境下的应用范围。

动力学参数用于描述物体所受外力与运动状态之间的关系,包括力、力矩和冲量等。在运动生物力学研究中,常用的动力学数据采集设备主要包括足底压力板、测力台和等速肌力测试系统。足底压力板和测力台通过采集人体与其接触表面之间力的大小、方向与作用点,获得地面反作用力(ground reaction force, GRF)和压力中心。等速肌力测试系统通过测试关节在等长或等速(向心收缩和离心收缩)条件下的输出力矩,获得峰值力矩、功

率及最大力矩对应角度等动力学指标。随着研究需求的多样化,动力学数据采集设备也不断发展,出现了专门用于分析游泳入水和转身动作、短跑起跑技术的测力设备,以及三维测力跑台和三维测力阶梯等先进仪器。

虽然尸体解剖并非常规的运动生物力学测试技术,但其获得的人体重心位置、各环节相对质量和环节惯性参数等人体测量学数据,在后续数据分析中具有重要价值。基于运动学参数(位置、角速度和加速度)、外力(一般为GRF)和环节惯性参数,可通过逆动力学运算求解目标关节的力矩和功率等动力学变量,探讨各种动作差异产生的内在原因。

肌骨超声成像(musculoskeletal ultrasonography, MSKUS)是一种非侵入性高分辨率成像技术,通过高频探头发射声波穿透皮肤并接收回波信号,借助计算机图像处理生成浅层软组织的二维影像,从而直观呈现肌肉等组织的结构特征(见图2)。该技术具有便携性强、操作简便、成本效益高且无明显禁

忌等优势^[1],近年来在运动生物力学研究中的应用日益广泛,已成为评估肌肉形态和结构的常用工具。在实际应用中,MSKUS 可实现运动状态下肌肉结构的实时测量,获取包括肌束长度、羽状角等关键指标,为肌肉功能评估和训练效果分析提供可靠的量化依据。

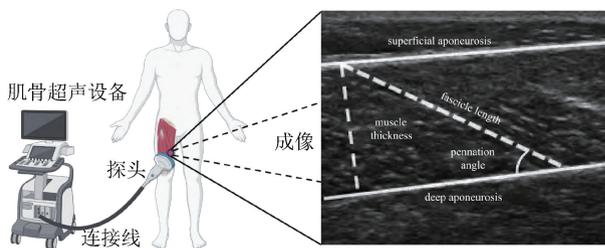


图2 肌骨超声成像技术^[2-3]

Fig. 2 Musculoskeletal ultrasound imaging technology^[2-3]

注:superficial aponeurosis 为浅层腱膜;deep aponeurosis 为深层腱膜;fascicle length 为肌束长度,指肌纤维束和浅、深层腱膜相交的直线距离;pennation angle 为羽状角,指肌束走向与肌肉走向之间的夹角;muscle thickness 为肌肉厚度,指浅表腱膜与深腱膜之间的线性垂直距离。

生物电是指生物体在生命活动过程中,器官、组织和细胞所产生的电位变化与极性波动。其中,肌电 (electromyography, EMG) 和脑电 (electroencephalography, EEG) 已被广泛应用于动作技能评估和姿势控制研究。EMG 信号反映了骨骼肌在兴奋过程中由于肌纤维动作电位的传导和扩散所引发的电位变化。一般认为,这一电位变化的强弱代表了骨骼肌兴奋度的高低。目前,常见的 EMG 信号采集方式主要包括针电极和表面电极。针电极需要直接插入目标肌肉,既适用于采集表层肌肉 EMG,也适用于采集深层肌肉 EMG,但会造成一定程度的损伤。在运动生物力学研究中,通常采用非侵入性的表面电极进行信号采集,尽管这种技术只能记录表层肌肉 EMG,但操作简便、舒适性较好,更适合运动状态下的连续监测。EEG 是大脑活动时的电波变化,是脑神经细胞的电生理活动在大脑皮质或头皮表面的总体反映。EEG 信号按其频率特征可分为 4 个主要波段,分别为 β 波、 α 波、 θ 波和 δ 波。 β 波为高频 EEG 活动,通常出现在清醒状态,尤其在认知、推理、计算和阅读等主动思维活动中最为活跃。 α 波为静息状态下的基本 EEG 节律,在闭眼放松、无外界刺激时最为明显。 θ 波多出现

在意识模糊或催眠状态下。 δ 波为最低频的脑电波,与深度放松及恢复性睡眠密切相关。为适应更多应用场景并实现数据深度解析,近年来出现了水下无线表面肌电仪和高密度 EMG 及 EEG 系统等设备。水下无线表面肌电仪克服了传统 EMG 采集设备在水中使用的限制,高密度表面 EMG 和 EEG 系统则通过多通道高密度传感器,提高了空间分辨率和信号细节捕捉能力,实现了对肌肉和脑神经活动的精细分析。

1.2 运动生物力学数据计算与分析技术进展

近年来,人工智能 (artificial intelligence, AI) 技术的快速发展,进一步丰富和拓展了运动生物力学的研究手段。以机器学习和深度学习为核心的算法体系,正逐步渗透至运动生物力学研究中,包括数据采集与预处理、特征提取与动作模式识别、变量估计和运动表现分析等,提高了研究效率与智能化水平。

在数据采集与预处理方面,AI 与高精度传感技术的结合提升了多维运动数据的自动化获取与处理能力。以可穿戴惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU) 和表面肌电传感器为例,研究人员可实时获取运动员的动作轨迹与肌肉 EMG 信号,并结合 AI 算法实现数据降噪、时序对齐与特征标注,有效减少了人工干预成本^[4-6]。同时,计算机视觉与深度学习的发展使得普通摄像设备即可实现人体关键点识别与运动姿态追踪。以开源工具 OpenPose 为例,其在跑步、跳跃等运动模式识别中已展现出良好的可重复性和准确性^[7-8],为运动生物力学研究提供了低成本的新技术路径。然而,有研究指出,在跳远等真实竞技场场景中,OpenPose 的识别精度尚难以满足高要求的赛内表现分析,此类项目仍需依赖手动分析以获取更可靠的数据^[9]。

在特征提取与动作模式识别方面,机器学习与深度学习的引入提高了对复杂运动特征的建模能力。在短跑动作识别中,Cui 等^[10]设计了一种基于决策树的机器学习算法,该算法通过结合随机森林与梯度提升树的优势,能够自动提取运动特征并自适应调整超参数和树结构,从而优化模型性能。Wang 等^[11]设计了一种结合三维卷积神经网络和长短期记忆网络的算法,用于自动提取动作的时空特征并识别篮球比赛中的各种动作。在不同光照和

场景条件下,该模型的识别准确率达 93.1%。

在变量估计与运动表现分析方面, AI 技术提升了对关键生物力学参数的预测能力,有助于识别影响运动表现的关键因素。Zhao 等^[12]开发了一种基于长短期记忆网络的肌力预测系统。该系统通过实时输入表面 EMG 信号,能准确估算传统方法难以直接测量的肌肉力量输出。Chen 等^[13]提出了一种融合卷积神经网络和扩展长短期记忆网络的 GRF 预测模型。该模型通过惯性传感器采集的下肢关节角度数据,准确预测跑步支撑期的 GRF,实现了仅凭运动学数据获取动力学信息,从而降低了实验设备需求与研究门槛。类似地,周玉林等^[14]设计了一种基于神经网络估算侧切动作 GRF 和下肢关节力矩的模型^[14]。该模型以人体各节点坐标为输入变量,能够较为准确的预测动力学参数。进一步,该研究团队还比较了以全身和下肢标志点坐标为输入的人工神经网络模型在侧切动作 GRF 和关节力矩预测中的表现。结果表明,仅使用下肢标志点输入的模型即可准确估计 GRF 和下肢关节力矩,且在膝关节力矩预测方面表现更佳,而使用全身标志点输入的模型在髌、踝关节力矩的预测中效果更好^[15]。

同时,肌肉协同分析正受到广泛关注,并逐渐成为理解运动控制策略的重要工具。非负矩阵分解、主成分分析和独立成分分析等降维方法的引入,使研究者能够从高维 EMG 数据中辨别肌群协同激活模式,揭示复杂动作中多块肌肉的协调控制机制。其中,非负矩阵分解将多通道 EMG 信号分解为若干协同模块及其对应的时序特征,每个模块反映特定肌群在运动中的协同激活模式。为进一步提升肌肉协同分析的维度感知能力,Chen 等^[16]提出了非负 Tucker 张量分解法,该方法在保留非负矩阵分解的空间和时间信息的基础上引入频域维度,从而更全面地捕捉肌肉协同在频谱特性上的变化。相比之下,主成分分析通过提取数据中最大方差方向的主成分来降维,适用于识别不同任务或个体间 EMG 信号特征的整体变化趋势,计算效率较高,但对噪声敏感,且分解结果可能不具备明确的生理含义。独立成分分析更关注信号源之间的统计独立性,常用于从混合 EMG 信号中分离潜在的独立运动单元,适合识别复杂动作中的独立控制策略。

2 运动生物力学助力提高运动表现

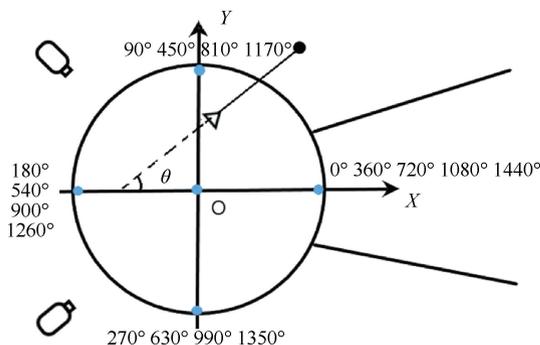
运动表现的提高始终是竞技体育科学研究的核心目标。作为关键支撑学科,运动生物力学通过定量分析运动员在训练和比赛中的运动学和动力学等特征,探索影响技术动作效率与运动表现的关键因素,通过评估不同训练与干预方法的效果,探寻提高运动表现的有效途径。

2.1 运动生物力学分析动作技术

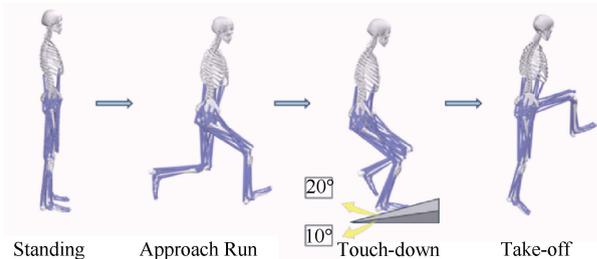
动作技术的优化是提高多种竞技项目运动表现的重要途径。运动生物力学通过采集和分析运动员技术动作中的生物力学参数,识别影响运动表现的关键因素,从而为技术动作的优化提供理论依据。

2024 年,多项研究围绕不同项目的关键动作技术,探讨其生物力学特征及优化途径。在球类项目中,晋鹏飞等^[17]研究发现,乒乓球运动员正手弧圈球动作中,全脚掌触地时侧向 GRF 和伸膝力矩较小,内翻力矩和外旋力矩较大,提示该触地方式虽有利于为上肢击球提供稳定支撑,但伸膝力矩的减小可能会限制下肢的推进能力,并在一定程度上影响了下肢向上肢的力量传递效率。Wang 等^[18]使用红外运动捕捉系统和三维测力台采集了羽毛球运动员正反手弓箭步动作中的运动学和动力学特征,发现在正手弓箭步中采用分步法可以增加髌关节的外展角和 GRF 加载率,并减小着地时的膝关节屈角以及 GRF 峰值间隔时间。这些发现揭示了分步法在优化羽毛球运动员弓箭步技术、提高运动表现和降低受伤风险方面的潜力。Huang 等^[19]采用视频解析技术探究了链球旋转过程中运动员的动作技术对出手速度的影响,认为链球从最低点上升至最高点的过程中,运动员应在单脚支撑阶段加快右脚的快速落地,并增大链球的旋转半径,从而减小右脚落地时的水平方位角,提高出手速度(见图 3)。

跳跃类项目的运动表现受到多种因素的影响。Li 等^[20]通过采集撑杆跳运动员在助跑和起跳阶段的运动学和 GRF 数据,建立了预测运动表现的模型。研究发现,提高助跑和起跳速度,以及增加水平推进 GRF,均有助于提升撑杆跳成绩。Zhang 等^[21]研究了起跳板对踝关节背屈活动范围的限制,探讨了不同踝关节背屈角度(无背屈、10°背屈、20°

图3 链球投掷的水平方位角示意图^[19]Fig. 3 Schematic diagram of the horizontal azimuth angle of hammer throwing^[19]注: θ 为链球水平方位角。

背屈)对跳远过程中的下肢生物力学特征的影响(见图4)。结果显示,踝关节背屈 10° 时,垂直速度增加且水平速度损失最小,这一角度最有利于提高运动员的起跳表现。

图4 使用起跳板跳远过程^[21]Fig. 4 Long jump process using a take-off board^[21]

在需要高速移动的项目,如自行车计时赛、滑雪和短跑等运动中,空气动力学阻力是影响运动员运动表现的关键因素之一。Giljarhus 等^[22]提出了一种新的方法来优化运动员的姿态,以减少空气动力学阻力。这种方法首先使用虚拟骨骼法对运动员的姿态进行参数化,然后通过计算流体动力学模拟计算不同姿态下的空气阻力。该研究以自行车计时赛为例,展示了该方法的应用。结果显示,优化后的姿态比初始姿态减少了17%的空气阻力,从而有助于降低能量消耗并提高运动员在比赛中的速度表现。

2.2 运动生物力学优化战术策略

基于生物力学手段优化战术策略时,常通过各种机器学习算法来对运动员的运动状态和站位等

数据进行建模,预测运动员的运动表现和比赛走势,从而为教练提供战术决策支持。Morciano 等^[23]设计了一款集成了全球定位系统(global positioning system, GPS)、惯性传感器和心率监测仪的可穿戴背心,采集了20名职业足球运动员(前锋5人、中场6人和后卫9人)63次训练中加速、减速、高强度运动及特定速度阈值下的跑动距离,并使用人工神经网络、随机森林、逻辑回归和决策树等机器学习算法对球员的运动表现进行建模和预测,帮助教练实时掌握球员状态,优化战术部署和训练策略。类似地,Shen 等^[24]基于卷积神经网络分析了女足球员的技术动作、站位和射门角度等信息,实时监测并识别球员的状态和失误,从而为教练员制定战术策略提供支持。

由于多种高精度的运动生物力学数据采集只能在实验室条件下进行,难以应用于比赛或运动员的日常训练中,因此目前战术策略优化的研究多采用便携性强、对运动员干扰较小的数据采集设备,如惯性传感器和高速摄像机。然而,这些设备通常只能获取相对简单的运动学参数,如关节角度和跑动距离等,难以全面反映运动过程中的生物力学特征。未来研究应加强对多种测量技术集成的可穿戴设备及更适用于实战环境的数据采集系统的研发与应用,以获取更丰富的生物力学信息,为教练员提供更加准确、系统的战术决策支持。

2.3 运动生物力学评价训练效果

训练效果的科学评估是优化训练内容和保证训练质量的基础。运动生物力学通过采集和分析运动员在训练前后关键指标的变化,量化训练的效果,揭示训练方案改善运动表现的生物力学机制,为高效训练方案的筛选和制定提供依据。相较于教练员和运动员的主观判断,运动生物力学提供了更加客观、多维、可量化的评估手段,为构建精准高效的训练反馈体系提供了有力支撑。

2024年,多项研究聚焦于通过关键生物力学指标量化训练对运动表现的提升,并探讨了训练的起效机制。Romero 等^[25]比较了8周重复冲刺训练前后男子足球运动员冲刺时的运动学特征,结果表明该训练有效提升了冲刺速度,减小了疲劳状态下的躯干前倾角和膝关节伸展角,有助于更安全地提高冲刺运动表现。Valkoumas 等^[26]使用4台数字摄像

机采集了11周阻力冲刺游泳训练前后运动员的运动学数据,验证了这种训练方法可以有效提高运动员的平均游泳速度。进一步分析表明,这一提升主要源于总划水时间的缩短,尤其是非推进阶段持续时间的缩短,同时伴随手部平均俯仰角的减小,从而降低了水的阻力,提高了推进力。

同时,还有一些研究采用生物力学手段比较了不同训练方案的效果,以及同种训练在不同负荷强度下的差异。Liu等^[27]在3种不同抗阻训练前后对受试者的肩、膝关节进行了等速肌力测试,结果显示,相较于其他训练方法,8周金字塔式训练更有利于提高两关节的峰值肌力矩,表明该训练方法更有效地促进了关节肌肉的力量发展。Pietraszewski等^[28]比较了中长跑运动员在反重力跑步机上训练时,不同跑速和减重水平对下肢肌肉激活特征的影响。结果发现,随着跑速的增加,各肌肉激活水平下降,且速度越高,减重水平对肌肉激活程度的影响越大。在反重力跑步训练中,跑速和减重比例的设置会显著影响运动模式,应在制定训练负荷时加以考虑。

3 运动生物力学助力运动损伤的预防和康复

运动损伤的预防与康复是保障运动员可持续发展的重要环节。运动生物力学通过定量分析训练和比赛中的关节运动模式、力学特征及肌肉活动,识别导致损伤的潜在风险因素,为制定科学的预防策略提供理论依据。同时,借助生物力学手段监测康复过程中的功能恢复情况,有助于评估干预效果、优化康复方案,从而提升运动员的健康保障水平,延长运动寿命,助力其维持高水平竞技状态。

3.1 运动生物力学探究损伤风险因素

识别运动损伤发生的生物力学风险因素是制定有效预防策略的前提。2024年出现了多项聚焦常见运动损伤的研究,包括对前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)损伤、慢性踝关节不稳(chronic ankle instability, CAI)及跑步相关损伤(running-related injury, RRI)等运动损伤的研究。这些研究通过前瞻性研究方法和系统综述方法深入探讨这些运动损伤的危险因素。与此同时,还有一些研究试图通过临床试验的研究方法尝试通过

针对性训练干预来调节相关风险指标,从而预防损伤的发生。

ACL损伤是最常见的运动损伤之一,常发生于涉及快速变向、急停和跳跃的运动项目中,如足球和篮球等。目前关于ACL损伤的风险因素尚未达成共识,相关研究结果尚存分歧。一项前瞻性研究结果表明,女性优秀团队球类运动员在进行侧切动作时,膝关节生物力学参数不能作为继发性ACL损伤的危险因素^[29]。另一项前瞻性研究发现,年轻女性足球运动员新发非接触性ACL损伤与较低的腘绳肌与股四头肌力量比、较高的膝关节伸展肌力以及较长的足球经验相关^[30]。Straub等^[31]综述了原发性ACL损伤的生物力学危险因素,指出相关文献中提到的运动学危险因素包括髌膝屈曲角度减小、膝关节外翻或内旋增加,动力学危险因素包括垂直GRF和膝关节力矩增加。然而,所有这些危险因素的证据都较为有限,且相互之间存在一定的矛盾。

虽然ACL损伤的风险因素尚未达成一致,研究者们仍在积极探索有效的预防措施和训练方法来降低ACL损伤的发生风险。Weir^[32]研究认为,由于ACL损伤大多是非接触性损伤,因此理论上是可以预防的。这些预防措施包括:①调整运动员的技术以减少膝关节的外部负荷;②增加膝关节和髌关节周围肌肉的肌力,从而减轻膝关节的过高负荷;③提高运动员在动态运动任务中的感知能力,以便在运动过程中提前协调并实施理想的运动模式。Magaña-Ramírez等^[33]探讨了不同训练方法对降低足球运动员ACL损伤风险的效果,发现FIFA 11+训练能够有效降低ACL损伤的发生率。Mercurio等^[34]和Cierson等^[35]也探究了FIFA 11+训练对ACL损伤预防的效果。尽管两项研究均认为FIFA 11+训练有助于降低ACL损伤风险,但研究结果却存在一定的矛盾。Mercurio等^[34]研究表明,FIFA 11+训练能够减小足球运动员垂直跳跃动作中的膝外翻角度,同时增加膝关节屈曲角度。而Cierson等^[35]研究却显示,FIFA 11+训练不仅减小了垂直跳跃动作中的膝关节最大外翻角度,还降低了膝关节最大屈曲角度。值得注意的是,在ACL损伤的危险因素尚未被充分明确的背景下,许多预防研究建立在假设性机制之上,可能影响相关预防措施的有效性和适用性。因此,未来研究应先聚焦于

损伤机制的识别和验证,以提高预防措施的科学性与靶向性。

CAI 通常发生在急性踝关节内翻扭伤后未完全康复的运动员中。Yu 等^[36]对比了 CAI 患者和健康人在侧切动作中的下肢生物力学特征,发现 CAI 患者在支撑期表现出较小的髌关节伸展角度和较大的踝关节内翻角度。Altun 等^[37]研究发现,在跑步过程中,CAI 患者支撑初期的踝关节跖屈角度峰值增大,支撑初期和支撑中期的踝关节跖屈力矩峰值减小。在下落着地动作的着地初期,患者的伸髌力矩和髌关节内收角度峰值明显增加。上述研究均为回顾性设计,因此无法确定上述生物力学改变是导致 CAI 发生的风险因素,还是损伤后的代偿结果。未来仍需进一步开展前瞻性研究,以明确 CAI 的发生机制和关键风险指标。

尽管 CAI 在运动人群中发病率较高,但有关其预防策略的研究仍较为有限。近期,一项研究通过在踝关节处粘贴肌内效贴布,探讨其对下肢运动损伤风险因素的影响,结果显示该方法可通过降低踝关节内翻角度来预防踝关节扭伤^[38]。此外,一项伞状 Meta 分析总结了当前针对 CAI 的预防措施,指出体重和身体质量指数较低的个体在完成跳跃等动态任务后表现出更短的稳定时间,有助于降低 CAI 的发生风险^[39]。

在各类跑者中,RRI 均有较高发病率,特别是在训练计划不合理、技术动作不当或个体结构功能存在缺陷的情况下。常见的 RRI 包括髌胫束综合征、髌股疼痛综合征、跟腱病、足底筋膜炎等。近期,一项前瞻性研究发现,跑步着地和离地时刻小腿更接近垂直于地面,可能是增加大众跑者发生 RRI 的潜在风险因素^[40],而髌外旋肌力增加可能是 RRI 的保护因素^[41]。另一项前瞻性研究结果显示,之前关于足底筋膜炎的生物力学风险因素,如加载率,似乎并不是足底筋膜炎的风险因素,而跑步支撑期踝关节外翻角度较大或许是足底筋膜炎的保护因素^[42]。

为预防 RRI 的发生,Shen 等^[43]综述了多项关于实时生物反馈步态再训练的研究。结果表明,这种训练方式有助于降低胫骨峰值加速度、垂直平均加载率和垂直瞬时加载率,并且视觉生物反馈训练比听觉生物反馈训练表现出更好的效果。Zhang

等^[44]基于实时动态超声成像,评估了 12 周跑姿转换训练对跑者跟腱形态和力学特性的影响,结果显示,训练后多数跑者从后跟着地转换为前掌着地模式,其余跑者的足部着地角度也有所减小,并且训练增加了跟腱的长度和横截面积,提升了跟腱承受机械负荷的能力。Leugers 等^[45]进一步发现,多阶段步态再训练不仅能够提高患有 RRI 的现役军人在跑步过程中的步频,还能促使其逐步过渡至前掌着地模式。该模式有助于平缓 GRF 的加载过程,降低下肢组织所承受的冲击和负荷,从而减小再次受伤的风险。

3.2 运动生物力学评价康复训练效果

ACL 重建术是治疗 ACL 损伤的主要手段,然而术后患者仍面临较高的 ACL 二次损伤风险,提示术后仍需特别关注膝关节运动功能的恢复情况。任爽等^[46]比较了 ACL 重建术后患者进行侧切动作时,重建侧与未伤侧膝关节的运动学和动力学参数。结果表明,ACL 重建术后患者的膝关节运动在矢状面和水平面上存在明显的不对称特征,表现为重建侧膝关节屈曲角度、伸展力矩和外旋力矩较小,外旋角度较大。这些生物力学特征提示 ACL 重建术后可能存在功能恢复不完全的问题,为优化术后康复训练和制定再损伤预防策略提供了理论依据。

针对上述问题,多项研究采用运动生物力学技术手段评估 ACL 重建术后的康复训练和辅助干预效果。傅升星等^[47]探讨了伸膝阻尼训练对单侧 ACL 重建术后患者跑步时膝关节生物力学特征及双侧对称性的影响。结果发现,伸膝阻尼训练未能改善单侧 ACL 重建术后男性患者跑步时的异常膝关节生物力学特征及双侧对称性。Zhang 等^[48]研究表明,肌内效贴干预可以减小 ACL 重建运动员在 90°侧切动作中的膝外翻角度,从而降低 ACL 二次损伤风险。此外,Ashour 等^[49]比较了 ACL 重建术后不同关节训练顺序的效果,发现无论先训练膝关节还是踝关节均可增加膝关节伸展力矩,而先进行踝关节训练还可进一步提高膝关节屈曲力矩,提示该顺序可能更有利于术后功能恢复。

在 CAI 的康复训练中,平衡训练、力量训练和振动训练是近期研究关注的重点方向。Park 等^[50]使用手持测力计和测力台,评估了 CAI 男性足球运

动员在接受为期6周的平衡或力量训练前后的踝关节肌肉力量以及静态平衡能力。结果显示,两种训练均增加了踝关节内翻和背屈肌力,减小了压力中心的位移和置信椭圆面积。类似地,Yeum等^[51]研究发现,4周髌关节力量训练可以增加CAI患者髌关节伸展肌肉力量,并减小压力中心的置信椭圆面积。一些研究还关注了振动训练对于CAI的康复作用。Hoveidaei等^[52]的综述表明,振动训练可有效提升CAI患者的动态平衡能力。Ryo等^[53]探究了即刻振动训练对CAI患者在星形位移平衡测试中踝关节运动平滑度的影响,发现该训练并未显著改善运动平滑性。Chen等^[54]比较了振动训练和本体感觉神经肌肉易化训练对CAI运动员侧切动作中下肢生物力学特征的影响,发现两种训练方法均可减小着地阶段最大髌外展角、最大屈膝角、最大屈膝角速度和最大踝内翻角速度,同时增加最大踝背屈力矩,提示两种训练可能均增强了踝关节周围的神经肌肉传导功能,并且训练后两组运动员做侧切动作时外踝扭伤的风险没有差异。

不同类型的RRI应采用不同的康复治疗策略。韩秀兰等^[55]研究表明,4周踝关节松动手联合臀肌力量训练可增加慢性足底筋膜炎患者的踝背屈活动度,训练结束后第3个月还观察到髌关节伸展和外展峰值力的增加,提示该训练方法有利于足底筋膜炎的康复。对于跟腱病跑者,Kim等^[56]的综述指出,感觉运动训练(如平衡训练、平衡联合稳定性训练和全身振动训练)与其他干预方法(如离心训练、等长训练和被动物理治疗)联合使用,能够增加患者肌肉力量、垂直纵跳高度和踝关节跖屈峰值力矩,同时缓解疼痛。此外,Mikaili等^[57]采用超声成像技术评估8周股内斜肌递进强化训练的效果,发现训练后髌骨关节疼痛综合征合并髌骨外移患者的髌骨偏移角明显减小,表明了这种训练在纠正髌骨外移方面的有效性。

4 运动生物力学助力运动装备研发

随着运动生物力学技术的进步,运动装备的功能性设计日益精细化和科学化。研究者借助各种生物力学测量技术和分析手段,深入探索运动装备与运动表现及损伤风险之间的复杂关系。这不仅促进了装备在提升运动效率、优化运动技术方面的

创新,也为减少运动伤害、提升运动安全性提供了理论基础和设计指导。

4.1 运动鞋

先进鞋类技术(advanced footwear technology, AFT)是近期跑鞋研究的热点。AFT跑鞋的典型特征是在鞋底嵌入弧形碳纤维板,以提升纵向屈曲刚度,从而最大程度减少跖趾关节的机械能损失。Rodrigo-Carranza等^[58]研究了不同纵向屈曲刚度跑鞋对跑步经济性和时空参数的影响,发现在13 km/h的跑速下,中等屈曲刚度的跑鞋能实现最佳跑步经济性,且各条件下的时空参数无显著差异。Langley等^[59]研究表明,AFT跑鞋可使世界级男子马拉松选手的跑速提升约1%。Alda-Blanco等^[60]评估了AFT钉鞋在不同路面上的表现,发现这种钉鞋有助于在跑道路面上提升3 000 m跑的运动表现,并降低运动员的呼吸交换律。Bernuz等^[61]比较了Nike AFT钉鞋与传统钉鞋对短跑表现的影响,发现穿着Nike AFT钉鞋的30 m冲刺时间平均缩短了0.02 s。

除跑鞋外,其他运动项目的鞋类设计对运动表现也有重要影响。Shen等^[62]研究了羽毛球鞋扭转刚度对下肢生物力学特征的影响,发现中等扭转刚度的鞋能在灵活性与稳定性之间取得良好平衡,优化运动表现并降低损伤风险。高扭转刚度的鞋虽然限制了踝关节的活动范围,但有助于增加推进力,加快动作速度。钟茵菲等^[63]探究了不同鞋帮高度的篮球鞋对踝关节生物力学参数的影响。结果显示,在侧切动作中,高帮鞋会降低最大跖屈角速度并增加最大踝内翻角度,提示力量型球员更适合高帮鞋以增强稳定性,而速度型球员则更适合选择低帮鞋以提升灵活性。

4.2 运动内衣

运动内衣是女性运动员在训练与比赛中不可或缺或装备之一,其主要作用在于提供乳房支撑、减少运动时的乳房晃动及相关不适感,从而提升运动表现并降低组织损伤风险。一项研究评估了不同类型运动内衣(专业高支撑型、专业低支撑型、个体自选型)和乳房体积对10 km自行车运动表现的影响^[64]。结果显示,不同运动内衣类型及乳房体积对峰值输出功率无显著影响。然而,乳房体积大的运动员在骑行过程中感受到更强烈的胸部紧绷感,并且高支撑型运动内衣同样会引发明显的胸部紧

绷感,但这些主观不适并不会影响运动员的运动表现。

5 总结与展望

运动生物力学作为竞技体育科学研究的重要支撑学科,在提升运动表现、预防运动损伤和优化训练方案等方面发挥着重要作用。2024 年,随着传感器技术、AI、大数据和可穿戴设备的迅速发展,运动生物力学数据测量技术不断丰富,研究效率和智能化水平得到了显著提升。在运动表现提升方面,运动生物力学通过深入分析动作技术,识别影响运动表现的关键因素,为技术优化提供理论依据;通过模拟运动员的运动状态和站位等信息,预测运动员的运动表现和比赛走势,辅助教练进行战术决策;通过比较训练前后的关键指标变化,量化训练效果,为制定高效训练方案提供科学支持。在运动损伤的预防与康复方面,研究者们通过定量分析技术动作中的关节运动模式、力学特征和肌肉活动,识别潜在的损伤风险因素,为制定科学的预防策略提供理论依据。同时,结合生物力学手段监测康复过程中的功能恢复,能够有效评估干预效果,优化康复方案,帮助运动员延长运动生涯。未来,应更加注重对复杂运动动作和损伤机制的多尺度研究,推动 AI 与运动生物力学的深度融合,构建精准、高效的个性化评估与干预体系。此外,需加强多学科协同研究,深入探索肌肉组织和神经控制等微观层面的生物力学机制,不断夯实竞技体育发展的科学基础,助力人类运动能力与健康水平的全面提升。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:陈卉萌负责文献搜集整理和论文撰写;刘卉负责论文设计、撰写和修改;于冰参与论文撰写和修改。

参考文献:

- [1] FRANCHI MV, RAITERI BJ, LONGO S, et al. Muscle architecture assessment: Strengths, shortcomings and new frontiers of *in vivo* imaging techniques [J]. *Ultrasound Med Biol*, 2018, 44(12): 2492-2504.
- [2] 唐文静,张立萍,许贻林,等. 无创肌肉结构评估:肌骨超声成像技术在运动表现领域中的应用 [J]. *体育科学*, 2024, 44(11): 74-86.
- [3] DRAZAN JF, HULLFISH TJ, BAXTER JR. Muscle

structure governs joint function: Linking natural variation in medial gastrocnemius structure with isokinetic plantar flexor function [J]. *Biol Open*, 2019, 8(12): 1-8.

- [4] WANG Y, FEHR KH, ADAMCZYK PG. Impact-aware foot motion reconstruction and ramp/stair detection using one foot-mounted inertial measurement unit [J]. *Sensors*, 2024, 24(5): 1480.
- [5] DI NARDO F, NOCERA A, CUCCHIARELLI A, et al. Machine learning for detection of muscular activity from surface EMG signals [J]. *Sensors*, 2022, 22(9): 3393.
- [6] MA S, ZHANG J, SHI C, et al. Physics-informed deep learning for muscle force prediction with unlabeled sEMG signals [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2024 (32): 1246-1256.
- [7] MUNDT M, COLYER S, WADE L, et al. Automating video-based two-dimensional motion analysis in sport? Implications for gait event detection, pose estimation, and performance parameter analysis [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2024, 34(7): e14693.
- [8] INO T, SAMUKAWA M, ISHIDA T, et al. Validity and reliability of OpenPose-based motion analysis in measuring knee valgus during drop vertical jump test [J]. *J Sport Sci Med*, 2024, 23(1): 515-525.
- [9] CRONIN NJ, WALKER J, TUCKER CB, et al. Feasibility of OpenPose markerless motion analysis in a real athletics competition [J]. *Front Sports Act Living*, 2023 (5): 1298003.
- [10] CUI G, WANG C. The machine learning algorithm based on decision tree optimization for pattern recognition in track and field sports [J]. *PLoS One*, 2025, 20(2): e0317414.
- [11] WANG J, ZUO L, CORDENTE MARTINEZ C. Basketball technique action recognition using 3D convolutional neural networks [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 13156.
- [12] ZHAO H, SUN Y, WEI C, et al. Online prediction of sustained muscle force from individual motor unit activities using adaptive surface EMG decomposition [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2024, 21(1): 47.
- [13] CHEN T, XU D, ZHOU Z, et al. Prediction of vertical ground reaction forces under different running speeds: integration of wearable IMU with CNN-xLSTM [J]. *Sensors*, 2025, 25(4): 1249.
- [14] 周玉林,李翰君,刘卉,等. 基于神经网络以全身关节坐标估算侧切变向动作下肢动力学参数 [J]. *中国体育科技*, 2024, 60(11): 90-97.
- [15] ZHOU Y, FU S, YAO T, et al. Artificial neural networks' imitations of lower-limb kinetics in sidestepping: Comparison of full-body vs. lower-body landmark sets [J]. *J Biomech*, 2025(181): 112548.
- [16] CHEN X, FENG Y, CHANG Q, et al. Muscle synergy

- during wrist movements based on non-negative tucker decomposition [J]. *Sensors*, 2024, 24(10): s24103225.
- [17] 晋鹏飞, 任杰. 乒乓球运动者正手弧圈球不同触地模式的下肢生物力学变化 [J]. *中国组织工程研究*, 2025, 29(14): 2995-3001.
- [18] WANG Y, XU L, JIANG H, *et al.* Biomechanical effects of the badminton split-step on forecourt lunging footwork [J]. *Bioengineering*, 2024, 11(5): 501.
- [19] HUANG J, PEYRÉ-TARTARUGA LA, LIN J, *et al.* Rotation of the hammer and performance in hammer throwing [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2024 (12): 1449465.
- [20] LI X, XIA Z, LIU F, *et al.* Factor analysis of the biomechanical parameters of pole vault run-up and takeoff: Exploring sports performance [J]. *Sport Biomech*, 2024, 23(12): 2974-2994.
- [21] ZHANG Z, XU D, GAO X, *et al.* Differences of simulated ankle dorsiflexion limitation on lower extremity biomechanics during long jump takeoff [J]. *Heliyon*, 2025, 11(1): e41009.
- [22] GILJARHUS KET, LILAND FF, BARDAL LM, *et al.* Aerodynamic optimization of athlete posture using virtual skeleton methodology and computational fluid dynamics [J]. *J Biomech*, 2024(176): 112303.
- [23] MORCIANO G, ZINGONI A, CALABRÒ G. Optimization and comparison of machine learning algorithms for the prediction of the performance of football players [J]. *Neural Comput Appl*, 2024, 36(31): 19653-19666.
- [24] SHEN L, TAN Z, LI Z, *et al.* Tactics analysis and evaluation of women football team based on convolutional neural network [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 255.
- [25] ROMERO V, CASTANO-ZAMBUDIO A, ORTEGA-BECERRA MA, *et al.* Enhancing sprint performance and biomechanics in semiprofessional football players through repeated-sprint training [J]. *J Appl Biomech*, 2025, 41(1): 18-26.
- [26] VALKOUMAS I, GOURGOULIS V. Sprint resisted swimming training effect on the swimmer's hand orientation angles [J]. *J Biomech*, 2024(164): 111991.
- [27] LIU P, YUAN H, LU Y, *et al.* Resistance training modalities: Comparative analysis of effects on physical fitness, isokinetic muscle functions, and core muscle biomechanics [J]. *Front Physiol*, 2024(15): 1424216.
- [28] PIETRASZEWSKI P, GOŁAŚ A, ROCZNIOK R, *et al.* EMG activity of lower limb muscles during anti-gravity treadmill running with different loads and speeds [J]. *Appl Sci*, 2024, 14(17): 7518.
- [29] MAUSEHUND L, KROSSHAUG T. Knee biomechanics during cutting maneuvers and secondary acl injury risk: A prospective cohort study of knee biomechanics in 756 female elite handball and soccer players [J]. *Am J Sports Med*, 2024, 52(5): 1209-1219.
- [30] TAKETOMI S, KAWAGUCHI K, MIZUTANI Y, *et al.* Intrinsic risk factors for noncontact anterior cruciate ligament injury in young female soccer players: A prospective cohort study [J]. *Am J Sports Med*, 2024, 52(12): 2972-2979.
- [31] STRAUB RK, POWERS CM. Biomechanical predictors of primary ACL injury: A scoping review of prospective studies [J]. *Gait Posture*, 2025(116): 22-29.
- [32] WEIR G. Anterior cruciate ligament injury prevention in sport: Biomechanically informed approaches [J]. *Sport Biomech*, 2024, 23(11): 1867-1887.
- [33] MAGAÑA-RAMÍREZ M, GALLARDO-GÓMEZ D, ÁLVAREZ-BARBOSA F, *et al.* What exercise programme is the most appropriate to mitigate anterior cruciate ligament injury risk in football (soccer) players? A systematic review and network meta-analysis [J]. *J Sci Med Sport*, 2024, 27(4): 234-242.
- [34] MERCURIO M, CARLISI G, OSTOJIC M, *et al.* The protective role of the FIFA 11+ training program on the valgus loading of the knee in academy soccer players across a season [J]. *Healthcare*, 2025, 13(1): 73.
- [35] CIERSON T, ZHAO K, BELKHELLADI M, *et al.* The Effect of the FIFA-11+ ACL injury prevention program on drop vertical jump biomechanics in varsity athletes: A prospective observational cohort study [J]. *Orthop J Sports Med*, 2025, 13(4): 23259671251333792.
- [36] YU P, FERNANDEZ J. Alterations in lower limb biomechanical characteristics during the cutting manoeuvre in chronic ankle instability population and copers [J]. *J Phys Act Health*, 2024, 8(1): 148-156.
- [37] ALTUN A, DIXON S, RICE H. Task-specific differences in lower limb biomechanics during dynamic movements in individuals with chronic ankle instability compared with controls [J]. *Gait Posture*, 2024(113): 265-271.
- [38] UTKU B, BAHR G, KNOKE H, *et al.* The effect of fresh and used ankle taping on lower limb biomechanics in sports specific movements [J]. *J Sci Med Sport*, 2024, 27(11): 772-778.
- [39] HU D, SUN H, WANG S, *et al.* Treatment and prevention of chronic ankle instability: An umbrella review of meta-analyses [J]. *Foot Ankle Surg*, 2025, 31(2): 111-125.
- [40] 李瑞杰, 魏心怡, 戴剑松, 等. 大众跑者跑步相关损伤危险因素的前瞻性研究 [J]. *体育科研*, 2024, 45(2): 48-59.
- [41] MOREIRA PF, VERAS P M, OLIVEIRA TMD, *et al.* Incidence and biomechanical risk factors for running-related injuries: A prospective cohort study [J]. *J Clin Orthop*

- Trauma, 2024(57): 102562.
- [42] PLESEK J, HAMILL J, BURDA M, *et al.* Running distance and biomechanical risk factors for plantar fasciitis: A 1-yr prospective 4HAIE cohort study [J]. *Med Sci Sport Exer*, 2025, 57(4): 756-766.
- [43] SHEN W, YU Y, FRIAS BOCANEGRA J, *et al.* Enhancing running injury prevention strategies with real-time biofeedback: A systematic review and meta-analysis [J]. *J Sport Sci*, 2024, 42(11): 981-992.
- [44] ZHANG X, DENG L, XIAO S, *et al.* Effects of a 12-week gait retraining program on the Achilles tendon adaptation of habitually shod runners [J]. *Scand J Med Sci Sport*, 2024, 34(1): e14516.
- [45] LEUGERS K, MATHEWS S, ANDERSON R, *et al.* Viability of structured gait retraining for improving clinical outcomes following running-related injury in active duty service members [J]. *Mil Med*, 2024, 189(9-10): e1976-e1981.
- [46] 任爽, 时会娟, 梁子轩, 等. 前交叉韧带重建术后侧切动作的生物力学特征 [J]. *北京大学学报(医学版)*, 2024, 56(5): 868-873.
- [47] 傅升星, 时会娟, 于媛媛, 等. 伸膝阻尼训练对前交叉韧带重建术后跑步膝关节生物力学特征及双侧对称性的影响 [J]. *中国运动医学杂志*, 2025, 44(2): 95-102.
- [48] ZHANG S, WANG L, LIU X, *et al.* Effects of Kinesio taping on lower limb biomechanical characteristics during the cutting maneuver in athletes after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *PLoS One*, 2024, 19(3): e0299216.
- [49] ASHOUR AA, ELHAFEZ SM, ELMELIGIE MM, *et al.* Crossover effect of knee and ankle joint training on knee mechanics after ACL reconstruction: A randomized controlled trial [J]. *Gait Posture*, 2024(113): 512-518.
- [50] PARK HS, OH JK, KIM JY, *et al.* The effect of strength and balance training on kinesiophobia, ankle instability, function, and performance in elite adolescent soccer players with functional ankle instability: A prospective cluster randomized controlled trial [J]. *J Sport Sci Med*, 2024, 23(1): 593-602.
- [51] YEUM WJ, LEE MY, LEE BH. The influence of hip-strengthening program on patients with chronic ankle instability [J]. *Medicina*, 2024, 60(8): 1199.
- [52] HOVEIDAEI AH, HASHEMI SM, PAZOKI S, *et al.* Effects of whole-body vibration on chronic ankle instability: A systematic review [J]. *Ann Med Surg*, 2024, 86(1): 401-411.
- [53] RYO M, TAKASHI K, YOSHINARI F, *et al.* Acute effects of whole-body vibration on ankle motion smoothness in individuals with chronic ankle instability [J]. *J Bodyw Mov Ther*, 2024(40): 1115-1122.
- [54] CHEN H, HU W, LIU Y, *et al.* The impact of whole-body vibration training and proprioceptive neuromuscular facilitation on biomechanical characteristics of lower extremity during cutting movement in individuals with functional ankle instability: A parallel-group study [J]. *Clin Biomech*, 2024(113): 106208.
- [55] 韩秀兰, 张珊珊, 张桂芳, 等. 踝关节松动手联合臀肌力量训练治疗慢性足底筋膜炎的疗效分析 [J]. *中国康复医学杂志*, 2024, 39(12): 1804-1809.
- [56] KIM MH, MARTIN W, QUARMBY A, *et al.* Effects of sensorimotor training on functional and pain outcomes in achilles tendinopathy: A systematic review [J]. *Front Sports Act Liv*, 2024(6): 1414633.
- [57] MIKAILI S, KALANTARI KK, ZAVIEH MK, *et al.* Effect of strengthening exercises in individuals with patellofemoral pain syndrome: A randomised controlled trial [J]. *Int J Ther Rehabil*, 2024, 31(1): 1-12.
- [58] RODRIGO-CARRANZA V, HOOBKAMER W, GONZÁLEZ-RAVÉ JM, *et al.* Relationship between advanced footwear technology longitudinal bending stiffness and energy cost of running [J]. *Scand J Med Sci Sport*, 2024, 34(6): e14687.
- [59] LANGLEY JO, LANGLEY B. The effect of advanced footwear technology on elite male marathon race speed [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2024, 124(4): 1143-1149.
- [60] ALDA-BLANCO A, RODRÍGUEZ-BARBERO S, RODRIGO-CARRANZA V, *et al.* Influence of running surface using advanced footwear technology spikes on middle- and long-distance running performance measures [J]. *Sports*, 2024, 12(12): 329.
- [61] BERNUZ B, LAUJAC S, SIRIAL C, *et al.* Effect of advanced footwear technology spikes on sprint acceleration: A multiple N-of-1 trial [J]. *Sports Med Open*, 2024, 10(1): 92.
- [62] SHEN S, TENG J, FEKETE G, *et al.* Influence of torsional stiffness in badminton footwear on lower limb biomechanics [J]. *J Sport Sci Med*, 2024, 23(1): 196-208.
- [63] 钟茵菲, 温鑫菲, 鲁荻. 不同鞋帮高度篮球鞋对踝关节稳定性及动力学影响的研究 [J]. *应用力学学报*, 2024, 41(6): 1418-1427.
- [64] ILLIDI CR, JENSEN D. Supported to perform: sports bras and breast volume do not impair cycling performance in females [J]. *Front Sports Act Liv*, 2024(6): 1439403.