

网球运动员足底压力峰值与挥拍速度的相关性研究

谭志华¹, 李 洁², 夏永桢²

(1. 华南师范大学 附属南沙中学, 广东 广州 511400 2. 广州体育学院 体育教育学院, 广东 广州 510500)

摘要: **目的** 探讨网球运动员底线正手击球过程中足底压力峰值与挥拍速度的相关性, 可为网球运动员正手技术与动力链的优化提供理论依据。 **方法** 招募 12 名国家二级网球运动员, 使用配备智能传感器的网球拍同步收集挥拍速度数据, 通过 Pedar-x 压力鞋垫系统记录击球时足底区域的压力峰值, 对数据进行岭回归分析。 **结果** 回归模型显示, 挥拍速度与第 1—5 跖骨 ($M1-5$, $\beta=0.02$)、足弓 (MF , $\beta=0.064$) 压力峰值呈正相关, 与第一趾骨 ($T1$, $\beta=-0.106$)、足跟内侧 (HM , $\beta=-0.111$) 压力峰值呈负相关 ($F=7.425$, $p<0.001$)。足底负荷分布显示, 前脚掌与后脚跟为主要承力区域, 而重心过度前移、后移可能限制挥拍速度。 **结论** 网球正手击球过程中, 前脚掌、足弓与足跟外侧是地面反作用力传递的关键区域, 其压力峰值增加可显著提升挥拍速度; 趾骨区域过度负荷则可能降低动力链的整体效能。

关键词: 网球运动员; 正手击球; 足底压力; 挥拍速度; 相关性

中图分类号: G845 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-983X(2025)05-0106-05

DOI: 10.20185/j.cnki.1003-983X.2025.05.019

Correlation Between Peak Plantar Pressure and Swing Speed in Tennis Players

TAN Zhihua¹, LI Jie², XIA Yongan²

(1. Nansha Middle School Affiliated to South China Normal University, Guangzhou Guangdong, 511400; 2. Guangzhou Sport University, School of Physical Education, Guangzhou Guangdong, 510500)

Abstract: **Objective** To explore the correlation between peak plantar pressure and racket speed during baseline forehand strokes in tennis players, thereby providing a theoretical basis for optimizing forehand techniques and kinetic chain efficiency. **Methods** Twelve national-level second-tier tennis players were recruited. Racket-mounted smart sensors were used to collect synchronous racket speed data, while Pedar-x pressure insole systems recorded peak foot pressures during stroke execution. Ridge regression analysis was performed on the collected data. **Results** The regression model demonstrated a positive correlation between racket speed and peak pressures at the first to fifth metatarsals ($M1-5$, $\beta=0.02$) and the arch (MF , $\beta=0.064$), whereas a negative correlation was observed with peak pressures at the first toe ($T1$, $\beta=-0.106$) and medial heel (HM , $\beta=-0.111$) ($F=7.425$, $p<0.001$). Analysis of foot load distribution indicated that the forefoot and heel serve as primary load-bearing regions, with excessive forward or backward shifts in center of gravity potentially constraining racket speed. **Conclusion** During tennis forehand strokes, the forefoot, arch, and lateral heel are critical zones for ground reaction force transfer. Increased peak pressures in these regions significantly enhance racket speed, while excessive loading on toe-bone areas may diminish overall kinetic chain efficiency.

Keywords: tennis player; forehand stroke; plantar pressure; racket speed; correlation

收稿日期: 2025-03-31

基金项目: 广东省哲学社会科学规划青年项目 (GD24YTY08); 广东省普通高校青年创新人才项目 (2023WQNCX033); 广州市科技计划青年博士“启航”项目 (2024A04J3946); 广东省研究生教育创新计划项目 (2022JGXM154); 广东省科技创新战略专项资金 (大学生科技创新培育) 项目 (pdjh2024b221)。

第一作者简介: 谭志华 (1999~), 男, 江西赣州人, 硕士, 助教, 研究方向: 体育教育。

通讯作者简介: 夏永桢 (1990~), 男, 湖南郴州人, 博士, 讲师, 研究方向: 体育教育训练学、体育社会学, E-mail: xiayongan123@163.com。

作为现代网球竞技体系中的战术核心载体, 正手击球技术 (Forehand Stroke) 在技术稳定性、击球动能输出及战术主动权控制方面展现出不可替代的竞技价值。职业赛事数据分析表明, 正手击球在底线对抗中的使用频率达 65%, 显著高于反手击球 47.6%^[1]。在动能输出层面, 正手击球可通过完整动力链 (Kinetic Chain) 实现拍头速度 (RHS) 的峰值提升——职业选手正手击球 RHS 达 33.4 m/s, 比反手击球高 19.6%^[2], 这一差异归因于下肢蹬伸—髋部旋转—躯干扭转—肩肘腕鞭打的序列化能量传递机制, 其中最核心的驱动要素是地面反作用力 (GRF)^[3]。具体而言, 运动员通过踝关节跖屈与膝关节屈曲蓄能, 下肢爆发性蹬伸产生 2 倍体重的 GRF, 经胫骨前肌—股

四头肌—臀大肌的刚性传导,驱动髋关节水平旋转角速度与肩胛骨前伸力矩的时序耦合,最终转化为拍头动能的指数级增长^[3-4]。这一生物力学范式不仅强化了击球速度的物理优势,更通过神经肌肉预激活策略优化动作经济性,为开放性技能项目的科学化训练提供了理论基准。

尽管已有研究证实底线正手击球中身体重心由后向前转移可显著提升击球速度^[5],但足底分区压力特征对挥拍速度的差异化调控机制仍属研究盲区。足底作为动力链(Kinetic Chain)的力学传导起点,而跖骨区、足弓区和跟骨区在蹬伸阶段的压力分布与时空特征直接关联下肢动能向躯干—上肢的传递效率^[3,6]。当前研究多聚焦整体足压分析,如全足 PP 均值^[7],却忽视亚区特异性,如跖骨对踝关节力矩的差异化贡献^[8],导致技术优化缺乏精准生物力学靶点。基于此,本研究采用 Pedar-X 无线压力鞋垫系统(100 Hz 采样率)与智能球拍传感器同步采集击球动作的足底分区压力数据与挥拍速度参数,并解析两者动态关联。该研究首次构建“足底分区—下肢动力学—挥拍效能”的定量模型,为优化击球动作的神经肌肉协调模式及器材适配策略提供实证依据,促进网球训练体系从传统经验模式向生物力学精准调控的科学化升级。

1 研究方法

1.1 测试对象

招募 12 名国家二级网球运动员作为受试对象(均为右手持拍),其基线指标符合实验纳入标准。所有参与者均无重大疾病史或运动系统损伤,近一年内未发生运动相关性损伤,且实验前 24 h 严格遵守测试前准备规范(包括睡眠良好、禁止酒精摄入等)。测试前告知受试者本研究的测试流程、设备、益处与风险,经受试者同意自愿参加本实验后签署知情同意书,并通过伦理审查(批号:2024LCLL-10)。

表 1 受试者各指标表(N=12)

指标	受试者
身高/cm	173.83 ± 7.184
体重/kg	69.25 ± 12.913
年龄	21.66 ± 2.06
BMI	22.78 ± 3.192
运动等级	国家二级
训练年限/年	9.583 ± 2.712 2

1.2 研究设计

采用测试法来探究足底压力与挥拍速度之间的相关关系。其中自变量为足底各区域的压力值,由足底压力鞋垫采集。根据国际生物力学学会(International Society of Biomechanics, ISB)推荐的足部分区方法将足底划分为多个功能区域,以匹配骨骼、关节和软组织的解剖结构。本研究将足底分为 6 个区域:第 1 趾骨(T1)、第 2—5 趾骨(T2-5)、第 1—5 跖骨(M1-5)、足弓(MF)、足跟外侧(HL)、足跟内侧(HM)^[9-10]。因变量挥拍速度,由网球拍传感器收集。为了确保测试过程中变量的稳定性,使用发球机将球通过球网送出,以确保球落点、速度和旋转一致。足底压力分区见图 1。

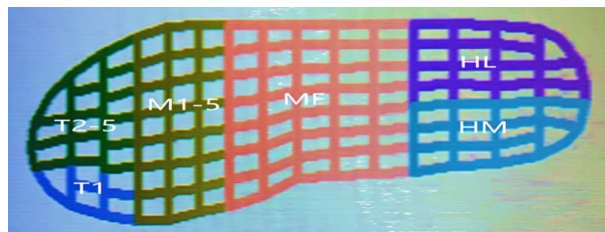


图 1 足底压力分区

1.3 测试仪器设备

足底压力监测系统配备德国 Novel 公司 Pedar-x 高精度鞋垫式压力分布测量系统,该系统包括超薄柔性传感器阵列,双侧鞋垫厚度仅 2 mm,集成 99 个电容式压力感应单元,形成全足底分布式压力传感网络;动态采集系统采用 100 Hz 采样频率,压力分辨率达<5kPa。数据传输终端通过 USB 接口计算机。击球动力学采集系统部署酷浪科技 SmartRacket Pro 3.0 智能传感系统,技术特征包括微型六轴惯性测量单元(IMU),传感器模组直径 30 mm×厚度 10 mm,重量 6.0 g;该传感器(质量 6.0 g)使网球拍转动惯量增加 4.1%~5.2%,导致拍头略微速度下降。依据标准在拍柄末端附加 5.8 g 补偿配重,使惯量偏差<1%。

智能识别算法为集成陀螺仪和加速度计,通过边缘计算实现击球类型的实时分类;数据管理平台基于蓝牙 4.0 BLE 协议构建无线传输系统,支持 Android/iOS 双平台“智能网球”APP。

全自动发球机,主测试球拍为 Babolat Pure Drive 2024 款(拍面 100 in²,线床 16×19,空拍重量 300 g),穿线采用 Luxilon ALU Power 1.25 mm(张力 52±2 磅);训练用球为欧帝尔 GOLD3 专业训练球。

1.4 测试流程

本研究严格遵循 ITN 网球测试方法。正式测试前,工作人员完成两项核心准备:1) 场地标准化布置:使用红色反光胶带划分测试区域,将底线后方 5.485 m×2.06 m 矩形区域定义为目标落点区,发球机定位在目标区同侧底线中点,垂直高度调节至国际标准 1.07 m;2) 人员专业化分工,组建设备组 3 人负责 Pedar-x 鞋垫校准、数据采集终端调试;技术组 2 人监控发球机参数、落点判定;保障组 1 人实施运动防护。测试工作人员带领受试者进行 6 min 的热身活动,前 3 min 进行动态神经肌肉激活,包含网球专项交叉步法、多平面关节活动及离心收缩式肌肉预热。后 3 min 进行至少 50 次击球适应性训练以消除设备干扰效应,同时让受试者逐步适应击球路线,以及发球机出球频率和节奏。

热身后,受试者到球场指定位置,进行正式测试与数据采集。测试技术为底线正手击球,线路为斜线。各受试者需使用同一款球拍,将球击打至目标区域。每次击球的动作、击球力量、击球速度等保持前后基本一致。若受试者击球落在目标区域内,则保存此次足底压力数据,足底压力取单脚(右脚)蹬伸期峰值,若未落在目标区域内,则不保存,每位受试者需完成 6 次有效击球,2 次击球间隔 20 s,每完成 6 球后休息 2 min。测试结束后,卸下受试者身上的绑带、转换器和鞋垫;根据下一位受试者的鞋码更换电子鞋垫,连接转换器与电脑,固定好线缆并穿戴完毕。受试者轮流进行测试。击球路线图见图 2。

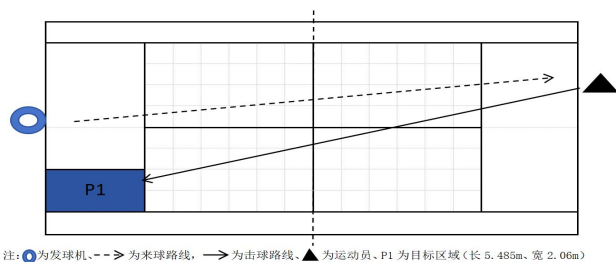


图 2 击球路线图

1.5 数据分析

击球时的挥拍速度由球拍内置传感器实时记录,测试结束后将数据导入 Excel 统一整理。足底各区域的峰值压力由 Pedar-X 鞋垫及其配套 Pedar-online 软件自动计算:1)先在采集软件中打开“Define Masks”,为右足建立并命名足底分区,保存至分区文件夹;2)打开已保存的压力数据文件,调用对应的分区文件,软件即可呈现各区域的峰值压力。运用 SPSS.26 统计分析软件对挥拍速度与足底压力峰值数据进行岭回归分析,统计学显著性差异的标准设定为 $p<0.05$ 。

2 研究结果

2.1 挥拍速度与各区域足底压力峰值结果

通过测试,网球运动员的挥拍速度为 96.61 ± 10.22 km/h,足底各区域的足底压力峰值见表 2。结果表明网球运动员在底线正手击球的足底负荷量呈现显著梯度差异,第 1—5 跖骨联合区(M1-5)>足跟内侧(HM)>足跟外侧(HL)>第 1 趾骨(T1)>第 2—5 趾骨(T2-5)>足弓(MF),说明前脚掌是足底负荷最高的区域,而足弓的负荷最小。

表 2 网球运动员底线正手击球时各区域足底压力峰值(N=12)

足底区域	压力峰值
T1	109.18 ± 17.56
T2-T5	103.743 ± 17.9
M1-M5	246.06 ± 89.66
MF	92.62 ± 27.87
HL	118.68 ± 51.13
HM	163.33 ± 44.25

表 4 岭回归分析结果

序号	B	标准误	Beta	t	p
常数	109.622	9.851	-	11.128	$<0.001^{**}$
T1	-0.106	0.052	-0.182	-2.056	$<0.001^{**}$
T2-T5	0.032	0.056	0.055	0.559	0.578
M1-M5	0.020	0.011	0.175	1.856	$<0.005^{*}$
MF	0.064	0.036	0.175	1.795	$<0.001^{**}$
HL	0.022	0.020	0.108	1.090	0.280
HM	-0.111	0.020	-0.480	-5.627	$<0.001^{**}$
R^2			0.407		
调整 R^2			0.352		
F			$F=7.425, p<0.001$		
K 值			0.169		

2.2 足底压力与击球效果的相关性结果

采用 Pearson 相关分析,以挥拍速度为因变量、足底各区域峰值压力为自变量。结果显示:挥拍速度与 T1、MF、HL、HM 等多个区域均存在显著相关。其中,与 MF、HL 区域的峰值压力呈显著正相关($p<0.01$),而与 T1、HM 区域的峰值压力呈显著负相关($p<0.01$),相关性分析见表 3。

表 3 足底压力与挥拍速度的相关性分析(N=12)

	T1	T2-T5	M2-M5	MF	HL	HM
挥拍速度 r 值	-0.203*	-0.113	-0.143	0.318**	0.33**	-0.527**

注: * $p\leq 0.05$, ** $p\leq 0.01$;下同。

2.3 挥拍速度与足底压力峰值线性回归结果

根据力学公式 $F=a*m$,物体加速度与其受到的外界作用力有关,本研究将二级组足底的 6 个解剖学区域在底线正手击球时产生的压力峰值与挥拍速度进行相关性分析,了解足底区域的最大压力与挥拍速度的影响关系和影响程度,研究结果见表 3。将 T1、T2-T5、M1-M5、MF、HL、HM 各足底区域的压力峰值作为自变量,把挥拍速度作为因变量进行线性回归分析。由表 4 可知,模型公式为:挥拍速度= $109.622-0.106*T1+0.032*T2-T5+0.02*M1-M5+0.064*MF+0.022*HL-0.111*HM$,模型 R 方值为 0.407,意味着模型拟合度为 40.7%,说明可以将 T1、T2-T5、M1-M5、MF、HL、HM 等某一区域或全部区域的总体做功解释为影响挥拍速度的 40.7%变化原因。根据模型的 K 值=0.169,数值较小,以及对模型进行 F 检验时发现模型 F 检验具有显著性($F=7.425, p<0.01$),意味着自变量与因变量存在回归关系,模型构建“压力峰值—挥拍速度模型公式”有意义,即说明 T1、T2-T5、M1-M5、MF、HL、HM 中至少一项会对挥拍速度产生显著性影响。根据研究结果显示:T1、HM 区域的压力峰值对挥拍速度具有显著负向影响。M1-5、MF 区域的压力峰值对挥拍速度正向积极作用。说明足底各区域在底线正手击球过程中,发挥的作用并不相等,压力峰值与挥拍速度的影响关系也存在差异,回归分析见表 4。

3 讨论

挥拍速度是指在网球运动员挥拍击球时的网球拍拍头的线速度,反映下肢力量在动力链上传导至球拍的有效率^[11]。足底压力可直接反映人体站立、行走或跑跳时足底各部位所受压力值的大小^[12]。压力峰值的大小和部位对于研究足底受力状况与足部疲劳的积累和损伤的发生具有重要影响^[13]。本研究通过足底压力分布测试发现,运动员在击球准备阶段呈现典型的前掌主导负荷模式,前脚掌区域以显著高于其他足底分区的峰值压力成为主要发力区域。这种压力梯度分布与人体重心迁移的生物力学特征高度契合,当身体重心由后向前转移时,压力中心沿足跟至前掌方向迁移,形成“后足稳定—前足驱动”的力学传导路径。前人研究发现,前脚掌是行走和运动过程中最主要的负荷区域^[14-16],这与本研究结果一致。底线正手击球时,足底受力呈现“前脚掌最大、足跟次之,足弓与外侧第2—5跖骨最小”的分布。这表明击球力量主要源于前脚掌蹬地产生的反作用力,足弓主要发挥前后足力量传导作用,而第2—5跖骨在运动过程中的参与发力有限。压力峰值的梯度符合运动员重心由后向前转移的过程:从足跟开始,随着重心推进,前脚掌负荷逐级增大,最终形成峰值。

动力学模型分析表明,足底压力与挥拍速度的关联呈现显著的区域异质性。网球正手击球时,球拍的加速度主要来源于关节屈伸带动肌肉收缩所释放的力量。研究发现,动力链延伸至上肢后,肩、肘、腕关节的联动形成鞭打效应——肩部控制挥拍轨迹,肘部调节发力距离,腕关节通过旋前与尺偏实现末端加速,最终将关节旋转动能高效转化为拍头线速度^[17]。从网球运动员底线正手击球的挥拍速度来可以体现运动员动力链流畅度。底线正手击球时,挥拍速度能直接反映动力链是否顺畅。从力学角度看,在击球过程中,足底压力越大,说明关节与肌肉的传导序列越合理,拍头加速越充分,最终击球速度也会加快。因此,下肢蹬地获得的反作用力在传导过程中损耗越小,转化为挥拍速度的效率就越高。

网球底线正手击球技术是一个复合生物链技术动作^[18],当前,对足底各个区域的发力与底线正手击球挥拍速度相关关系鲜有研究。但关于网球运动员的下肢功能对发球的影响研究中,表明网球发球技术的发力中,运动员下肢产生的力量约占身体总力量的50%^[19]。而在其他项目中,关于排球运动员足底压力峰值与扣球起跳高度的研究中指出足底压力峰值与起跳高度呈正相关^[20],说明足底压力与运动表现存在相关性。在对不同水平网球运动员的下肢肌肉力量和正反手击球速度的相关性研究表明精英球员比亚精英球员表现出更高相关性^[21]。以上研究结果表明同一技术动作的发力特征会因身体部位差异及运动员竞技水平高低而呈现不同。与网球底线正手击球的动力链相类似的高尔夫挥杆动作,已有研究证明了熟练高尔夫球手与非熟练高尔夫球手的后脚负荷压力峰值分布与实际挥杆速度之间的显著相关性^[22]。其将发力脚的足底进行分区,剖析发力脚不同足底区域的压力峰值和高尔夫挥杆速度具有相关性,特别指出内侧中足部或后脚跟的最大足底压力峰值过大可能会阻碍挥杆速度^[23]。说明重心转移是加快挥杆速度的重要原因。本研究结果显示:在网球运动员底线正手击球过程中,足底获得的总地面作用力对挥拍速度的影响占全身发力的40.7%。第1跖骨区域与足跟内侧的压力峰值对挥拍速度产生阻碍作用,第1—5跖骨、足弓以及

足跟外侧部位的压力峰值对挥拍速度会产生积极作用,特别是足弓部位表现出显著性正影响。表明在底线正手击球过程中,既要让前脚掌与足跟外侧承担更多的身体重量,以期获得更多的地面反作用力来加快挥拍速度,又要充分发挥足弓在两者之间的桥梁功能,以保证在正手击球过程中身体重心合理地由后向前过渡。一个好的底线正手击球要求运动员保持良好的重心平衡与稳定,而过度的重心后移与前移都会导致击球效果不理想,因此,第1跖骨区域与足跟内侧承受负荷过大,不仅会破坏身体平衡而降低挥拍速度,还会增加损伤风险。

在底线正手击球过程中注重前脚掌和足跟外侧区域的发力,强化足弓的桥梁作用,可以有效加快挥拍速度。同时,也会加大该部位的负荷量,所以要重视足跟与前脚掌部位的放松,以此预防足底筋膜炎、应力性跖骨骨折等运动损伤。通过压力峰值—挥拍速度模型发现:足底的整体压力虽然仅能使后脚跟的击球速度提高40%,但足底在提升击球速度中的作用不容忽视。本文仅探讨足底压力与击球速度之间的关系,足底的力量是后脚跟击球所需能量和初始速度的来源。随后,力量通过完整的动力链从脚底传递到球拍,并通过腿部伸展、髋部旋转、肩部推力和手臂摆动等协调动作转化为击球速度。这些力量生成技术以合理顺序结合,以形成正确的动力链。

后续研究将对后场击球技术进行全面分析,探讨身体不同部位的力量对击球速度的影响程度,并计算后场击球的完整动力链总和。在后场击球训练中,应重点加强提升球员脚部前侧力量的训练,优化以足底前脚掌与后脚跟为启动点的底线正手击球动力链,重视对足底的放松。在实际训练中,可结合蹬转动作使用药球,以强化重心转移和力量发展。在快速击球实践训练中,重要的是在底线击球时,通过流畅的动作将力量传递到正手击球中,使脚底获得的反作用力有效转化为球员的挥拍速度,从而提高击球速度。然而,有运动负荷就有运动损伤的概率^[24]。足底压强峰值、压力峰值、压强—时间峰值等指标值升高,足底受伤的风险也会增加。在运动后的放松活动中,应该加强足部前部、脚跟和足弓的特定放松,以防止足底受伤(如中足骨应力性骨折或足弓磨损)。除了简单的拉伸练习外,用网球或足底球进行按压以缓解足部紧张也非常有效。同时,还应注意通过饮食进行休息、放松和营养补充。

4 结论

网球运动员底线正手击球过程中,前脚掌与后脚跟是主要负荷区域,加强足底力量训练,有助于提高挥拍速度。发现底线正手击球的足底压力峰值与挥拍速度存在相关性,前脚掌、足弓和足跟外侧压力峰值增高,可以加快挥拍速度,身体重心的过度后移与前移则会阻碍挥拍速度,应该以前脚掌与足跟外侧为正手击球动力链起始点,获得更多的地面反作用力,来加快挥拍速度。未来可以结合表面肌电系统、动作捕捉系统等系统对底线正手击球动作进行整体性研究。

参考文献:

- [1] REID M, MORGAN S, WHITESIDE D. Matchplay Characteristics of Grand Slam Tennis: Implications for Training and Conditioning[J]. Journal of Sports Sciences, 2016, 34(19): 1791-1798.

- [2] PEDRO B, JOÃO F, LARA J P R, et al. Evaluation of Upper Limb Joint Contribution to Racket Head Speed in Elite Tennis Players Using IMU Sensors: Comparison between the Cross-Court and Inside-out Attacking Forehand Drive[J]. *Sensors*, 2022, 22(3): 1283.
- [3] CHEN W, JIA Y. Kinetic Chain Analysis of Tennis Stroke Motion Utilizing Wearable Sensors[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 9514208.
- [4] CAPRIOLI L, ROMAGNOLI C, CAMPOLI F, et al. Reliability of an Inertial Measurement System Applied to the Technical Assessment of Forehand and Serve in Amateur Tennis Players[J]. *Bioengineering*, 2025, 12(1): 30.
- [5] LIČEN T, KALC M, VOGGRIN M, et al. Injury Prevention in Tennis Players, Linking the Kinetic Chain Approach with Myofascial Lines: a Narrative Review with Practical Implications[J]. *Strength & Conditioning Journal*, 2022, 44(4): 104–114.
- [6] BULDT A K, ALLAN J J, LANDORF K B, et al. The Relationship between Foot Posture and Plantar Pressure during Walking in Adults: a Systematic Review[J]. *Gait & Posture*, 2018, 62: 56–67.
- [7] SIM T, KWON H, OH S E, et al. Predicting Complete Ground Reaction Forces and Moments during Gait with Insole Plantar Pressure Information Using a Wavelet Neural Network[J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2015, 137(9): 091001.
- [8] DU M, LV B, FAN B, et al. Ankle Moment Estimation Based on a Novel Distributed Plantar Pressure Sensing System[J]. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2024, 28(11): 6548–6556.
- [9] LIU M, KANG N, WANG D, et al. Analysis of Lower Extremity Motor Capacity and Foot Plantar Pressure in Overweight and Obese Elderly Women[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(4): 3112.
- [10] NIU W X, YAO J, CHU Z W, et al. Effects of Ankle Eversion, Limb Laterality, and Ankle Stabilizers on Transient Postural Stability during Unipedal Standing[J]. *Journal of Medical and Biological Engineering*, 2015, 35(1): 69–75.
- [11] 刘卉, 于冰, 张力文, 等. 竞技体育运动生物力学研究现状与趋势[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(4): 491–501.
- [12] 林琴琴, 李若明, 耿元文, 等. 3—35岁健康男性自然行走时足底压力的特征与变化[J]. *中国组织工程研究*, 2021, 25(15): 2315–2320.
- [13] 马新颖, 满喜. 不同年龄段人群行走足底压力特征分析[J]. *医用生物力学*, 2020, 35(1): 108–113.
- [14] 顾慧红, 覃蕊. 足底压力作用机制在功能性护膝研发中的应用研究[J]. *丝绸*, 2023, 60(8): 91–98.
- [15] 李立, 陈玉娟, 翟凤鸣, 等. 长期从事太极拳运动老年人足底压力分布特征及平衡能力研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2016, 31(9): 984–988.
- [16] 孙金贤, 张彬. 训练水平的差异对篮球运动员足底压力特征的影响[J]. *成都体育学院学报*, 2014, 40(3): 80–84.
- [17] 路鹏, 曾少眩, 盛蕾. 网球运动员专项运动素质评价指标初探[J]. *体育与科学*, 2012, 33(5): 90–92.
- [18] 柴娇, 杨卓, 任海雷. 网球正手击球运动技能评价指标、标准及其实证研究[J]. *西安体育学院学报*, 2013, 30(2): 222–227+236.
- [19] DOSSENA F, ROSSI C, LA TORRE A, et al. The Role of Lower Limbs during Tennis Serve[J]. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 2018, 58(3): 210–215.
- [20] 张海斌, 翟丰, 张大中, 等. 核心稳定性测试与女子排球运动员急停起跳高度特征的相关性研究[J]. *天津体育学院学报*, 2018, 33(2): 156–163.
- [21] LAMBRICH J, MUEHLBAUER T. Physical Fitness and Stroke Performance in Healthy Tennis Players with Different Competition Levels: a Systematic Review and Meta-Analysis[J]. *PLoS One*, 2022, 17(6): e0269516.
- [22] BALL K, BEST R. Centre of Pressure Patterns in the Golf Swing: Individual-Based Analysis[J]. *Sports Biomechanics*, 2012, 11(2): 175–189.
- [23] PATAKY T C. Correlation between Maximum In-Shoe Plantar Pressures and Clubhead Speed in Amateur Golfers[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2015, 33(2): 192–197.
- [24] 陈小平. 从助力到引领: 竞技运动训练科学化的转折与发展[J]. *体育与科学*, 2023, 44(3): 1–10.

(上接第23页)

- [30] 王杰, 朱魏魏, 刘明, 等. 大型体育赛事网络安全威胁及保障策略研究[J]. *信息安全研究*, 2024, 10(6): 561–567.
- [31] 李华, 弥芯怡, 吴立舟. 大型体育赛事组织信息传递特性分析: 以甘肃白银“5·22”越野赛事为例[J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34(10): 183–189.
- [32] 孟号翔, 马德浩, 孟献峰. 我国竞技体育竞赛体制的弊端表现、成因及其改革策略[J]. *沈阳体育学院学报*, 2016, 35(5): 115–118.
- [33] 唐佳懿, 卢文云. 我国社区体育赛事发展的现实困境与优化路径[J]. *天津体育学院学报*, 2022, 37(5): 585–591.
- [34] 何钢, 倪军, 何强. 大型体育赛事风险管理的组织韧性: 理论基础、现实挑战及提升策略[J]. *沈阳体育学院学报*, 2023, 42(6): 1–7.
- [35] 王琳, 高奎亭. 数字赋能城乡体育公共服务协同发展: 机理、阻碍与对策[J]. *湖北体育科技*, 2025, 44(3): 26–30+73.