

●运动人体科学●

# 网球肘潜在损伤风险的上肢生物力学分析

## ——以男子单反运动员底线相持动作为例

刘文字<sup>1</sup>, 张志彤<sup>2</sup>, 王亚洲<sup>1</sup>

(1.湖北汽车工业学院,湖北十堰 442000;2.凤凰台街道社区卫生服务中心,山东烟台 264002)

**摘要:** **目的** 将男子网球单反运动员底线四种正反手技术纳入同一框架,揭示击球方式与上肢肌肉工作性质的关联,识别网球肘潜在风险因素。**方法** 招募8名球龄8年以上、日均训练2 h以上的男性二级运动员,采用三维高速摄像与表面肌电同步采集正手直臂、屈臂击球数据,标定17个解析点并计算标准化均方根平均值与肌肉贡献度。**结果** 直臂击球挥拍距离及肩、肘关节角度显著大于屈臂,屈臂挥拍击球阶段更短;反手引拍长于切削、随挥短于切削。直臂三角肌中束激活更高,但挥拍阶段桡侧腕伸肌激活更低;反手各阶段桡侧腕伸肌与肱二头肌贡献度显著高于切削;四种技术中腕伸肌均呈高贡献、低激活特征。**结论** 腕伸肌高贡献低激活易致疲劳,存在网球肘风险,屈臂与单手反拍风险更大;建议加强桡侧腕伸肌专项力量训练,重视疲劳恢复与运动后放松,合理选择击球方式。

**关键词:** 网球单反;运动生物力学;网球肘;肌肉电信号;运动学分析

**中图分类号:** G845 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-983X(2026)05-0062-08

**DOI:** 10.20185/j.cnki.1003-983X.2026.05.010

## Biomechanical Analysis of the Upper Limb in Relation to the Risk of Tennis Elbow Injuries: A Study of the Baseline Rallies of Male Singles Backhand Players

LIU Wenyu<sup>1</sup>, ZHANG Zhitong<sup>2</sup>, WANG Yazhou<sup>1</sup>

(1.Hubei University of Automotive Technology, Shiyan Hubei, 442000; 2.Fenghuangtai Subdistrict Community Health Service Center, Yantai Shandong, 264002)

**Abstract:** **Objective** To incorporate the four forehand and backhand techniques used by male singles tennis players at the baseline into a single framework, to reveal the relationship between stroke techniques and the nature of upper limb muscle activity, and to identify potential risk factors for tennis elbow. **Methods** Eight male second-class athletes with at least eight years' playing experience and an average daily training duration of over two hours were recruited. Three-dimensional high-speed video and surface electromyography were used to simultaneously record data for straight-arm and bent-arm forehand and backhand strokes. Seventeen analysis points were calibrated, and standardised root mean square (RMS) values and muscle contribution were calculated. **Results** The swing distance and the angles of the shoulder and elbow joints were significantly greater for the straight-arm stroke than for the bent-arm stroke, whilst the swing phase was shorter for the bent-arm stroke; the backhand take-back was longer than for the slice, and the follow-through was shorter than for the slice. Activation of the middle head of the deltoid was higher during the straight-arm stroke, but activation of the extensor carpi radialis was lower during the swing phase; during all stages of the backhand stroke, the contribution of the extensor carpi radialis and biceps brachii was significantly higher than in the slice; across all four techniques, the wrist extensors exhibited characteristics of high contribution and low activation. **Conclusion** High contribution and low activation of the wrist extensors can easily lead to fatigue and pose a risk of tennis elbow, with the risk being greater in the bent-arm stroke and the one-handed backhand; it is recommended to strengthen the extensor carpi radialis through specialised strength training, to prioritise recovery from fatigue and post-exercise relaxation, and to select stroke techniques appropriately.

**Keywords:** tennis one-handed backhand; sports biomechanics; tennis elbow; muscle electrical signal; kinematic analysis

收稿日期:2026-06-05

基金项目:湖北汽车工业学院博士科研启动基金项目(BK202570)。

第一作者简介:刘文字(1996~),男,山东聊城人,博士,讲师,研究方向:网球、运动生物力学。

通信作者简介:王亚洲(1985~),男,河南焦作人,硕士,副教授,研究方向:网球、运动训练,E-mail:714599308@qq.com。

网球肘(肱骨外上髁炎)是一种因前臂伸肌总腱起点慢性过度使用所致的损伤性疾病,最早见于1883年Runge的记载,1922年首次被描述为职业网球运动员的疾患<sup>[1]</sup>。其病理本质为肱骨外上髁处伸肌总腱起点附近的慢性损伤性炎症或肌腱退行性改变,多由前臂反复旋前旋后、腕关节过度背伸等动作引起<sup>[2]</sup>,其中桡侧腕短伸肌受累最为常见(约占90%)<sup>[3-5]</sup>。流

行病学调查显示,网球肘在网球运动损伤中占有相当比例,典型患者多为 35 岁以上且每周运动 2 次以上的业余爱好者,高发期集中在 40~50 岁<sup>[4]</sup>。从解剖学角度,肘关节由肱尺关节、肱桡关节和桡尺近侧关节组成,附着于肱骨外上髁的桡侧腕长伸肌、桡侧腕短伸肌等是肘关节和前臂运动的原动力。Coonrad 和 Hooper 通过解剖发现桡侧腕短伸肌在前臂旋前且腕关节背伸时达到最大长度<sup>[5]</sup>,支持了网球肘最初是由于机械性限制而发展的假设;Hennig<sup>[6]</sup>等发现随着肘关节伸展,深层桡侧腕短伸肌与肱骨小头外侧缘产生摩擦,导致组织磨损;刘玉雷<sup>[7]</sup>等进一步证实桡侧腕长伸肌和桡侧腕短伸肌在肘关节伸展且腕关节屈、尺偏时拉伤率最大。

在网球各项技术中,单手反手击球被认为是最易引发网球肘的动作技术。Elliott<sup>[8]</sup>等发现单反挥拍击球时碰撞力峰值更大;Blackwell 等<sup>[9]</sup>指出手在碰撞时产生更大的动量变化,是上肢损伤需考虑的重要环节。Morris<sup>[10]</sup>等发现单反挥拍前挥阶段执拍臂腕伸肌群活动很大且持续到随挥阶段早期;Giangarra<sup>[11]</sup>等发现患外侧髁炎运动员在单反击球时腕伸肌和旋前圆肌有更大的肌电活动;此外,不当的击球技术、球拍握把不适及击球点偏差等因素导致肘关节伸肌起点负荷过大,是网球运动相关发病的主要机制。

综上,国内外学者已从解剖学、运动学和肌电学等角度对网球肘与单手反手击球技术的关系进行了研究,但现有文献多集中于专业与初学者之间的水平差异对比,或针对单一技术的运动学分析,本研究将网球单反运动员作为研究对象,将正手两种击球方式(直臂与屈臂)和反手两种击球方式(击球与切削)纳入同一分析框架,从运动学和肌电学两个维度系统比较了四种底线相持技术的生物力学特征。这一研究设计在已有文献中较为少见。本研究从正反手技术对比的角度提供了新的认识,对于指导网球运动员和爱好者的科学训练、降低运动损伤风险具有重要的理论和实践意义。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

实验对象为球龄 8 年以上且日均练球时间 2 h 以上,技术动作全面,均为右手持拍,熟练掌握正手直臂击球、正手屈臂击球与单反击球方式及反手切削技术的二级运动员 8 名。

1) 纳入标准:年龄 18—30 岁;球龄  $\geq 8$  年且日均训练时间  $\geq 2$  h;技术动作规范,能熟练运用正手直臂、正手屈臂、单反击球及反手切削 4 种底线相持技术;近 6 个月内无上肢(肩、肘、腕)急性或慢性损伤史,无“网球肘”病史或相关症状;无神经系统疾病及其他影响运动功能的疾病。

2) 排除标准:实验前 24 h 内从事剧烈运动或存在肌肉疲劳现象;实验期间出现身体不适或运动损伤;近 3 个月内服用影响肌肉功能的药物。伤病筛查:实验前由运动医学专业人员对受试者进行体格检查,包括上肢关节活动度测试、肌力测试及疼痛触诊(Cohen's test、Mill's test 等),排除网球肘及其他上肢损伤。

本研究已通过山东师范大学体育学院伦理委员会审批(审批号:SDNUTYDW2026032),所有受试者在实验前均签署书面知情同意书,并被告知实验目的、流程、潜在风险及随时退出的权利。

表 1 受试者基本信息

| 年龄/岁           | 身高/cm           | 体重/kg          | 训练年限/年         | 平均年训练时长/h         | 运动等级 |
|----------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------|------|
| 24.3 $\pm$ 1.0 | 180.1 $\pm$ 7.1 | 84.6 $\pm$ 8.5 | 13.1 $\pm$ 4.4 | 731.8 $\pm$ 132.1 | 二级   |

### 1.2 数据采集

使用两台 IDT 高速摄像机拍摄现场运动员击球视频,根据拍摄动作的不同,摄像机分别位于运动员身体左侧和左前方约 12 m 处(单反和切削),右侧和右前方 12 m 处(正手),主光轴夹角约为 45°,分辨率为 1 080 p,拍摄频率 500 帧/s,曝光时间为 3 s,并且在整个实验过程中保证焦距不变。使用 QF-28 轻型辐射式三维定标框架对拍摄空间进行标定,并建立大地坐标系。通过高速摄像机和雷达枪,获得运动员发球的最大球速。

在进行 3D 动作捕捉时,对受试者的三角肌中束、肱二头肌、肱三头肌、肱桡肌、桡侧腕伸肌群、背阔肌、胸大肌使用外同步的方式进行肌电信号的同步采集,在两台高速摄像机之间放置表面肌电信号采集器,开机设定好采样频率(1 500 Hz)及各个传感器参数,并做好记录。

受试者在之前三维框架标定好的区域进行正手直臂、正手屈臂、反手和切削的击球练习,发球机(Tennis Tutor,美国,时速 35 km/h,高度 5 档,上旋 3 档)定点发球,每颗球之间间隔 10 s,练习完成后,正式开始采集。受试者进行直线击球,球需要落在网球场对侧 2.05 m $\times$ 2.74 m 有效区内,且受试者本人和实验者都认为此次击球是一次高效的击球,同时满足这 3 个条件则保留此次数据,球没有落在有效区内或双方有任意一方认为此次击球不是一次高效的击球则放弃此次数据,每名受试者 2 种正手、反手和切削各保留 3 次有效数据,对 3 次有效数据的运动学和肌电学参数分别取算术平均值,以此代表该受试者的稳定技术特征进行分析;同时记录 3 次击球中球速最高值,用于辅助评价击球质量。

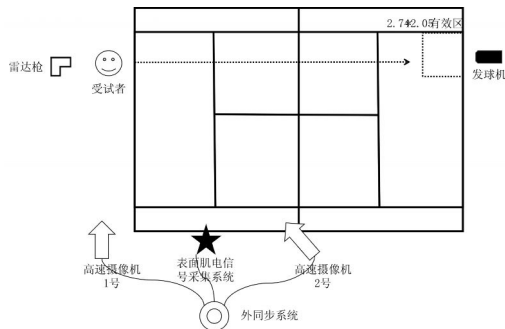


图 1 受试者正手直臂、屈臂数据采集示意图

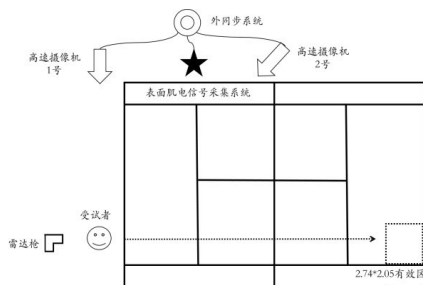


图 2 受试者反手和切削数据采集示意图

### 1.3 数据处理与分析

使用 Simi 运动图像解析系统(Simi Motion 9.1.1, 德国), 对运动员身体 17 个解析点(表 2)及球、拍头、拍柄 5 个解析点进行标定, 采用低通滤波法对标志点原始坐标进行平滑, 截断频率 10 Hz。关节角度的定义和计算使用三维投影角法<sup>[12]</sup>。在绘图与统计时, 应用 Origin 进行内插值, 将所有数据标准化为 100 个。

表 2 人体解析点名称与位置

| 名称  | 标定位置                  |
|-----|-----------------------|
| 头   | 头正中矢状面中心点             |
| 肩关节 | 三角肌中束最膨大处             |
| 肘关节 | 肘横纹中点                 |
| 腕关节 | 腕横纹中点                 |
| 手   | 中指指根部                 |
| 髋关节 | 正面观约为腹股沟中点, 侧面观约为大转子处 |
| 膝关节 | 正面观约为髌骨中心, 后面观为腘窝中心   |
| 足跟  | 足部后端中心点               |
| 足尖  | 足部前端中心点               |

根据网球击球动作特征, 将击球动作分为引拍阶段、挥拍击球阶段和随挥阶段 3 个阶段<sup>[13-14]</sup>如图 3。

表 3 动作阶段划分

| 动作阶段   | 动作开始标志画面      | 动作结束标志画面         |
|--------|---------------|------------------|
| 引拍阶段   | 准备姿势时球拍向后引的一帧 | 引拍最大时, 球拍向前挥出的一帧 |
| 挥拍击球阶段 | 球拍向前挥出的一帧     | 球离开拍面的前一帧        |
| 随挥阶段   | 球离开拍面的一帧      | 挥拍结束, 动作放松       |

机电均方根值已经在多项运动如骑行<sup>[15]</sup>中评估肌肉活动强度与运动疲劳, 它反映了运动单位募集的综合效应。利用机电处理软件(Noraxon3.10, 美国)对原始机电信号进行整流、带通滤波(截止频率为 10—450 Hz), 标准化(幅度归一化)等处理, 最后得到均方根标准化平均值。所采集的机电信号数据中的各肌肉数据中计算每 10 ms 的机电均方根值, 选择每块肌肉机电数据中各最大的一个值作为标准, 以所测肌肉活动的均方根值与最大值相除得到的百分数作为参考值<sup>[16]</sup>。以某块肌肉的积分机电值与所测各块肌肉积分机电总和的比值作为肌肉活动贡献度<sup>[17]</sup>。

数据正态性检验采用 Shapiro-Wilk 检验; 方差齐性检验采用 Levene 检验。当数据满足正态性且方差齐性时, 采用独立样本 T 检验; 当数据满足正态性但方差不齐时, 采用 Welch's t 检验; 当数据不满足正态分布时, 采用 Mann-Whitney U 非参数检验, 为控制 I 类错误膨胀, 采用 Bonferroni 法进行多重比较校正, 将显著性水平  $p$  从 0.05 调整为  $p'=0.05/\text{比较次数}$ 。效应量采用 Cohen's  $d$  表示(微小效应:  $d<0.2$ , 低效应:  $0.2\leq d<0.5$ , 中等效应:  $0.5\leq d<0.8$ , 高效应:  $d\geq 0.8$ )。所有统计学分析使用 IBM SPSS Statistic 26 软件 (IBM 公司, 美国), 实验结果各数据均用平均值 $\pm$ 标准差( $\bar{X}\pm\text{SD}$ )表示。

## 2 研究结果

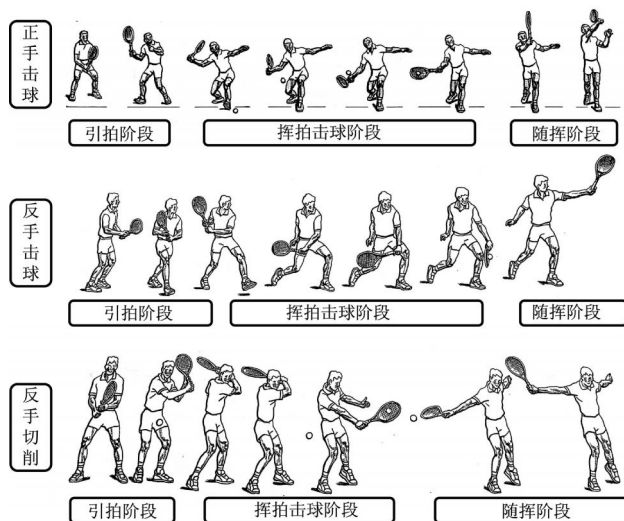


图 3 动作阶段划分

### 2.1 图像采集结果与分析

#### 2.1.1 动作时间

正手击球中, 挥拍击球阶段是划分 2 种击球方式最重要的依据。正手屈臂击球过程更简短, 而正手直臂击球过程时间比屈臂击球略长, 长时间的击球过程与直臂击球动作距离更长、转动惯量更大有关。单手反手击球动作与单手反手削球动作在引拍阶段和随挥阶段持续时间上存在显著性差异, 挥拍、击球动作阶段以及整个动作阶段持续时间不存在显著性差异。引拍阶段作为重要的准备阶段, 增加引拍时间可以一定程度的增加引拍距离<sup>[18-19]</sup>, 从而给身体增加转动空间, 加大躯干转动对挥拍速度的影响。

表 4 正手技术动作阶段持续时间/s( $n=8$ )

| 动作阶段   | 正手直臂击球         | 正手屈臂击球         | $p$ 值 |
|--------|----------------|----------------|-------|
| 完整动作   | $1.97\pm 0.21$ | $1.94\pm 0.19$ | 0.29  |
| 引拍阶段   | $0.91\pm 0.16$ | $0.95\pm 0.18$ | 0.20  |
| 挥拍击球阶段 | $0.30\pm 0.08$ | $0.25\pm 0.05$ | 0.04* |
| 随挥阶段   | $0.75\pm 0.07$ | $0.74\pm 0.05$ | 0.31  |

注: \* 表示两组对比  $p<0.05$ , 下同。

表 5 反手技术动作阶段持续时间/s( $n=8$ )

| 动作阶段   | 单手反手击球         | 单手反手削球          | $p$ 值  |
|--------|----------------|-----------------|--------|
| 完整动作   | $1.30\pm 0.16$ | $1.17\pm 0.347$ | 0.33   |
| 引拍阶段   | $0.92\pm 0.17$ | $0.64\pm 0.128$ | 0.00*  |
| 挥拍击球阶段 | $0.20\pm 0.07$ | $0.22\pm 0.09$  | 0.54   |
| 随挥阶段   | $0.18\pm 0.02$ | $0.22\pm 0.06$  | 0.047* |

#### 2.1.2 挥拍距离与球速

正手直臂击球的挥拍距离均要大于屈臂击球 ( $p<0.05$ ), 但球速无差异。反手反拍完成击球后球速显著快于反手切削 ( $p<0.05$ ), 但挥拍距离无显著差异。

表 6 正手技术动作挥拍距离 ( $n=8$ )

|                | 正手直臂击球           | 正手屈臂击球           | $p$ 值 |
|----------------|------------------|------------------|-------|
| 挥拍距离/m         | $1.71 \pm 0.20$  | $1.31 \pm 0.21$  | 0.00* |
| 完成击球后网球球速(m/s) | $29.09 \pm 2.50$ | $28.87 \pm 3.19$ | 0.34  |

表 7 反手技术动作挥拍距离 ( $n=8$ )

|                             | 单手反拍击球           | 单手反手切削           | $p$ 值 |
|-----------------------------|------------------|------------------|-------|
| 挥拍距离/m                      | $1.93 \pm 0.23$  | $1.68 \pm 0.44$  | 0.15  |
| 完成击球后网球球速/ $m \cdot s^{-1}$ | $25.95 \pm 2.41$ | $20.85 \pm 1.50$ | 0.04* |

### 2.1.3 关节角度

正手击球动作中,两种正手击球方式的腕关节角度在整个动作阶段呈现先增大后稍平稳再减小的趋势。但直臂击球较屈臂击球角度变化略大,主要是在挥拍击球阶段正手直臂击球的角度持续增大;肘关节角度方面,击球的全阶段直臂击球( $134.05 \pm 13.294^\circ$ )要显著大于屈臂击球度( $115.891 \pm 15.933^\circ$ ) ( $p < 0.05$ );在肩关节角度的整个动作阶段中,两种正手的肩关节角度曲线呈现出先增大再减小、再增大、再减小的走向,但在击球的瞬间,直臂击球肩关节角度( $79.041 \pm 9.239^\circ$ )显著大于屈臂击球( $53.299 \pm 15.559^\circ$ ) ( $p < 0.05$ )。

反手击球动作中,单手反拍击球和反手切削击球腕关节角度在整个动作阶段呈递增趋势;肘关节角度在两组动作整个动作阶段呈现先减小后增加的趋势,但引拍阶段,单手反手削球肘关节角逐渐减小,而单手反拍击球动作曲线引拍阶段肘关节角大致呈先减小后增加,在肩关节角度的随挥阶段中,单手反手削球肘关节角度先增大后减小,而单手反拍击球肩关节角度持续增大,其他指标无明显差异。

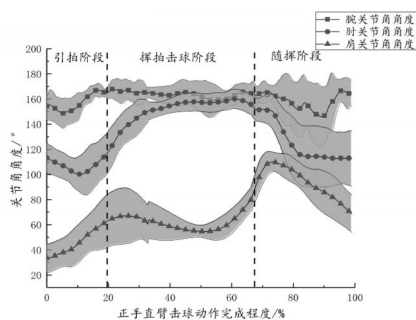


图 4 正手直臂击球关节角度图

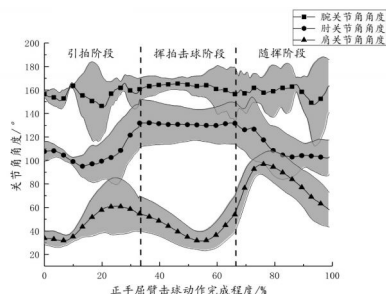


图 5 正手屈臂击球关节角度图

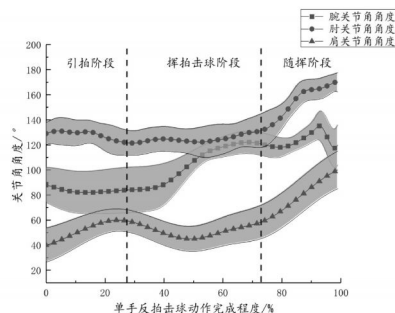


图 6 单手反拍击球关节角度图

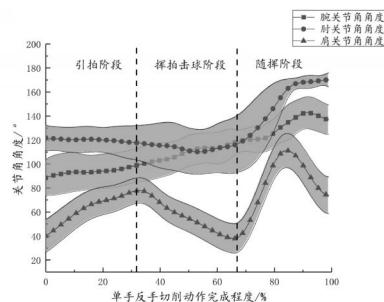


图 7 反手切削击球关节角度图

## 2.2 表面肌电数据分析

### 2.2.1 肌电均方根

正手击球动作中,全阶段直臂击球的三角肌中束 RMS 显著大于屈臂击球,挥拍击球阶段直臂击球的桡侧腕伸肌群 RMS 显著小于屈臂击球,随挥阶段直臂击球肱桡肌 RMS 显著小于屈臂击球。

反手击球动作中,全阶段单手反拍肱桡肌 RMS 显著大于反手切削,引拍阶段单手反拍肱二头肌和桡侧腕伸肌群 RMS 显著大于反手切削,其他指标无明显差异。

### 2.2.2 肌肉贡献度

正手击球方面,全阶段背阔肌肌肉贡献度直臂击球低于屈臂击球 ( $p < 0.05$ ),挥拍击球阶段肱二头肌、肱三头肌肌肉贡献度直臂击球显著低于屈臂击球 ( $p < 0.05$ ),随挥阶段肱三头肌肌肉贡献度直臂击球高于屈臂击球 ( $p < 0.05$ ),肱桡肌肌肉贡献度直臂击球低于屈臂击球 ( $p < 0.05$ )。

反手击球方面,单手反拍的桡侧腕伸肌群在每个阶段的肌肉贡献度都显著大于反手切削 ( $p < 0.05$ ),单手反拍中肱二头肌肌肉贡献度在挥拍击球阶段和随挥阶段显著大于反手切削 ( $p < 0.05$ ),其他指标无明显差异。

## 3 分析与讨论

本研究结果显示,正手直臂击球的挥拍距离均要大于屈臂击球 ( $p < 0.01$ )。根据转动惯量公式  $I = mr^2$ ,更长的移动距离与击球旋转半径说明直臂击球的转动惯量大于屈臂击球,也就是说完成正手直臂击球动作所需要的肌肉力量更大。蒋婷等<sup>[20]</sup>研究中指出,挥拍距离是影响拍头速度的重要因素,较长的挥拍距离有利于获得更大的拍头速度。谢克旺等<sup>[21]</sup>在分析中也发现,高水平运动员的正手击球挥拍距离显著大于低水平运动员,挥拍距离与击球质量呈正相关。本研究中直臂击球通过更大的

表 8 正手动作相关肌肉肌电均方根标准化平均值(RMS)(%) ( $n=8$ )

| 肌肉名称                | 全阶段          |              | 引拍阶段         |              | 挥拍击球阶段       |               | 随挥阶段         |              |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
|                     | 正手直臂         | 正手屈臂         | 正手直臂         | 正手屈臂         | 正手直臂         | 正手屈臂          | 正手直臂         | 正手屈臂         |
| 三角肌中束 <sup>a</sup>  | 15.79 ± 2.71 | 14.23 ± 2.43 | 12.61 ± 2.50 | 11.18 ± 3.80 | 19.25 ± 5.52 | 17.14 ± 4.81  | 15.50 ± 2.85 | 14.36 ± 3.12 |
| 肱二头肌                | 10.78 ± 8.50 | 12.38 ± 9.39 | 4.24 ± 2.61  | 4.84 ± 3.79  | 22.78 ± 3.74 | 25.63 ± 14.38 | 5.30 ± 1.41  | 6.67 ± 3.76  |
| 肱三头肌                | 10.49 ± 5.35 | 11.01 ± 6.16 | 3.73 ± 2.09  | 4.57 ± 2.84  | 16.82 ± 3.77 | 19.33 ± 4.796 | 10.92 ± 3.09 | 9.13 ± 6.69  |
| 肱桡肌 <sup>d</sup>    | 18.98 ± 3.53 | 16.92 ± 5.66 | 11.62 ± 9.58 | 10.72 ± 5.32 | 22.72 ± 6.36 | 24.42 ± 5.87  | 9.38 ± 3.39  | 15.63 ± 8.85 |
| 桡侧腕伸肌群 <sup>e</sup> | 9.49 ± 5.69  | 11.84 ± 8.64 | 3.98 ± 1.25  | 4.23 ± 2.49  | 17.31 ± 4.80 | 23.92 ± 5.40  | 7.16 ± 0.68  | 7.37 ± 3.66  |
| 胸大肌                 | 12.04 ± 4.81 | 14.06 ± 5.79 | 8.33 ± 3.48  | 10.53 ± 4.97 | 18.83 ± 5.28 | 22.23 ± 8.633 | 8.94 ± 3.29  | 9.41 ± 4.87  |
| 背阔肌                 | 11.18 ± 3.86 | 13.63 ± 5.29 | 7.36 ± 3.96  | 8.94 ± 3.45  | 16.47 ± 5.47 | 21.04 ± 3.03  | 9.72 ± 4.57  | 10.90 ± 5.26 |

注:<sup>a</sup>、<sup>b</sup>、<sup>c</sup>、<sup>d</sup>分别表示在全阶段、引拍阶段、挥拍击球阶段、随挥阶段两组对比  $p<0.05$ 。下同。

表 9 反手动作相关肌肉肌电均方根标准化平均值(RMS)(%) ( $n=8$ )

| 肌肉名称                | 全阶段           |               | 引拍阶段          |               | 挥拍击球阶段        |               | 随挥阶段         |              |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|
|                     | 单手反拍          | 反手切削          | 单手反拍          | 反手切削          | 单手反拍          | 反手切削          | 单手反拍         | 反手切削         |
| 三角肌中束               | 30.73 ± 5.28  | 32.14 ± 5.52  | 47.58 ± 12.24 | 44.85 ± 16.26 | 26.26 ± 11.59 | 33.57 ± 20.11 | 18.35 ± 9.77 | 18.01 ± 9.88 |
| 肱二头肌 <sup>b</sup>   | 18.90 ± 14.62 | 11.19 ± 8.66  | 40.49 ± 14.98 | 20.42 ± 12.99 | 13.27 ± 10.78 | 10.71 ± 15.15 | 2.94 ± 1.76  | 2.43 ± 1.47  |
| 肱三头肌                | 17.52 ± 9.37  | 21.38 ± 11.44 | 40.12 ± 13.79 | 40.16 ± 19.17 | 8.17 ± 5.41   | 16.76 ± 13.28 | 4.26 ± 3.62  | 7.23 ± 7.31  |
| 肱桡肌 <sup>a</sup>    | 13.11 ± 3.41  | 9.06 ± 2.36   | 26.99 ± 12.57 | 18.85 ± 7.56  | 9.87 ± 8.04   | 5.83 ± 6.37   | 2.46 ± 1.39  | 2.49 ± 1.20  |
| 桡侧腕伸肌群 <sup>b</sup> | 11.84 ± 7.87  | 9.43 ± 6.26   | 22.03 ± 5.10  | 15.72 ± 3.04  | 9.13 ± 4.67   | 8.09 ± 5.38   | 4.36 ± 2.58  | 4.48 ± 1.55  |
| 胸大肌                 | 10.24 ± 4.16  | 8.81 ± 3.58   | 13.72 ± 11.47 | 15.30 ± 15.07 | 14.99 ± 18.83 | 9.85 ± 12.32  | 2.01 ± 2.38  | 1.28 ± 1.29  |
| 背阔肌                 | 5.62 ± 2.06   | 6.36 ± 2.33   | 10.69 ± 4.80  | 13.27 ± 3.60  | 3.52 ± 1.60   | 3.92 ± 3.97   | 2.65 ± 2.66  | 1.90 ± 1.66  |

表 10 正手动作相关肌肉贡献度(%) ( $n=8$ )

| 肌肉名称               | 全阶段          |              | 引拍阶段          |              | 挥拍击球阶段       |              | 随挥阶段         |              |
|--------------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                    | 正手直臂         | 正手屈臂         | 正手直臂          | 正手屈臂         | 正手直臂         | 正手屈臂         | 正手直臂         | 正手屈臂         |
| 三角肌中束              | 11.37 ± 0.83 | 11.38 ± 2.19 | 11.68 ± 5.19  | 13.53 ± 4.96 | 10.22 ± 6.16 | 8.37 ± 4.19  | 12.19 ± 5.10 | 12.25 ± 5.58 |
| 肱二头肌 <sup>e</sup>  | 8.71 ± 1.29  | 9.71 ± 3.17  | 10.42 ± 5.43  | 7.92 ± 3.57  | 8.42 ± 5.75  | 14.17 ± 3.56 | 7.29 ± 1.57  | 7.04 ± 3.52  |
| 肱三头肌 <sup>cd</sup> | 10.58 ± 3.34 | 10.85 ± 2.15 | 9.31 ± 4.24   | 7.81 ± 4.01  | 7.28 ± 3.92  | 12.41 ± 4.34 | 15.16 ± 4.31 | 12.34 ± 6.53 |
| 肱桡肌 <sup>d</sup>   | 17.29 ± 3.72 | 17.80 ± 2.60 | 22.55 ± 13.89 | 20.51 ± 9.23 | 14.41 ± 6.11 | 14.28 ± 4.00 | 14.91 ± 7.7  | 18.60 ± 4.83 |
| 桡侧腕伸肌群             | 14.21 ± 6.79 | 10.58 ± 2.32 | 8.61 ± 1.41   | 8.92 ± 3.10  | 23.77 ± 9.93 | 13.86 ± 3.03 | 10.24 ± 2.48 | 8.95 ± 2.30  |
| 胸大肌                | 10.31 ± 1.44 | 11.94 ± 0.74 | 9.85 ± 4.24   | 12.96 ± 6.81 | 8.82 ± 3.36  | 11.63 ± 5.39 | 12.27 ± 3.92 | 11.23 ± 3.11 |
| 背阔肌 <sup>a</sup>   | 12.47 ± 0.96 | 13.73 ± 0.56 | 12.93 ± 7.52  | 13.78 ± 5.58 | 11.12 ± 5.69 | 13.01 ± 3.68 | 13.35 ± 5.69 | 14.40 ± 7.23 |

表 11 反手动作相关肌肉贡献度(%) ( $n=8$ )

| 肌肉名称                   | 全阶段          |              | 引拍阶段         |               | 挥拍击球阶段       |              | 随挥阶段         |              |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                        | 单手反拍         | 反手切削         | 单手反拍         | 反手切削          | 单手反拍         | 反手切削         | 单手反拍         | 反手切削         |
| 三角肌中束                  | 20.83 ± 3.77 | 26.39 ± 7.14 | 18.03 ± 5.00 | 22.82 ± 5.74  | 22.41 ± 3.38 | 26.73 ± 6.89 | 24.59 ± 3.63 | 29.60 ± 8.68 |
| 肱二头肌 <sup>cd</sup>     | 12.29 ± 3.13 | 10.48 ± 2.84 | 10.79 ± 3.07 | 10.31 ± 3.71  | 13.73 ± 3.26 | 10.77 ± 2.85 | 13.30 ± 2.80 | 10.21 ± 2.89 |
| 肱三头肌                   | 12.25 ± 3.17 | 15.86 ± 4.75 | 10.59 ± 2.93 | 13.41 ± 4.90  | 13.85 ± 3.65 | 16.82 ± 4.81 | 13.60 ± 3.87 | 17.23 ± 5.62 |
| 肱桡肌                    | 16.90 ± 5.23 | 14.92 ± 6.86 | 18.32 ± 5.41 | 17.90 ± 10.52 | 16.03 ± 5.49 | 16.82 ± 4.81 | 15.27 ± 5.53 | 13.01 ± 5.54 |
| 桡侧腕伸肌群 <sup>abcd</sup> | 20.71 ± 5.34 | 14.89 ± 2.15 | 23.54 ± 7.36 | 17.22 ± 3.55  | 18.37 ± 3.88 | 13.99 ± 1.86 | 17.66 ± 3.79 | 13.50 ± 1.73 |
| 胸大肌                    | 8.24 ± 3.59  | 7.94 ± 4.20  | 8.28 ± 3.99  | 7.09 ± 2.87   | 8.01 ± 3.48  | 8.63 ± 5.40  | 8.21 ± 3.92  | 8.26 ± 5.26  |
| 背阔肌                    | 8.78 ± 2.41  | 9.51 ± 2.56  | 10.33 ± 3.23 | 11.26 ± 3.48  | 7.57 ± 1.98  | 8.92 ± 2.26  | 7.36 ± 1.66  | 8.19 ± 2.12  |

转动半径和挥拍距离获得了更大的击球力量潜力。然而,虽然直臂击球的挥拍距离更大,但转动惯量的增大也意味着对运动员各环节肌肉协同发力的要求更高。冯度等<sup>[22]</sup>指出,正手击球时各环节速度的传递遵循“鞭打”原理,即速度由下肢经躯干至上肢依次递增,拍头速度最大。直臂击球由于转动半径更

大,更需要各环节间精确的时间协调和力量传递。

正手屈臂击球挥拍击球阶段的时间(0.252±0.056 s)显著短于正手直臂击球(0.309±0.087s)( $p<0.05$ )。这一结果与刘婕等<sup>[23]</sup>研究中的发现相呼应。从生物力学角度分析,挥拍击球阶段的时间长短直接影响拍头速度和击球质量。柴娇<sup>[24]</sup>等提出,

挥拍击球阶段的时间、拍头速度等指标是评价正手击球技术水平的重要参数。挥拍击球阶段时间较短意味着加速过程更快,但也要求肌肉在更短时间内产生更大的爆发力。本研究结果显示,单手反手击球动作的引拍阶段持续时间( $0.922\pm0.176$  s)显著长于反手切削( $0.647\pm0.128$  s)( $p<0.01$ ),而随挥阶段持续时间( $0.180\pm0.027$  s)显著短于反手切削( $0.227\pm0.057$  s)( $p<0.05$ )。靳乾辉等<sup>[25]</sup>发现,优秀运动员反手击球引拍阶段时间较长,但挥拍击球阶段时间极短,动作节奏表现为“慢引拍、快挥拍”的特点。梁俊杰等<sup>[26]</sup>在研究中也指出,反手切削的随挥阶段时间较长,动作更为舒展流畅,有利于控制球的旋转和落点。本研究中反手击球与切削在动作时间上的差异与上述研究观点相符。

关节角度方面,本研究发现,正手直臂击球的肘关节角度( $134.05\pm13.294^\circ$ )在整个动作阶段均显著大于屈臂击球( $115.891\pm15.933^\circ$ )( $p<0.05$ ),这与两种击球方式的技术特征定义相符。廖苏等<sup>[27]</sup>指出,肘关节角度是区分不同击球技术的关键指标之一,击球时肘关节的伸展程度直接影响前臂的杠杆效应和拍头速度。直臂击球肘关节角度更大,说明前臂更接近完全伸展状态,从而延长了力臂,提高了击球的力量传递效率。在击球瞬间,正手直臂击球的肩关节角度( $79.041\pm9.239^\circ$ )显著大于屈臂击球( $53.299\pm15.559^\circ$ )( $p<0.05$ )。这一结果表明,直臂击球在击球瞬间肩关节的伸展和水平外展程度更大,有利于增加击球点的覆盖范围和击球力量。胡启权等<sup>[28]</sup>发现,肩关节角度的大小与击球时躯干的转动和上肢的伸展密切相关,较大的肩关节角度通常伴随更强的躯干旋转和更大的击球力量。本研究结果与上述研究观点一致。单手反拍击球和反手切削的腕关节角度在整个动作阶段均呈递增趋势,但反手切削动作的腕关节角度变化更为平稳。腕关节角度的变化与拍臂角密切相关,拍臂角的增加与腕关节屈曲、尺偏有关,拍臂角的减小与腕关节背伸、桡偏有关。本研究中反手切削腕关节角度变化更平稳,说明切削动作对腕关节的控制要求相对稳定,腕关节的活动范围相对较小。这一特点可能使切削动作对腕伸肌群的负荷相对较小,从而降低网球肘的发病风险。

本研究显示正手直臂与屈臂击球在肌肉激活模式上呈现显著差异。郭全清<sup>[29]</sup>研究发现三角肌中束是正手击球最先发力的肌肉之一,其激活水平直接反映肩关节运动强度;本研究直臂击球三角肌中束 RMS 显著大于屈臂击球,说明更大的挥拍距离和肩关节角度需要更强的肩部力量来维持。然而,屈臂击球在挥拍阶段的桡侧腕伸肌群激活水平显著高于直臂击球,廖苏等指出该肌群激活水平与腕关节负荷密切相关,屈臂击球时肘关节屈曲程度较大,需通过腕关节更大活动补偿,从而增加了腕伸肌群负荷。廖佳棋等<sup>[30]</sup>认为腕伸肌群过度负荷是网球肘的重要致病因素,从损伤预防角度看,屈臂击球在挥拍阶段的潜在风险可能更高。随挥阶段屈臂击球的肱桡肌激活同样显著高于直臂击球,刘卉等<sup>[31]</sup>指出肱桡肌在此阶段参与前臂旋转和稳定控制,夏永桢等<sup>[32]</sup>发现随挥阶段前臂肌肉的激活模式直接影响球拍控制效果,屈臂击球需要更强的前臂肌肉收缩来维持击球稳定性。

反手击球与切削相比,廖苏等的研究证实肱桡肌在反手击球中是维持前臂稳定的关键肌群,本研究单手反拍的全阶段肱桡肌激活显著高于切削,说明反手击球过程中前臂旋前和屈肘活动更为剧烈。引拍阶段单手反拍的肱二头肌和桡侧

腕伸肌群激活均显著大于切削,反手击球引拍阶段桡侧腕伸肌群作为贡献度最大的肌肉,在腕关节屈曲时近固定条件下离心收缩;杜蒙蒙等<sup>[33]</sup>进一步指出,桡侧腕伸肌群的过度使用是导致腕关节损伤的主要生物力学因素。

肌肉贡献度分析揭示了更深层的协调发力差异。李璐等<sup>[34]</sup>研究表明网球运动员肘关节伸肌肌力水平显著高于其他项目运动员,本研究中屈臂击球在挥拍阶段的肱二头肌和肱三头肌贡献度均显著高于直臂击球,说明屈臂击球更依赖肘周肌肉主动发力完成击球,而直臂击球因肘关节接近完全伸展,力量更多来自肩部和躯干的转动。

反手方面,单手反拍的桡侧腕伸肌群贡献度在全阶段及各子阶段均显著大于切削,验证了关于该肌群在反手击球中高贡献度、低肌力、易疲劳致损的结论。廖苏等发现专业运动员反手发力顺序以桡侧腕伸肌群起始,廖佳棋等指出其反复过度使用是网球肘的主要生物力学机制,本研究为上述观点提供了直接证据。生物学机制上,反手击球过程中腕关节需经历从屈曲到伸展再到稳定的复杂运动,桡侧腕伸肌群需在多相位进行离心与向心收缩转换;切削动作的腕关节运动相对简单,主要维持稳定伸展状态,故负荷较小。此外,任满迎等<sup>[35]</sup>指出肱二头肌在鞭打动作链中发挥“制动器”作用,本研究反手击球在挥拍和随挥阶段肱二头肌贡献度均显著高于切削,说明反手击球对肘关节伸展速度的精细控制更依赖肱二头肌的离心调节。

综合运动学和肌电学分析结果,正手直臂击球和屈臂击球在网球肘损伤风险方面各有特点。正手直臂击球由于挥拍距离更长、转动惯量更大,对三角肌中束的激活要求更高(全阶段 RMS 值更大),但其在挥拍击球阶段桡侧腕伸肌群的激活水平显著低于屈臂击球。从网球肘损伤机制角度分析,桡侧腕伸肌群的过度负荷是网球肘的主要致病因素,因此从这一指标看,直臂击球在挥拍阶段的网球肘风险可能低于屈臂击球。然而,正手直臂击球腕关节角度变化更大,对腕关节的控制要求更高。王勇等<sup>[36]</sup>指出,直臂击球虽然可以获得更大的击球力量,但对运动员的身体素质和技术水平要求也更高,腕关节的不稳定因素可能增加损伤风险。因此,对于业余爱好者而言,屈臂击球虽然在挥拍阶段桡侧腕伸肌群激活水平较高,但由于其动作结构相对简单、易于控制,整体损伤风险可能并不一定高于直臂击球。这一观点也与李玉超等在浅谈网球底线正手上旋球技术教学的重点环节中的建议一致,即对于初学者和业余爱好者,应优先考虑动作的规范性和稳定性,而非单纯追求击球力量。

从桡侧腕伸肌群的肌肉贡献度分析,单手反手击球在各阶段的桡侧腕伸肌群贡献度均显著高于反手切削,且肱二头肌在挥拍击球和随挥阶段的贡献度也显著高于切削,桡侧腕伸肌群在单手反手击球中具有较高的肌肉贡献度,且其均方根振幅值较低,肌肉相对激活水平弱,易产生运动疲劳,单手反手击球较反手切削具有更高的网球肘发病风险。柳慧斌等<sup>[37]</sup>指出,运动损伤的发生往往是多因素共同作用的结果,包括技术动作不当、肌肉力量不足、训练负荷过大和恢复不充分等。本研究中反手击球桡侧腕伸肌群高贡献度和高激活水平的特点,恰好符合上述损伤风险因素中的“技术动作导致特定肌群过度负荷”这一条件。

本研究存在一定的局限性:1) 本研究只分析了球速最快的一次击球,对于技术动作的稳定性和一致性方面有所欠缺,今后研究可考虑分析运动员多次数据,以全面评估技术特征。2) 本研究样本量较少,未来研究可考虑扩大样本量,以提高研究的普适性。3) 由于受试者正手击球时习惯于某一种(直臂或屈臂)击球方式,所以本研究采用限制条件的方式减少误差即“球需要落在网球场对侧 2.05 m×2.74 m 有效区内,且受试者本人和实验者都认为此次击球是一次高效的击球,同时满足这3个条件则保留此次数据”,若今后有更好的方式进行采集,可提升研究的严谨性。

## 4 研究结论

不论在正手击球还是反手击球中,腕伸肌群肌肉相对激活水平较差,但肌肉贡献度较高,可能会产生运动疲劳,存在“网球肘”的潜在风险。屈臂击球较直臂击球存在更大的潜在损伤风险,单手反拍击球较反手切削存在更大的潜在损伤风险。“网球肘”的损伤在整个运动阶段中均有可能发生,熟练掌握各阶段运动技巧,维持关节稳定性,依据自身状况选取适当的运动时间与运动强度加以练习,运动后对各肌肉群进行放松训练,可较大幅度预防“网球肘”损伤的发生。对于经常使用单手反手击球的运动员和爱好者而言,有针对性的桡侧腕伸肌群力量训练和疲劳恢复措施是预防网球肘的重要策略。

## 参考文献:

- [1] 柏卫东.对治疗“网球肘”的探讨[J].体育科技,2001,22(4):43-45.
- [2] 郭照德,张欢.“网球肘”患病情况调查及其损伤形成的解剖学机理与预防对策探讨[J].现代预防医学,2012,39(1):93-95.
- [3] Aben A,De Wilde L,Hollevoet N,et al. Tennis Elbow: Associated Psychological Factors[J]. Journal of Shoulder and Elbow Surgery, 2018,27(3):387-392.
- [4] 廖苏,刘卉,熊开宇.网球专业运动员和初学者单反动作技术的生物力学研究[J].北京体育大学学报,2012,35(2):110-113.
- [5] De Smedt T,De Jong A, Van Leemput W,et al. Lateral Epicondylitis in Tennis: Update on Aetiology, Biomechanics and Treatment [J]. British Journal of Sports Medicine, 2007,41(11):816-819.
- [6] Hennig E M. Influence of Racket Properties on Injuries and Performance in Tennis[J]. Exercise and Sport Sciences Reviews, 2007,35(2):62-66.
- [7] 刘玉雷,崔国庆,教英芳,等.关节镜下 Nischl 清理术治疗顽固性网球肘的影响因素[J].中国运动医学杂志,2007,26(4):444-447.
- [8] Elliott B. Biomechanics and Tennis[J]. British Journal of Sports Medicine, 2006,40(5):392-396.
- [9] Blackwell J R,Cole K J. Wrist Kinematics Differ in Expert and Novice Tennis Players Performing the Backhand Stroke: Implications for Tennis Elbow[J]. Journal of Biomechanics, 1994,27(5):509-516.
- [10] Morris M,Jobe F W,Perry J. Electromyographic Analysis of Elbow Function in Tennis Players[J]. American Journal of Sports Medicine. 1989;17(2):241-247.
- [11] Giangarra C E,Conroy B,Jobe F W,et al. Electromyographic and Cinematographic Analysis of Elbow Function in Tennis Players Using Single- and Double-Handed Backhand Strokes[J]. The American Journal of Sports Medicine, 1993,21(3):394-399.
- [12] 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.
- [13] Ryu R K N,McCormick J,Jobe F W,et al. An Electromyographic Analysis of Shoulder Function in Tennis Players[J]. The American Journal of Sports Medicine, 1988,16(5):481-485.
- [14] Landlinger J,Lindinger S J,Stögl T,et al. Kinematic Differences of Elite and High-Performance Tennis Players in the Cross Court and down the Line Forehand[J]. Sports Biomechanics, 2010,9(4):280-295.
- [15] 吴含兵,孙阳,刘九江,等.不同踏频对骑行时下肢肌肉激活与疲劳特征的影响[J].湖北体育科技,2026,45(2):63-69+111.
- [16] Caty V,Aujouannet Y,Hintzy F,et al. Wrist Stabilisation and Forearm Muscle Coactivation during Freestyle Swimming[J]. Journal of Electromyography and Kinesiology, 2007,17(3):285-291.
- [17] 郭峰,张日辉.优秀女子拳击运动员后手直拳技术动作上肢肌肉表面肌电分析[J].沈阳体育学院学报,2009,28(4):65-68.
- [18] Wu S,Cross M T.Comparison of Ball-and-Racket Impact Force Between Two Tennis Backhand Stroke Technique[J]. Journal of Orthopaedic Sports Physical. 2001,31(5):247-254.
- [19] 伦斯特伦.网球[M].徐国栋,译.北京:人民体育出版社,2005:13-18+297.
- [20] 蒋婷,祁兵.不同水平网球选手正手击球技术运动学研究[J].北京体育大学学报,2014,37(9):128-132.
- [21] 谢克旺,陈岩.不同技能水平网球选手正手击球动作生物力学分析[J].体育科技文献通报,2025,33(2):149-152.
- [22] 冯度,杜裕.网球正手击球技术生物力学研究综述[J].运动,2019(5):11-12.
- [23] 刘婕.运动性疲劳对优秀男子网球运动员正手上旋球技术影响的生物力学研究[D].河北师范大学,2024.
- [24] 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.
- [25] 靳乾辉.男子网球运动员单反击球技术的运动学比较分析[D].成都体育学院,2022.
- [26] 梁俊杰.网球反手切削球技术特征的生物力学研究[D].西安体育学院,2022.
- [27] 廖苏,刘卉,熊开宇.网球专业运动员和初学者单反动作技术的生物力学研究[J].北京体育大学学报,2012,35(2):110-113.
- [28] 胡启权.我国优秀青年男子网球选手正手大力击上旋球动作的生物力学分析[J].体育科研,2009,30(2):67-70.
- [29] 郭全清.青年男子网球运动员主要动作的肌电分析与应用[D].北京体育大学,2006.
- [30] 廖佳棋.运动员网球肘的发病特点与防治策略研究[C]//中国班迪协会(CBF),广东省体能协会(GSCA),国际化和双语学校教育家协会(IBSEA),澳门体能协会(MSCA).2025年首届粤港澳大湾区体育与健康大会论文集.[出版者不详],2025:218-222. DOI:10.26914/c.cnkihy.2025.061329.
- [31] 刘卉.网球大力发球技术的运动生物力学原理[J].北京体育大学学报,2000,23(2):173-176+180.
- [32] 夏永桢,刘晔.网球拍线径对底线击球效果及持拍臂肘关节的影响[J].体育学刊,2018,25(3):134-139.
- [33] 杜蒙蒙.基于解剖学与运动生物力学原理对网球运动中腕关节损

(下转第103页)

- ventive Medicine, 2003, 25(4): 277-282.
- [79] Levy A R, Polman R C J, Nicholls A R, et al. Sport Injury Rehabilitation Adherence: Perspectives of Recreational Athletes[J]. International Journal of Sport and Exercise Psychology, 2009, 7(2): 212-229.
- [80] Carron A V, Hausenblas H A, Mack D. Social Influence and Exercise: a Meta-Analysis [J]. Journal of Sport & Exercise Psychology, 1996, 18(1): 1-16.
- [81] Litwin H. Social Predictors of Physical Activity in Later Life: The Contribution of Social-Network Type [J]. Journal of Aging and Physical Activity, 2003, 11(3): 389-406.
- [82] Duncan S C, Duncan T E, Strycker L A. Sources and Types of Social Support in Youth Physical Activity[J]. Health Psychology, 2005, 24(1): 3-10.
- [83] Powell L M, Slater S, Chaloupka F J, et al. Availability of Physical Activity-Related Facilities and Neighborhood Demographic and Socioeconomic Characteristics: a National Study[J]. American Journal of Public Health, 2006, 96(9): 1676-1680.
- [84] Pedersen M R L, Hansen A F, Elmoose-sterlund K. Motives and Barriers Related to Physical Activity and Sport across Social Backgrounds: Implications for Health Promotion[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(11): 5810.
- [85] King A C, Castro C, Wilcox S, et al. Personal and Environmental Factors Associated with Physical Inactivity among Different Racial-Ethnic Groups of U. S. Middle-Aged and Older-Aged Women[J]. Health Psychology, 2000, 19(4): 354-364.
- [86] Wang H, Pang J, Yang X, et al. School-Based Environment and Physical Activity in Adolescents: a Systematic Review and Meta-Analysis[J]. Preventive Medicine, 2025, 191: 108221.
- [87] Sallis J F. Environmental Influences on Physical Activity: Applying Ecological Models[J]. Journal of Sport & Exercise Psychology, 2000, 22: s1-s2.
- [88] Saelens B E, Sallis J F, Black J B, et al. Neighborhood-Based Differences in Physical Activity: an Environment Scale Evaluation [J]. American Journal of Public Health, 2003, 93(9): 1552-1558.
- [89] Sallis J F, Cerin E, Conway T L, et al. Physical Activity in Relation to Urban Environments in 14 Cities Worldwide: a Cross-Sectional Study[J]. The Lancet, 2016, 387(10034): 2207-2217.
- [90] Crust L, Henderson H, Middleton G. The acute effects of urban green and countryside walking on psychological health: a field-based study of green exercise [J]. International Journal of Sport Psychology, 2013, 44: 160-177.
- [91] 王深, 张俊梅, 刘一平. 运动类 APP 促进大众锻炼坚持性的有效因素研究[J]. 福建师范大学学报(哲学社会科学版), 2018(6): 88-99.
- [92] 孙高峰, 潘小非. 健身 APP 需求支持对青少年锻炼坚持性的影响: 自主动机与执行意向中介作用[J]. 北京体育大学学报, 2025, 48(3): 104-113.
- [93] Ekkekakis P, Acevedo E O. Affective responses to acute exercise: toward a psychobiological dose-response model [M]//Acevedo E O, Ekkekakis P. Psychobiology of physical activity. Champaign, IL: Human Kinetics, 2006: 91-109.
- [94] Williams D M. Exercise, Affect, and Adherence: an Integrated Model and a Case for Self-Paced Exercise[J]. Journal of Sport & Exercise Psychology, 2008, 30(5): 471-496.
- [95] Martín-Martínez C, García-González M, Mijarra-Murillo J J, et al. Physical Activity Preferences across Demographic Groups: a Systematic Review of Population-Based Evidence and Implications for Public Health and Intervention Design [J]. Frontiers in Public Health, 2026, 13: 1725783.
- [96] Beauchamp M R, Ruissen G R, Dunlop W L, et al. Group-Based Physical Activity for Older Adults (GOAL) Randomized Controlled Trial: Exercise Adherence Outcomes[J]. Health Psychology, 2018, 37(5): 451-461.
- [97] Dishman R K, Buckworth J. Increasing Physical Activity: a Quantitative Synthesis[J]. Medicine Science in Sports Exercise, 1996, 28(6): 706-719.

(上接第68页)

- 伤种类、机制及治疗措施的研究[J]. 体育科技文献通报, 2022, 30(10): 242-245.
- [34] 李璐, 郑松岭, 贺江涛, 等. 男子网球运动员与羽毛球运动员上肢关节等速肌力特征比较研究[J]. 福建体育科技, 2025, 44(3): 79-85+91.
- [35] 任满迎, 闫琪, 刘颖. 上肢鞭打运动链肌力诊断与评价新方法的初步研究: 以网球正手抽击动作测试分析为例[J]. 山东体育科技, 2013, 35(4): 86-90.
- [36] 王勇. 浅析网球正手击球技术的限制性因素[J]. 吉林体育学院学报, 2010, 26(2): 65-66.
- [37] 柳慧斌. 生物力学视角下青少年运动损伤防治策略分析[J]. 医用生物力学, 2025, 40(4): 1077.