

基于Accelerometer及GPS指标对专业男子网球运动员比赛跑动特征及生理负荷研究

Research on the Running Characteristics and Physiological Load of Professional Male Tennis Players Based on Accelerometer and GPS Indexes

杨熹¹, 陈小平^{1,2*}, 周喆啸¹, 周海雄¹, 郑航¹, 汤珊¹, 姚硕³
YANG Xi¹, CHEN Xiaoping^{1,2*}, ZHOU Zhexiao¹, ZHOU Haixiong¹,
ZHENG Hang¹, TANG Shan¹, YAO Shuo³

摘要:目的:探讨男子网球运动员三盘两胜及平局决胜制比赛跑动特征与生理负荷。方法:4名专业男子网球运动员,身高(179.5±7.5)cm,体质量(71.7±3.5)kg,共进行6场硬地模拟比赛,采取多器件集成的Catapult OptimEye S7信号接收器和心率传感器、血乳酸分析仪对运动员全场比赛中的跑动数据和内负荷指标进行采集与监测,赛后编辑数据并进行差异性分析。结果:1)男子网球运动员在(78.4±20.8)min的比赛中总跑动距离为(4 093±1 168)m,其中处于低速跑动距离与低速跑动时间占比分别为88.3%和95.1%。平均惯性动作分析体系(inertial movement analysis, IMA)为(1 357±139)次,运动员负荷(PlayerLoad™, PL)为513±140,其中2D运动员负荷(2D PlayerLoad™, 2D PL)和低速运动员负荷(PlayerLoad™ slow, PL slow)占比分别为69.2%和85.9%;2)各盘跑动距离均呈显著性差异($P<0.05$),第2盘比赛加速和正手区变向次数与第1盘呈显著性差异($P<0.05$),第2盘与第1、3盘呈显著性差异($P<0.05$);3)比赛平均心率为(151±15.4)次/min,65%~75%最大心率(HR_{max})占比为31.3%,75%~85% HR_{max}占比为42.4%,平均血乳酸水平为(5.4±2.4)mmol/L。负者心率、血乳酸浓度对比胜者具有显著性差异($P<0.05$)。结论:1)研究结果的比赛时间与跑动距离均高于多数职业男子网球比赛,各盘跑动负荷量呈现由低至高的规律性变化。男子运动员出色的灵敏表现是硬地比赛致胜的关键因素之一。2)研究设计的比赛对运动员生理要求较高,负者生理负荷水平高于胜者以及职业男子运动员,比赛中高心率分布比例居多,运动员机体酸性环境出现较早。有氧能力差、后程耐力水平不足是造成比赛失利的主要原因。

关键词: 持拍运动;网球;跑动特征;心率;血乳酸

Abstract: Objective: To investigate the running characteristics and physiological load of male tennis players in three sets of two-win and tie-break. Methods: Four well trained tennis players, height (179.5±7.5) cm, weight (71.7±3.5) kg played a total of six hard-court simulated matches, and a multivariate integrated Catapult OptimEye S7 signal receiver, heart rate sensor, and blood lactate analyzer were used to collect and monitor the running data and internal load indexes during the whole match. The data were compiled and analyzed for variability after the match. Results: 1) The total running distance during the (78.4±20.8) min match was (4 093±1 168) m. The proportion of distance and time running at low speed was 88.3% and 95.1%, respectively. The average IMA was (1 357±139) times, and PlayerLoad™ was 513±140. 2D PlayerLoad™ and PlayerLoad™ slow accounted for 69.2% and 85.9%, respectively. 2) The running distances in each set were significantly different ($P<0.05$). The number of acceleration and forehand corner change of direction in the second set was significantly different from the first set ($P<0.05$). PlayerLoad™, 2D PlayerLoad™ and PlayerLoad™ slow in the second set significantly differed from the first and third sets ($P<0.05$). 3) The average heart rate was (151±15.4) bpm; 65%~75% HR_{max} heart rate interval accounted for 31.3%, 75%~85% HR_{max} heart rate interval ac-

基金项目:

国家社会科学基金项目(19BTY099);
宁波大学大学生科技创新项目
(2020SRIP0512)

第一作者简介:

杨熹(1998-),女,硕士,主要研究方向为运动训练,E-mail: isyangxi@hotmail.com。

*通信作者简介:

陈小平(1956-),男,教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为运动训练,E-mail: chenxiaoping@ciss.cn。

作者单位:

1. 宁波大学,浙江 宁波 315211;
 2. 国家体育总局体育科学研究所,北京 100061;
 3. 合肥师范学院,安徽 合肥 230061
1. Ningbo University, Ningbo 315211, China;
2. China Institute of Sport Science, Beijing 100061, China;
3. Hefei Normal University, Hefei 230061, China.

counted for 42.4 %, and the mean blood lactate value was (5.4 ± 2.4) mmol/L. The loser's heart rate and blood lactate concentration were significantly different from the winner's ($P < 0.05$). Conclusions: 1) The match time and running distance in the study were more extended than in professional men's tennis matches, and the running load of each set showed a regular change from low to high. The excellent agility performance of male players is one of the critical parameters for winning hard-court matches. 2) The match in the study had higher physiological demands on the players, losers' physiological load were higher than the winner and professional male players, the match intensity with high heart rate distribution ratios and the earlier appearance of an acidic environment in the physiology. Weak aerobic capacity and lack of endurance level were the main factors that caused the failure of the match.

Keywords: racket sports; tennis; running characteristics; heart rate; blood lactate concentration

中图分类号: G804.2 **文献标识码:** A

目前,我国男子网球整体仍处于世界较低水平,在 2023 年 5 月职业网球联合会 (Association of Tennis Professionals, ATP) 公布的中国男子世界排名中,我国男子网球运动员最高排名为 57 位,进入前 500 名的运动员仅有 4 名。在此背景下,进一步加强网球项目的研究,科学总结归纳网球运动专项特征,并以此作为训练的目标和依据,是提升我国男子网球整体竞争力的重要途径。

随着柔性电子、多功能器件集成等技术的不断进步,运动传感器逐渐智能化、多元化、微型化、柔性化。通过多方位、多视角采集运动员比赛或训练过程产生的信号,为运动员和教练员科学化训练提供了数据支持(苏炳添等, 2022)。由 GPS、加速度计、陀螺仪及磁力计共同组成的便携式惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU)/三轴惯性加速度传感器 (accelerometer),为运动员外部负荷的波动提供实时监测与反馈,其精准性以及相关信效度指标也运用在不同的集体项目中 (Anita et al., 2020; Aughey, 2011; Carling et al., 2019)。所衍生的惯性动作分析体系 (inertial movement analysis, IMA) 和运动员负荷 (PlayerLoad™, PL) 现已成为监控集体球类项目运动员外部负荷的重要指标(冯锐等, 2018; 李东波等, 2020; Baptista et al., 2018; Jones et al., 2019)。以往网球项目外负荷的监控大多通过影像自动跟踪系统 (automatic tracking system)、鹰眼系统 (the hawk-eye system) 等对训练及比赛视频进行分析 (Bulent et al., 2017, 2018; Galé-Ansodi et al., 2016; Lara et al., 2018; Pereira et al., 2017)。近年才出现基于 GPS 数据和 PlayerLoad™ 分析体系探究网球比赛负荷特征的研究 (Galé-Ansodi et al., 2018, 2020; Hoppe et al., 2020)。总体而言,目前对网球比赛不同比赛赛制、场地材质、性别的比赛跑动特征研究结果不够明确,缺少基于 Accelerometer 指标评估男子三盘两胜赛制网球比赛跑动负荷,以及与内负荷指标相结合探究比赛内、外负荷特征的研究。

网球运动员比赛生理负荷不同于其他间歇类项目,且比赛内负荷强度变化并不局限于外负荷运动强度。网球项目常使用摄氧量、心率、血乳酸、主观运动强度 (rating of perceived exertion, RPE) 指标监控运动员内部负

荷 (Fernandez-Fernandez et al., 2009),高水平运动员有氧能力水平在 $44 \sim 69$ mL/(kg·min),大多超过 50 mL/(kg·min) (Christmass et al., 1998; Elliott et al., 1985; Kovacs et al., 2004)。比赛中平均心率在 $140 \sim 155$ 次/min,心率虽是较容易监控的强度指标,但因其无法表现无氧供能参与的爆发式运动形式,难以准确反映间歇运动(网球)的生理负荷特征,因此不能作为内负荷强度的唯一标准。而关于血乳酸指标有研究表明运动员在比赛中较为排斥有创的血液采集,截至目前三盘两胜赛制比赛研究的乳酸指标采集多集中在单数局交换场地时 (Mendez-Villanueva et al., 2007),但由于缺少心率指标的加持,对探究网球运动员比赛生理反应变化不够深入。

综上,本研究拟通过 Accelerometer 及 GPS 跑动数据,结合内负荷变化特征(心率、血乳酸),对男子网球三盘两胜平局决胜制比赛中运动员内、外负荷的量化,探究男子网球比赛跑动特征以及生理负荷。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

研究对象为 4 名专业男子网球运动员,年龄 (19.7 ± 0.9) 岁,体质量 (71.7 ± 3.5) kg,身高 (179.5 ± 7.5) cm,运动年限 (12.7 ± 0.8) 年,运动员技术等级均为国家一级。全体受试者曾获 2021 年第 25 届中国大学生网球锦标赛(总决赛)丙组团体季军。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。

1.2 研究方法

1.2.1 模拟单打比赛

采用小组循环进行模拟比赛 ($n=6$),比赛赛制采用三盘两胜平局决胜制,严格按照国际网联计分标准进行比赛。安排国家一级网球裁判员担任主裁判,比赛设置奖励以激发运动员比赛欲,确保运动员参与实验的积极性,同时设置观众氛围,力求营造真实的比赛环境。

运动员进行 20 min 热身后,静坐休息 10 min,休息期间在双方运动员肩胛骨之间使用定制背心,佩戴由国际网联 (International Tennis Federation, ITF) 比赛批准使用的

信号接收装置——Catapult OptimEye S7 (Catapult Sports, 澳大利亚, 100 Hz) 对比赛跑动速度、变向等 Accelerometer 和 GPS 数据进行采集,并在胸前佩戴心率传感器 (Polar T31C, 芬兰) 采集受试者比赛全程心率。设备在测试开始前 15 min 启动,并校准各单元与卫星信号连接。为确保实验客观性和统一性,每位受试者均执行从热身到比赛结束统一的测试流程。同时安排实验人员专门记录每一局比赛开始和结束时间,提高后期比赛数据分割的准确性,之后示意裁判开始比赛。在静息状态、比赛第 1 局、第 3 局及随后的奇数局交换场地、每一盘即刻采集受试者指尖血 10 μ L,并使用血乳酸分析仪 (Biosen C-Line, EKF, 德国) 对血样进行分析。

1.2.2 数据处理

每场比赛结束后,将收集完毕的所有信号接收器与电脑连接,由 Catapult 中国区团队远程操控 Catapult Openfield 软件,下载运动员的比赛数据进行编辑,将内、外负荷数据按照三盘两胜赛制比赛中每一盘 ($n=28$) 比赛进行描述,各指标分类与计算如下。

1) IMA 变向方向分类:根据 IMA 方向,在特定的定向频带内对 IMA 计数进行归类,以运动员加速方向/区域为基准,将运动员面朝球网设为 0° ,运动员为右手持拍,正面朝向球网加速 ($-45^\circ \sim 45^\circ$) 定义为加速 (acceleration, ACC),右侧朝向正手区域加速 ($45^\circ \sim 135^\circ$) 定义为正手区 (forehand corner, FHC),左侧朝向反手区域加速 ($-135^\circ \sim -45^\circ$) 定义为反手区 (backhand corner, BHC) 的 3 个方向 (图 1)。

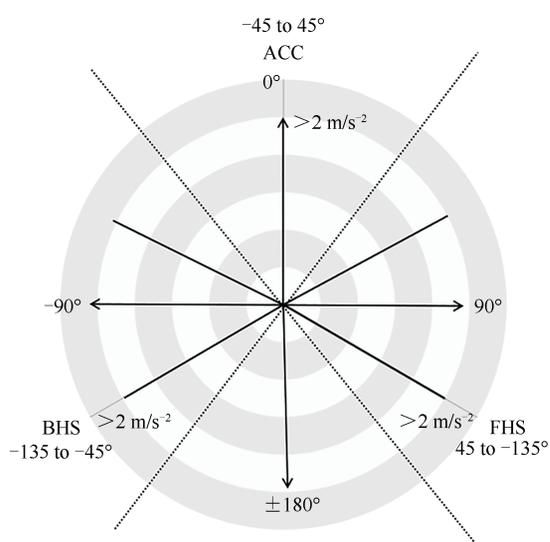


图1 IMA 方向示意图

Figure 1. Schematic Diagram of IMA Direction

注:根据 Hoppe(2016)修改。

2) 加速度指标分类:PL 是加速度计所专门制定的一种人体运动负荷,由三维轴加速数据衍生出的合力向量值。它可以由“3 个向量上(X、Y 和 Z 轴)每个向量加速度

瞬时变化率平方之和,除以 100 的平方根”表示 (公式 1) (Boyd et al., 2013)。PL 包括左右轴 (X 轴)、PlayerLoad™ 前后轴 (Y 轴) PL 和垂直轴 (Z 轴) PL。2D 运动员负荷 (2D PlayerLoad™, 2D PL) 指去除垂直轴,由前后轴及左右轴所产生的 PL,低速运动员负荷 (PlayerLoad™ slow, PL slow) 指速度小于 2 m/s 时的 PL (冯锐等, 2018)。

$$PL = \sqrt{\frac{(a_{x1} - a_{x-1})^2 + (a_{y1} - a_{y-1})^2 + (a_{z1} - a_{z-1})^2}{100}} \quad (1)$$

其中, a_x 为左右轴, a_y 为前后轴, a_z 为垂直轴。

3) 心率区间划分:运动员最大心率 (HR_{max}) 按 220 - 年龄 (岁) 计算,根据运动员 HR_{max} 划分为 5 区间: $HR_{max} < 50\%$ 为 Zone1, $50\% \leq HR_{max} < 65\%$ 为 Zone2, $65\% \leq HR_{max} < 75\%$ 为 Zone3, $75\% \leq HR_{max} < 85\%$ 为 Zone4, $HR_{max} > 85\%$ 为 Zone5,并得出运动员心率区间占比。

4) 速度区间划分:由于网球场维度不足以使运动员产生 > 5 m/s 的跑动速度 (Galé-Ansodi et al., 2017a),因此将跑动速度区间的界定由低到高分:跑动速度 < 2 m/s 为低速段 (low speed, LS), 2 m/s \leq 跑动速度 < 3.8 m/s 为中速段 (middle speed, MS), 3.8 m/s \leq 跑动速度 < 5 m/s 为高速段 (high speed, HS),并计算各速度段时间 (time, T) 和距离 (distance, D) 与总比赛距离与时间占比。

1.2.3 数据分析

运用 SPSS (Statistics 22, IBM Corporation, 美国) 对比赛中各指标进行统计分析。首先对各指标进行 Levene 方差齐性检验,后根据方差齐性结果,分别采用方差齐时 Bonferroni (B) 法或方差不齐时 Dunnett's T3 法对各指标进行多重比较。使用单因素方差分析 (ANOVA) 对各盘比赛跑动数据差异进行分析,使用独立样本 t 检验对胜负者内负荷数据进行分析,使用 χ^2 检验不同运动轴百分比以及胜负者心率区间占比差异。统计结果以平均值 \pm 标准差 ($M \pm SD$) 表示,差异性水平设定 $P < 0.05$ 为具有显著性差异。

2 研究结果

2.1 模拟比赛跑动负荷结果

男子网球比赛平均场时间为 (78.4 ± 20.8) min,第 1 盘 (first set, S1)、第 2 盘 (second set, S2) 和第 3 盘 (third set, S3) 平均比赛时间分别为 (30 ± 10) min、(36.8 ± 9.9) min 和 (28.5 ± 1.5) min。通过表 1、2 可以看出全场平均跑动距离 (total distance covered, TDC) 为 ($4\,093 \pm 1\,168$) m,每局跑动距离 (distance ran per game, DRG) 为 (168 ± 25) m。低速跑动时间 (T_{LS}) 和低速跑动距离 (D_{LS}) 分别占总比赛时间与距离的 95% 和 88.3%。PL 为 513 ± 140 , 2D PL 为 355 ± 101 , PL slow 为 441 ± 120 ; 各轴 PL 无显著性差异 ($P > 0.05$)。结果显示, S2 比赛跑动距离与 S1、S3 比赛呈显著差异 ($P < 0.05$); 同样 PL、2D PL 以及 PL slow 与 S1、S3 比赛呈显著差异 ($P < 0.05$)。

表 1 全场及不同盘 GPS 和运动员负荷指标统计

Table 1 GPS and PlayerLoad™ Indicators Statistics for the Whole Match and Different Sets

GPS 及 PlayerLoad™	全场	S1	S2	S3
TDC/m	4 093 ± 1 168	1 611 ± 586*	2 006 ± 631	1 364 ± 249*
DRG/m	168 ± 25	164 ± 29	172 ± 32	164 ± 12
PL	513 ± 140	200.6 ± 59*	252.2 ± 60	176.7 ± 20*
PL _{game}	21 ± 3	20.4 ± 3.3	21.6 ± 4	21.1 ± 2.4
PL _{min}	6.6 ± 0.7	6.7 ± 0.7	6.6 ± 0.9	6.4 ± 0.1
2D PL	355 ± 101	136.9 ± 40*	162.1 ± 44	122.8 ± 17*
PL slow/%	441 ± 120	167.6 ± 48*	201.5 ± 52	152.4 ± 16*
PLa _y /%	27 ± 1.2	27 ± 1.3	27 ± 1.4	27 ± 1.5
PLa _x /%	31.6 ± 0.5	31.5 ± 0.7	31.7 ± 0.6	31.8 ± 0.5
PLa _z /%	40.8 ± 1.6	41.1 ± 1.7	40.9 ± 1.5	40.5 ± 1.4

注: PL_{game}: 每局运动员负荷 (PlayerLoad™ per game); PL_{min}: 每分钟运动员负荷 (PlayerLoad™ per minute); PLa_y: 前后轴运动员负荷 (PlayerLoad™ of Y-axis); PLa_x: 左右轴运动员负荷 (PlayerLoad™ of X-axis); PLa_z: 垂直轴运动员负荷 (PlayerLoad™ of Z-axis)。与 S2 相比, *表示 $P < 0.05$, # 下同。

表 2 不同速度区间覆盖的时间占比和距离占比

Table 2 Percentage of Time and Distance Covered in Different Speed Zones

速度区间	T/%	D/%
LS	95	88.3
MS	4.2	10.1
HS	0.3	1.1

IMA 平均次数为 (1 357 ± 139) 次, 其中 FHC 和 BHC 约占 IMA 次数的 64%; ACC 约占 IMA 次数的 27%; 结果显示, S1 比赛 IMA 次数与 S2、S3 呈显著性差异 ($P < 0.05$), S2 比赛 ACC 与 S1 呈显著性差异 ($P < 0.05$), S2 比赛 FHC 与 S1、S3 呈显著性差异 ($P < 0.05$), S2 比赛 BHC 与 S3 呈显著性差异 ($P < 0.05$; 图 2)。

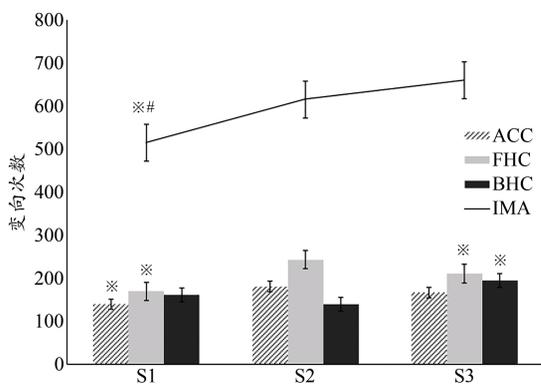


图 2 全场及不同盘 IMA 变向次数特征

Figure 2. Characteristic in Numbers of IMA Change of Direction in the Whole Match and Different Sets

注: 方向: $> 2 \text{ m/s}^2$ ACC、 $> 2 \text{ m/s}^2$ FHC、 $> 2 \text{ m/s}^2$ BHC。与 S3 相比, #表示 $P < 0.05$ 。

2.2 模拟比赛生理负荷结果

由表 3 可知, 全场比赛运动员平均心率为 (151 ± 15.4) 次/min, HR_{max} 为 (179 ± 2.1) 次/min, 各盘间运动员平

均心率及 HR_{max} 无显著性差异 ($P > 0.05$)。比赛整体强度处于 Zone3~Zone4, 以 Zone3、Zone4 为主要心率区间分别占比 31.38% 和 42.49% (图 3A)。从不同心率区间的时间分布上来看, Zone3 约 23 min 36 s、Zone4 约 32 min 42 s、Zone5 约 15 min 44 s (图 3B)。全场比赛运动员血乳酸水平在 1.65~12.15 mmol/L, 各盘运动员血乳酸水平无显著差异 ($P > 0.05$; 表 3)。

表 3 全场及不同盘网球运动员生理学特征

Table 3 Physiological Characteristics of Tennis Players in the Match and Different Sets

比赛	心率/(次·min ⁻¹)		血乳酸/(mmol·L ⁻¹)	
	平均心率	HR _{max}	M ± SD	范围
S1	151 ± 15.4	179 ± 2.1	5.4 ± 2.40	1.65~12.15
S2	149 ± 7.2	175 ± 9.3	5.4 ± 2.15	2.53~9.17
S3	149 ± 10.1	176 ± 3.6	5.5 ± 2.73	2.41~12.15
合计	142 ± 10.3	173 ± 2.1	6.0 ± 3.79	1.65~11.60

进一步将胜负者生理负荷数据进行分析总结, 发现男子网球运动员全场比赛负者心率强度主要维持在 Zone4~Zone5, 胜者心率强度主要维持在 Zone3~Zone4。负者平均心率、HR_{max} 与胜者呈显著差异 ($P < 0.05$); Zone3、Zone5 各区间与胜者呈显著差异 ($P < 0.05$; 表 4)。胜者全场血乳酸水平在 1.68~5.99 mmol/L, 负者为 2.41~12.15 mmol/L。负者全场、S1 及 S2 比赛血乳酸水平与胜者呈显著差异 ($P < 0.05$; 表 5)。

3 分析与讨论

3.1 模拟比赛跑动特征分析

3.1.1 跑动距离与跑速

网球比赛跑动特征常基于比赛时间、移动距离、变向次数、运动间歇比等外负荷指标进行分析, 比赛时运动员需要经历短时 (4~10 s) 高强度击球, 期间穿插 10~20 s

恢复,运动和间歇比例为 1:1~1:2.5(曹春梅等,2010; Fernandez-Fernandez et al.,2009)。因测试手法(监测设备、赛制、性别)不同,本研究结果难以与前人研究进行比较,也少有研究可以进行直接的横向对比。本研究比赛平均时长[(78.4±20.8)min]高于 Ponzano 等(2017)探究不同材质网球比赛代谢特征的结果[硬地(69±17)min]; TDC[(4 093±1 168) m]高于 Murias 等(2007)90 min 模拟比赛的研究[红土(1 199±168) m],且高于 Galé-Ansodi 等(2017b)硬地青少年男子网球比赛[(3 651±1 572) m]; S1 与 S2 比赛 DRG[(167.9±25)m]高于职业网球运动员红土比赛每局跑动距离[S1 为(117.7±94.4) m、S2 为(102.9±92.6) m](Pereira et al.,2017)(表 6)。

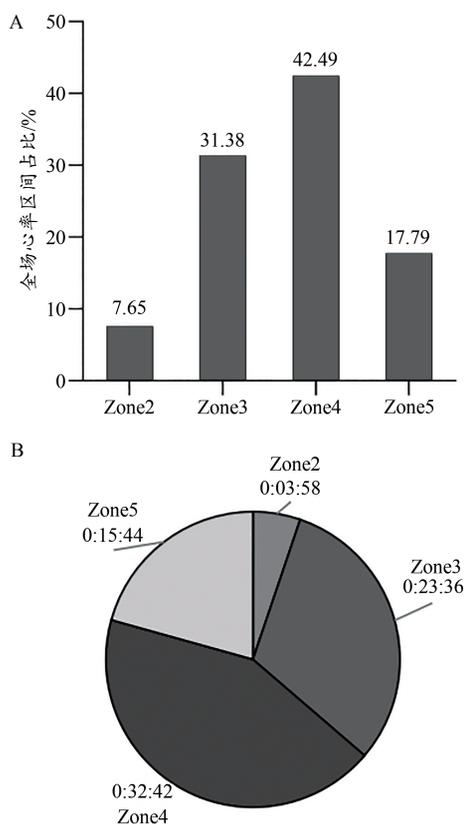


图3 全场比赛心率区间占比(A)和时间分布(B)示意图
Figure 3. Heart Rate Zone Percentage (A) and Time Distribution (B) in the Whole Match

由表 6 可见,在相似赛制和比赛时间下,与其他研究相比,本研究跑动负荷强度更大,对运动员体能储备要求更高。影响比赛时间和跑动距离的因素有很多,例如场外因素(比赛赛制、场地材质、用球、天气)以及个人因素(年龄、性别、身体状态、技术分配、打法特征、心理状态)。S2 比赛受试者表现出 TDC 最高值,推测可能与赛前热身不充分,大脑对神经支配控制的专注度不够有关,进而造成进入比赛状态迟缓。Bishop 等(2003)发现,执行训练任务前提高基线摄氧量水平可改善长期性运动表现,但网球比赛常处于高温环境下,提高肌肉温度、核心温度和

基线摄氧量水平的热身方案在后续比赛中是否易引起疲劳有待进一步探究。Lopez-Samanes 等(2021)研究表明,主动热身可有效提高网球运动员灵敏变向能力,同时在高强度比赛和训练前使用主动热身和泡沫轴的筋膜放松可有效提高髌关节活动度。据此建议教练员应熟悉运动员体能状况、心理状态、场地环境及上场时间安排等,使用不同结构(不同强度、持续时间、恢复时间)的主动热身,预激活大脑对神经中枢传导速度,使运动员更早进入比赛状态。

表 4 比赛胜负者生理学特征(心率)

Table 4 Physiological Characteristic of Winners and Losers in the Match (Heart Rate)

心率	胜者	负者
Zone2/%	6.45	4.60
Zone3/%	39.97	22.32*
Zone4/%	37.57	42.12
Zone5/%	15.06	30.24*
平均心率/(次·min ⁻¹)	146±13.8	155±9.0*
HR _{max} /(次·min ⁻¹)	186±8.6	190±6.1*

注:与胜者相比,*表示 P<0.05,下同。

不同速度区间时间与距离占比的总体结果显示,LS 为运动员主要移动速度段,这与前人研究结论(Galé-Ansodi et al.,2017a)相似。在集体项目比赛中运动员高速跑动距离被认为是区分运动员水平的因素之一(Cameron et al.,2010)。然而,网球场维度运动员无法达到高速冲刺,慢速调整击球更为频繁,且比赛中运动员捡球、得分后的一系列准备活动以及交换场地都处于低速段活动;根据隔网类项目的运动模式,比赛速度区间或许不能用于区分运动员水平评估比赛强度,应将爆发式动作形式作为关键性强度变量。

3.1.2 IMA 变向次数

对网球运动员灵敏表现的定义可分为变向类和反应类,变向类侧重运动员对不同类型、速度、旋转、角度和落点的来球击球前快速改变方向的能力;反应类则强调对方出手后回球的快速预判反应以及预判后“第一步”分腿垫步的爆发能力(Paul et al.,2011)。本研究中,ACC、FHC 以及 BHC 为移动中主要变向方向,显著高于 Hoppe 等(2016)关于三盘两胜“抢十”赛制的红土比赛[比赛时间(84±17)min]的研究结果,成人胜负运动员在 2~<4 m/s 强度下 ACC、FHC 和 BHC 的变向次数分别为胜者(62±19)vs 负者(72±35)、(118±82)vs(83±25)和(175±47)vs(218±49)。造成此种差异的原因可能是赛制不同,本研究比赛一局“平分”时需要连续赢得 2 分才能赢得一局,盘比分 1:1 时需开始新的一盘,运动员在同样交换场地间歇时,相对比赛的时间更长;其次是场地材质的不同,运动员在红土比赛时峰值速度得到缓冲,使用更多的开放式滑步而替代瞬时制动和加速,从而导致设备识别爆发

式运动形式的敏感度降低;说明三盘两胜赛制的硬地比赛中,爆发启动、制动变向的灵敏素质往往影响着运动员的击球表现,提示在训练中需加强运动员在特定场地材

质上的场上反复冲刺能力,例如使用与硬地场地生理反应特征相似的“Star”“Box”(6×30 s)专项跑动训练(Reid et al., 2008)。

表 5 全场及不同盘比赛胜负者生理学特征(血乳酸)

Table 5 Physiological Characteristic of Winners and Losers in the Whole Match and Different Sets (Blood Lactic Acid) / (mmol·L⁻¹)

比赛	胜者			负者		
	最大值	最小值	M±SD	最大值	最小值	M±SD
安静	—	—	1.5±0.2	—	—	1.8±0.2
S1	5.34	1.68	3.45±0.9	10.59	2.66	6.16±2.2*
S2	5.99	2.41	4.0±0.6	12.15	3.24	7.48±2.5*
S3	5.91	1.65	4.0±1.3	11.60	2.56	11.6±3.4*
M±SD	5.99	1.68	3.74±0.9	12.15	2.41	6.19±2.4*

表 6 国外男子硬地网球比赛跑动距离与生理负荷研究分析

Table 6 Analysis of Running Distance and Physiological Load in Foreign Men's Hard Court Tennis Match

文献	研究对象	场地类型	年龄/岁	比赛时间/min	跑动距离/m	平均心率 / (次·min ⁻¹)	血乳酸 / (mmol·L ⁻¹)
Ponzano et al., 2017	NR	硬地	16±3.0	69±17	—	139±12	—
Murias et al., 2007	NR	硬地	16.9±0.7	90	1 199±168	135±21	1.16±0.34
Pereira et al., 2017	ATP	红土	—	S1:45.9±2.8 S2:45.4±3.6	全场:3 160±880 S1每局:117.7±94 S2每局:102.9±92.6	—	—
Smekal et al., 2001	ATP	红土	26±3.7	50	—	152±18	2.07±0.9
Mendez-Villanueva et al., 2007	ATP	红土	27±4.0	52.4±14.8	—	—	S:4.4±2.4 R:3.0±1.3
Ojala et al., 2013	NR, ATP	—	23±3.8	120	—	150±11	4.2~5.3

注:S:发球局;R:接发球局;NR:有国家排名但无 ATP 排名,且未将此项目职业化发展的运动员;ATP:职业男子运动员,有 ATP 排名。

本研究发现, S1 比赛后显示出 IMA 变向次数上的变化,说明随着比赛的推进,跑动负荷整体提升;也可能是运动员制胜分的产生减少,回合变多所导致的被动提升。另外,低等级运动员常出现技术不平衡情况,相对反手较为薄弱,为了改变比赛节奏,双方运动员会将反手区域的回球使用正手侧身攻压制对方。因此根据场上局势所执行的战术选择,需要运动员优异的身体能力作为支撑,在体能训练时提升爆发肌群的加速能力和击球前的主要肌群的制动能力,提高横向移动变向效率的持久性,以适应比赛后期变向比例的增加。此外,本研究未明确 IMA 强度等级,运动员比赛过程中是否存在跑动能力的提升尚不明确,应进一步探讨变向强度变化,以确定运动员比赛移动变向表现。

3.1.3 PlayerLoad™

2D PL 和 PL slow 分别约占 PL 的 69% 和 85%,由于网球比赛不存在肢体碰撞,且场地维度不足以产生较大移动速度,可推测 2D PL 和 PL slow 更适合监测如网球、羽毛球等场地范围较小的运动项目的比赛与训练强度。本研究发现, PL_{Az} 占比最高,结合网球专项特征推测垂直轴负

荷量产生于运动员在比赛中的发球、接发球和每次击球前的分腿垫步、瞬时重心降低、击球后随挥。提示, PL_{Az} 可能更适合监测网球运动中执行技术动作所产生的负荷强度。 PL_{min} 是评估加速度外部负荷的重要指标,与心率和血乳酸水平高度相关(Montgomery et al., 2010)。本研究结果显示,专业男子网球运动员 PL_{min} 低于青少年女子(7.6±3.9)(Galé -Ansodi et al., 2017a), Galé -Ansodi 等(2017b)的研究同样显示男子网球运动员比赛 PL_{min} 低于女子[(6.63±1.73)vs(8.65±4.99)]。男子硬地场地比赛每一分持续时间约在 3.1~15 s,平均每一分持续 6.7±2.2 s,有较快的平均移动速度和击球节奏(Hornery et al., 2007),因此推测 PL_{min} 相对低可能是由于男子在相同时间内运动间歇比频率高于女子,即男子运动员同等时间内能更高频率地产生高强度击球。提示,在平时训练中不能忽视提高男子运动员的快速反应能力,并着重提升短距离(<20 m)爆发式间歇加速、制动能力。

3.2 模拟比赛生理负荷特征分析

3.2.1 心率及分区

比赛跑动特征是反映运动员外负荷的主要方式,生理学负荷特征则是反映内部负荷的主要方式(李博等,

2017)。网球比赛整体内负荷强度在 50%~60% $\dot{V}O_{2max}$, 60%~80% HR_{max} , RPE 等级为 5~7(CR-10)、10~16(Borg-20)。血乳酸为 1.8~2.8 mmol/L, 在长时间高强度回合中可能会上升至 8 mmol/L (Christopher et al., 2019; Kolman et al., 2019; Mendez-Villanueva et al., 2007)。本研究发现, 比赛心率区间主要在 Zone3~Zone5, 与戴维斯杯选手比赛内负荷特征相似, 但区间跨度高于 Gomes 等(2011)的研究(70%~85% HR_{max}), 说明本研究比赛可能长回合比例居高, 运动员打法偏防守击球次数多, 造成整体强度的提升。提示教练员需了解运动员战术打法特征, 及时调整相应训练负荷比例。胜者比赛中平均心率、 HR_{max} 与前人研究结果相似 (Murias et al., 2007; Ojala et al., 2013; Ponzano et al., 2017; Smekal et al., 2001)(表 6)。负者比赛平均心率高于胜者 [(155±9)次/min vs (146±13.8)次/min, $P<0.05$], 负者全场 >85% HR_{max} 占比高于胜者, 其原因可能是每一分及交换场地间歇时间内心率得不到恢复, 造成 >85% HR_{max} 的心率强度占有相当大的比例。提示, 网球运动需要运动员具备良好的间歇恢复能力, 并在赛制规定间歇下采用有效的积极恢复策略。Kerr(2015)发现, 网球运动员处于 >90% HR_{max} 强度下击球的时间占总比赛时间的 13%, 本研究心率强度处于 Zone3~Zone4 的比赛时间占比较高, 建议应参考本研究不同心率区间所需的时间百分比划分运动员的训练强度, 并着重提升处于 Zone5 强度下的击球稳定性。

3.2.2 血乳酸变化

网球击球(正手、反手、发球等)以及爆发性移动变向都需要利用机体无氧供能系统来完成。据报道职业网球运动员赛后血乳酸水平不超过 2.8 mmol/L (Fernandez-Fernandez et al., 2006), 可见职业网球运动员在比赛间歇时可以高效代谢机体产物, 导致赛后即刻乳酸水平低。胜者平均血乳酸浓度与职业男子网球运动员水平相似[发球局(4.4±2.3) mmol/L, 接发球局(3.0±1.3) mmol/L](Mendez-Villanueva et al., 2010)。胜者 S1 为(3.45±0.95) mmol/L, 范围 1.68~5.34 mmol/L 对比 Ojala 等(2013)探究网球比赛负荷对运动员竞技表现、荷尔蒙反应、肌肉反应和疲劳恢复的研究结果相似(范围 3.0~4.9 mmol/L)。Christmass 等(1998)发现, 5 min 内的血乳酸值与高强度移动时间存在显著相关性, 网球比赛无法通过单次测量或中断比赛采集血乳酸, 因此不频繁的指标采集对网球比赛强度的评估有局限性。本研究在标准化比赛规则下共采集比赛中 162 份血液指标, 对比赛过程中的指标监控与评估较为密集, 因此推测男子网球比赛强度在有氧至无氧供能区间(即血乳酸水平在 2~4 mmol/L)。因此, 教练员诱导运动员产生高乳酸水平也许不是有效的训练策略, 建议多进行无氧阈强度范围下的专项训练。

网球比赛中常有高强度回合出现, 随着比赛摄氧量

水平的增加, 机体高效的有氧代谢能力对比赛分、盘之间的恢复至关重要。运动员能量供应的匮乏和代谢产物的累积被认为是造成机体疲劳的主要原因(郑航等, 2021)。负者血乳酸整体水平显著高于胜者, 且负者 S3 血乳酸浓度显著高于 S1、S2。推测负者 S1 比赛角逐后机体乳酸堆积过多, 在短时休息期间无法代谢, 产生疲劳后造成比赛失利。有研究同样证明, 网球运动员机体疲劳导致技战术的表现下滑, 如发球速度、一发成功率的降低和防守反击、制胜球把握能力下降 (Davey et al., 2002, 2003; Mitchell et al., 1992; Vergauwen et al., 1998)。综上, 在训练中应重点发展网球运动员的有氧能力, 良好的有氧能力可推迟和延缓乳酸的出现和升高(陈小平, 2002, 2004), 在高强度比赛中延缓机体疲劳的产生, 规避击球效率下降的风险。另外, 教练员除了通过传统高强度间歇训练 (high-intensity interval training, HIIT) 等手段刺激运动员有氧耐力之外, 还可采用以距离和与比赛移动模式相关为特征的专项短时(5~30 s)HIIT 方法 (Rodríguez et al., 2017)。

4 结论

1) 本研究的比赛时间与跑动距离均高于多数职业男子网球比赛, 各盘跑动负荷量呈现由低至高的规律性变化, 第 2 盘比赛出现跑动距离以及部分 Accelerometer 负荷量指标的显著提升。男子运动员出色的灵敏表现, 特别是预判反应以及不同方向和速度的快速转变能力是硬地比赛致胜的关键因素之一。

2) 以往同类型研究低估了男子运动员硬地比赛的跑动强度, 本研究比赛对运动员生理需求较高, 频繁出现的高强度回合易使运动员机体内环境产生变化引起疲劳。负者生理负荷水平高于胜者以及职业男子运动员, 比赛强度高心率分布比例居多, 机体酸性环境出现较早。有氧能力差、后程耐力水平不足是造成比赛失利的主要原因。

参考文献:

- 曹春梅, 刘钰, 陈小平, 2010. 优秀网球运动员成长过程及网球项目特征的综述[J]. 北京体育大学学报, 33(11): 121-124.
- 陈小平, 2002. 试论“专项能力”的训练: 对我国体能类项目训练中存在的主要问题的探析[J]. 中国体育科技, 38(1): 10-13.
- 陈小平, 2004. 有氧训练: 提高我国耐力项目运动水平的关键[J]. 体育科学, 24(11): 45-50.
- 冯锐, 陈小平, 蔡旭旦, 2018. 基于 Accelerometer 及 GPS 的中国优秀男子曲棍球运动员比赛负荷的研究[J]. 中国体育科技, 54(6): 59-67.
- 李博, 鲍勤, 缪律, 等, 2017. 网球运动生物学特征综述[J]. 中国体育科技, 53(5): 69-83.
- 李东波, 房国梁, 密森, 等, 2020. 中国女子三人篮球队运动员比赛负荷及运动表现特征研究[J]. 中国体育科技, 56(8): 33-39.
- 苏炳添, 李健良, 徐慧华, 等, 2022. 科学训练辅助: 柔性可穿戴传感器运动监测应用[J]. 中国科学: 信息科学, 52(1): 54-74.
- 郑航, 陈小平, 周喆啸, 等, 2021. 2019 年赛艇世锦赛男子双人双桨冠军赛前 6 周训练负荷研究[J]. 中国体育科技, 57(5): 78-85.

- ANITA S, MARTINIQUE S, CINDY P, 2020. The use of GPS analysis to quantify the internal and external match demands of semi-elite level female soccer players during a tournament[J]. *J Sport Sci Med*, 18(1): 73-81.
- AUGHEY R J, 2011. Applications of GPS technologies to field sports[J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 6(3): 295-310.
- BAPTISTA I, JOHANSEN D, SEABRA A, et al., 2018. Position specific player load during match-play in a professional football club[J]. *PLoS One*, 13(5): e0198115.
- BISHOP D, 2003. Warm up II: Performance changes following active warm up and how to structure the warm up[J]. *Sports Med*, 33(7): 483-498.
- BOYD L J, BALL K, AUGHEY R J, 2013. Quantifying external load in Australian football matches and training using accelerometers[J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 8(1): 44-51.
- BULENT K, ERSAN A, 2017. Physiological responses and time-motion characteristics of young tennis players: Comparison of serve vs. return games and winners vs. losers matches[J]. *Int J Perf Anal Spor*, 17(5): 684-694.
- BULENT K, ERSAN A, YUSUF S, 2018. Time-motion characteristics, notational analysis and physiological demands of tennis match play: A review[J]. *Acta Kinesiol*, 12(2): 5-12.
- CAMERON B, BRIAN D, JARRYD H, et al., 2010. Movement pattern comparisons in elite (AFL) and sub-elite (WAFL) Australian football games using GPS[J]. *J Sci Med Sport*, 13(6): 618-623.
- CHRISTOPHER C, ALAN M, DAMIAN H, et al., 2019. Comment on: "The use of microtechnology to quantify the peak match demands of the football codes: A systematic review"[J]. *Sports Med*, 49(2): 343-345.
- CHRISTMASS M A, RICHMOND S E, CABLE N T, et al., 1998. Exercise intensity and metabolic response in singles tennis[J]. *J Sports Sci*, 16(8): 739-747.
- DAVEY P R, THORPE R D, WILLIAMS C, 2002. Fatigue decreases skilled tennis performance[J]. *J Sports Sci*, 20(4): 311-318.
- DAVEY P R, THORPE R D, WILLIAMS C, 2003. Simulated tennis matchplay in a controlled environment[J]. *J Sports Sci*, 21(6): 459-467.
- ELLIOTT B, DAWSON B, PYKE F, 1985. The energetics of singles tennis[J]. *J Human Movement Studies*, 11(1): 11-20.
- FERNANDEZ-FERNANDEZ J, MENDEZ VILLANUEVA A, PLUIM B, 2006. Intensity of tennis match play[J]. *Brit J Sports Med*, 40(5): 387-391.
- FERNANDEZ-FERNANDEZ J, SANZ-RIVAS D, MENDEZ-VILLANUEVA A, 2009. A review of the activity profile and physiological demands of tennis match play[J]. *Strength Cond J*, 31(4): 15-26.
- GALÉ-ANSODI C, CASTELLANO J, USABIAGA O, 2016. Effects of different surfaces in time-motion characteristics in youth elite tennis players[J]. *Int J Perform Anal Sport*, 16(3): 860-870.
- GALÉ-ANSODI C, CASTELLANO J, USABIAGA O, 2017a. More acceleration and less speed to assess physical demands in female young tennis players[J]. *Int J Perform Anal Sport*, 17(6): 872-884.
- GALÉ-ANSODI C, CASTELLANO J, USABIAGA O, 2017b. Physical profile of young tennis players in the tennis match-play using global positioning systems[J]. *J Physic Educ Sport*, 17(2): 826-832.
- GALÉ-ANSODI C, CASTELLANO J, USABIAGA O, 2018. Differences between running activity in tennis training and match-play[J]. *Int J Perform Anal Sport*, 18(5): 855-867.
- GALÉ-ANSODI C, CASTELLANO J, USABIAGA O, 2020. A new approach to assess the physical demands of young tennis players: Inertial movement analysis. Preliminary data[J]. *Annals of Rev Res*, 5(2): 555660.
- GOMES R V, COUTTS A J, VIVEIROS L, et al., 2011. Physiological demands of match-play in elite tennis: A case study[J]. *Euro J Sport Sci*, 11(2): 105-109.
- HOPPE M W, BAUMGART C, FREIWALD J, 2016. Do running activities of adolescent and adult tennis players differ during play?[J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 11(6): 793-801.
- HOPPE M W, HOTFIEL T, STUCKRADT A, et al., 2020. Effects of passive, active, and mixed playing strategies on external and internal loads in female tennis players[J]. *PLoS One*, 15(9): e0239463.
- HORNERY D J, FARROW D, MUJIK A, et al., 2007. An integrated physiological and performance profile of professional tennis[J]. *Brit J Sports Med*, 41(8): 531.
- JONES R N, GREIG M, MAWENE Y, et al., 2019. The influence of short-term fixture congestion on position specific match running performance and external loading patterns in English professional soccer[J]. *J Sports Sci*, 37(12): 1338-1346.
- KERR A, 2015. The physiological demands of tennis and how to train them: A case study of a sub elite female tennis player[J]. *J Australian Strength Cond*, 23(1): 25-37.
- KOLMAN N S, KRAMER T, ELFERINK-GEMSER M T, et al., 2019. Technical and tactical skills related to performance levels in tennis: A systematic review[J]. *J Sports Sci*, 37(1): 108-121.
- KOVACS, MARK S, 2004. Energy system-specific training for tennis[J]. *Strength Cond J*, 26(5): 10-13.
- LARA J P R, VIEIRA C L R, MISUTA M S, et al., 2018. Validation of a video-based system for automatic tracking of tennis players[J]. *Int J Perform Anal Sport*, 18(1): 137-150.
- LOPEZ-SAMANES A, DEL COSO J, HERNANDEZ-DAVO J L, et al., 2021. Acute effects of dynamic versus foam rolling warm-up strategies on physical performance in elite tennis players[J]. *Biol Sport*, 38(4): 595-601.
- MENDEZ-VILLANUEVA A, FERNANDEZ-FERNANDEZ J, BISHOP D, et al., 2007. Activity patterns, blood lactate concentrations and ratings of perceived exertion during a professional singles tennis tournament[J]. *Brit J Sports Med*, 41(5): 296-300.
- MENDEZ-VILLANUEVA A, FERNANDEZ-FERNANDEZ J, BISHOP D, et al., 2010. Ratings of perceived exertion-lactate association during actual singles tennis match play[J]. *J Strength Cond Res*, 24(1): 165-170.
- MITCHELL J B, COLE K J, GRANDJEAN P W, et al., 1992. The effect of a carbohydrate beverage on tennis performance and fluid balance during prolonged tennis play[J]. *J Strength Cond Res*, 6(3): 174-180.
- MONTGOMERY P, PYNE D, MINAHAN C, 2010. The physical and physiological demands of basketball training and competition[J]. *Int J Sport Physiol*, 5(1): 75-86.
- MURIAS J M, LANATTA D, ARCURI C R, et al., 2007. Metabolic

- and functional responses playing tennis on different surfaces[J]. *J Strength Cond Res*, 21(1): 112.
- OJALA T, HKKINEN K, 2013. Effects of the tennis tournament on players' physical performance, hormonal responses, muscle damage and recovery[J]. *J Sports Sci Med*, 12(2): 240-248.
- PAUL M, BISWAS S K, SHUKLA G, et al., 2011. Effect of agility training on tennis performance[J]. *J Med Sci Tennis*, 16(1): 21-25.
- PEREIRA T J, NAKAMURA F Y, DE JESUS M T, et al., 2017. Analysis of the distances covered and technical actions performed by professional tennis players during official matches[J]. *J Sports Sci*, 35(4): 361-368.
- PONZANO M, GOLLIN M, 2017. Movement analysis and metabolic profile of tennis match play: Comparison between hard courts and clay courts[J]. *Int J Perform Anal Sport*, 17(3): 220-231.
- REID M, DUFFIELD R, DAWSON B, et al., 2008. Quantification of the physiological and performance characteristics of on-court tennis drills[J]. *Brit J Sports Med*, 42(2): 146-151.
- RODRÍGUEZ D S, MIGUEL D, 2017. A study of intensity, fatigue and precision in two specific interval trainings in young tennis players: High-intensity interval training versus intermittent interval training[J]. *BMJ Open Sport Exerc Med*, 3(1): e000250.
- SMEKAL G, VON DUVILLARD S P, RIHACEK C, et al., 2001. A physiological profile of tennis match play[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 33(6): 999-1005.
- VERGAUWEN L, SPAEPEN A J, LEFEVRE J, et al., 1998. Evaluation of stroke performance in tennis[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 30(8): 1281-1288.

(收稿日期:2022-05-24; 修订日期:2023-02-27; 编辑:丁合)

