



内置三轴加速度计的智能鞋垫运用于足球运动训练的可行性

王 贝,赵德峰,赵海燕,侯 彬,陈贞祥,叶晶龙,王 晨*,任 雪

摘要:目的:通过检测智能鞋垫感知身体运动多个指标变化的准确性和有效性来探索其在足球运动训练中进行监测应用的可能性。方法:室内运动测试中,20 名女足运动员依次在椭圆机上运动(Climbing)或在跑步机上快走(Walking),或以 4 种不同速度跑步(Running1-4)10 min。受试者全程携带便携式心肺功能测试仪(IC),右髋处(GWaist)和左右脚踝处(GAnkleL,GAnkleR)佩戴 GT3X+,左臂佩戴 Sencewear Armband(SWA),左右鞋内放置智能鞋垫(PadL,PadR)分别测量热量消耗(CAL)、三维加速度(VA)、步数和速度。另有 11 名运动员参加室外球场训练测试,使用 GT3X+(GWaist)、SWA、PadR 和 PadL 分别测量 VA、步数、距离和 CAL。结果:室内测试结果显示所有受试者 GT3X、PadR 和 PadL 所测 VA 计算所得的向量的模(VM)间均显著高度相关($r=0.729\sim 0.997$)。Climbing 和 Running2-4 阶段,PadR+L、GWaist 和 GAnkleR+L 间步数高度相关并无显著差异性。Running1 阶段,当 GAnkleR+L 所测步数 ≤ 30 步/10 秒时,三者间无显著性差异;当 > 30 步/10 秒时,PadR+L 和 GWaist 均与 GAnkleR+L 差异 $> 10\%$ 。当比较 PadR+L 与 SWA 时,除了在 Walking 阶段,步数差异 $> 10\%$,其他阶段均无显著差异。PadR+L 所测 CAL 与 IC 或 SWA 高度相关但显著高估了 Walking 阶段和低估了其他阶段($P<0.001$);在 Running1 阶段,PadR+L 和 IC 或 SWA 间的差异小于 10% 。在室外场地训练测试中,GWaist 和 PadR 以及 PadL 所得 VM 间显著相关,但 PadR 和 PadL 显著高于 GWaist。GWaist、SWA 和 PadR+L 所测步数间显著相关,但 PadR+L 所测每 10 s 步数显著高于 GWaist,所测总步数显著高于 SWA。PadR+L 测得的运动总距离和 CAL 与 SWA 无显著性差异。结论:此款智能鞋垫便于足球运动员穿戴并进行长时间监测,提供的多种运动指标数据在一些特定运动状态中比较有效,尤其适用于监测室外场地运动。

关键词:三轴加速度;智能鞋垫;热量消耗

中图分类号:G804 文献标志码:A 文章编号:1006-1207(2023)03-0071-08

DOI:10.12064/ssr.2022051601

Validation of Shoe Pads Embedded with Tri-axial Accelerometer in Monitoring Soccer Training

WANG Bei, ZHAO Defeng, ZHAO Haiyan, HOU Bin, CHEN Zhenxiang, YE Jinglong, WANG Chen*, REN Xue

(Shanghai Research of Sports Science & Shanghai Anti-Doping Agency, Shanghai 200030, China)

Abstract: The aim was to validate a new type of shoe pads embedded with tri-axial accelerometer in estimating acceleration, steps and energy expenditure during stair climbing, walking, jogging and running, and its application in monitoring soccer training. Methods: A total of 20 female soccer players performed 10-min exercise on an elliptical trainer (Climbing) and walking (Walking) or running at four different speeds on treadmill (Running 1-4). Throughout the test, the players carried the portable indirect calorimetry (IC), wore GT3X+ on the right waist (GWAIST) and the both ankles (Ganklel, Gankler), and wore

收稿日期:2022-05-16

基金项目:上海市体育科技重点备战攻关项目(17J009)。

第一作者简介:王贝,女,博士,副研究员。主要研究方向:运动营养和生理学。E-mail:33453189@qq.com。

*通信作者简介:王晨,女,硕士,研究员。主要研究方向:运动医学。E-mail:wangchen7253@hotmail.com。

作者单位:上海体育科学研究所(上海市反兴奋剂中心),上海 200030。



Sencewear Armband (SWA) on the left arm, meanwhile placed the shoe pads (PadR, PadL) inside running shoes to measure CAL, VA, steps and speeds respectively. Another 11 players participated in the field training test, using GT3X+ (GWAIST), SWA, PadR, and PadL to measure VA, steps, distance and CAL, respectively. Results: The indoor testing data showed that the intra-individual correlations between vector magnitude (VM) calculated from VA measured by GT3X+, PadR and PadL were significantly high for all subjects ($r=0.729-0.997$, $\text{mean}=0.975\pm 0.004$). The step counts obtained by PadR+L, GWaist, and GAnkleR+L were highly correlated without significant differences during Climbing and Running2-4. During Running1, there were no significant differences among the three when steps assessed by GAnkleR+L were 30 steps/10s, while the differences between GAnkleR+L and PadR+L or GWaist were >10% when steps were >30 steps/10s. Steps between PadR+L and SWA were not significantly different in all trials except during Walking, where the difference was >10%. CAL assessed by PadR+L was highly correlated with CAL from IC or SWA, but PadR+L overestimated CAL during Walking and underestimated CAL during all other trials ($P<0.001$). During Running1, the differences between SWA and PadR+L or IC were <10%. During field training test, GWaist, PadR and PadL were significantly correlated in VM, but PadR and PadL was significantly higher than GWaist. Steps assessed by GWaist, SWA and PadR+L were significantly correlated, with PadR+L higher than GWaist in per 10 sec, and higher than SWA in total steps. Total distance and CAL measured by PadR+L were not significantly different from SWA. Conclusion: The shoe pads embedded with tri-axial accelerometer is easy to wear and appropriate for long time monitoring in soccer plays. It appears to measure physical activity at moderate intensities accurately, especially applicable for training monitoring in outdoor field.

Keywords: tri-axial accelerometer; shoe pads; energy expenditure

近年来,可穿戴式加速度计已被证明可成功识别身体活动状态并可能为目前最为成熟的技术^[1],主要原理在于加速度计可以通过测量人体三轴线性活动的加速度来得到身体活动状况,并通过测量相对地心引力的定位来估测身体姿势。虽然多个加速度计系统已被验证可高度精准地识别身体活动并可大体估算能量消耗,但是佩戴多个加速度计对于使用者来说负担较重且过于繁杂,市场上常见的识别身体运动的监测装置往往限定为单个的加速度计。佩戴在身上的单个加速度计虽然没有多个加速度计系统精准,但是方便携带且测量结果也在可接受范围内,然而,仍然有许多使用者感觉佩戴位置不舒适,因此存在有限的使用实用性。

大量研究发现识别身体运动的监测系统的有效性与其佩戴部位紧密相关(如胸部、腹部、髋部、大腿和脚踝),某些部位的佩戴更适合于测量特定活动^[2]。随着手腕佩戴式健身追踪器和智能手机的普及,手腕佩戴装置和智能手表近年来正日益流行,使用者无须过多指导就可使用。然而,要研发一款可成功识别人体大多数日常活动的、可佩戴在手腕上的监测装置仍存在很大挑战性,因为手腕处通常是身体活动最频繁的部分,跟身体其他部位(如躯干)相比存在更多不规则活动。近期有研究显示手腕部位携带的监测器对于身体活动的识别存在较大误差^[2]。另有研究显示监测器佩戴在左手手腕比惯用的右手手

腕更能有效识别身体活动,并且也优于佩戴于手肘和胸部,但是要次于佩戴在脚踝、膝关节和腰部的识别效果^[3]。Trost等^[2]和Ellis等^[4]研究发现髋部佩戴监测器的有效性略优于手腕处佩戴的模式。另有研究显示在检测静态行为时,佩带在髋部的监测器的有效性明显高于佩带在手腕处^[5]。Manini等^[6]的研究显示佩带在脚踝处的监测器可达到95%的精确度,而手腕处佩戴的仪器精确度为84.7%。另有研究显示监测器佩戴在大腿和脚踝部的有效性相近,分别为82%和83%,远远高于佩带在胸部的有效性(67%)。综合以上研究结果,佩戴在腰部以下(如脚踝、大腿、髋部和腰部)的三轴加速度监测器有效性最高,其次是手腕处佩戴,而胸部佩戴有效性最低。

美国研发的Sensewear Armband(SWA)是一种结合了生理和机械测量的新一代便携式三轴加速度能量消耗测试仪。研究报导SWA比单纯的心率和加速度法能更精确地测量人体活动的能量消耗^[7]。SWA主要佩带于左手手臂外侧,通过三轴加速度感应器,并结合其他3种感应器(皮肤温度、肤电反应和热传导),可全天检测佩戴者的能量消耗、运动时间和步数。研究证明SWA可以较可靠地测量普通人静止和低中强度运动中的能量消耗^[8]。笔者团队曾检测SWA应用于职业足球运动员在跑步机以不同速度奔跑时能量消耗测量的有效性^[9]。结果显示SWA在检测低于9 MET和高于11 MET能量代谢



当量强度的运动时消耗的热量误差渐增,但在测量 9~11 MET 代谢当量区间或 70% VO_{2max} 左右的运动强度时的热量消耗最为精确,此强度正与女足比赛中的强度相一致。但在室外场地上进行各指标监测的有效性目前尚无研究涉及,且在实际应用中,室外场地中的身体接触挤压有可能碰撞到手臂上佩戴的仪器,影响到运动员的动作发挥和仪器的正常运作。

近期国内市场首次出现了一款智能鞋垫,据称可通过内置的三轴加速度感应装置精确测定身体运动状态并估算能量消耗。然而目前并无国内外研究比较过置于脚底的三轴加速度计的有效性。根据国外前期的研究结果,脚踝和腰部佩戴监测器的有效性要高于其他部位,包括手腕和胸部^[1]。因此内置于鞋垫的三轴加速度计可能会如同佩戴在相近的脚踝部位具有较高的有效性,而鞋垫的设置更有利于运动员的接纳和长时间使用。如果证实这种内置于鞋

垫的三轴加速度计能有效监测身体运动并估测能量消耗,鞋垫的方便实用性会更有利于运动员在日常训练实时监测活动情况和能量消耗。因此,本研究欲在这一领域进行科学验证,使用鞋垫内的三轴加速度计与佩戴在身体其他不同部位(髌部、脚踝和手臂)的加速度计同时进行运动监控,检测内置于鞋垫的三轴加速度计提供的能量消耗和其他运动参数的准确性,为以跑动为主的运动员提供一种方便长时间穿戴但不影响其活动,且能较准确提供运动数据和能量消耗的监测设备。

1 研究对象和方法

1.1 研究对象

受试者全部来自上海职业女子足球队,20 名运动员分别进行室内运动测试和 11 名进行室外球场测试,基本信息见表 1。

表 1 研究对象基本情况($\bar{X}\pm SD$)

Table 1 Characteristics of study population ($\bar{X}\pm SD$)

测试环境	受试人数 / 人	年龄 / 岁	身高 / cm	体重 / kg	BMI/($kg\cdot m^{-2}$)
室内	20	17.4 \pm 0.2	166.2 \pm 1.2	57.8 \pm 1.2	20.9 \pm 0.3
室外	11	21.3 \pm 1.2	168.8 \pm 1.2	61.7 \pm 1.1	21.7 \pm 0.4

所有受试者的身高均由同一实验人员使用身高测量标尺统一进行 2 次光脚测量,取平均数,空腹状态下使用 Inbody720 (Biospace Co. Ltd., 韩国)测量体重并计算身体质量指数(BMI),所有测量精确到 0.1。

1.2 研究方法

将内置三轴加速度计的智能鞋垫同佩戴于其他身体不同位置的 Actigraph GT3X+ (LLC, USA) (右髌和左右脚踝)和 SWA (左手上臂)进行在不同运动状态下(走路、慢跑、快跑、登山跑、室外模拟足球比赛)感应身体运动多个指标变化的有效性比较。以便携式心肺功能测试仪 (Cosmed K4b2, 意大利)所测数据 (IC) 为参考标准,比较智能鞋垫在室内不同运动状态下测量的热量消耗率的准确性。SWA 作为目前文献中推荐较为精确的穿戴式能量消耗测试仪^[7],将使用其作为智能鞋垫测试场地训练能量消耗的标准对照。所使用 SWA 的型号为 MF-SW,软件版本为 8.1。

空腹和无体育运动至少 2 h 后,受试运动员直立静止休息 5 min,使用 Polar 心率表 (RS400, 芬兰)测得最低心率记录为安静直立心率并全程监控受试者的心率。随后,受试运动员分别依次在椭圆机上以 9.6 km/h 的速度运动 (Climbing)、在跑步机上以 3.2 km/h 的速度快走 (Walking) 或以 4 种不同速

度跑步 (Running1-4, 6.4 km/h, 9.6 km/h, 11.2 km/h, 12.8 km/h) 10 min。每完成 1 次 10 min 的运动,运动员被要求充分放松休息直至心率恢复到安静直立心率 ± 10 次/分钟范围内。运动时,受试者全程携带 IC,测试每次不同运动强度的热量消耗率,测试前氧气和二氧化碳分析仪以及气流涡轮均根据厂家说明书进行校准,详细过程见 Crouter 等^[10]。同时在右髌处 (GWaist) 和左右脚踝处 (GAnkleL, GAnkleR) 佩戴 GT3X+ 测量三维加速度 (VA) 和步数,左臂佩戴 SWA 测量步数、速度和热量消耗 (CAL)。受试者所穿运动鞋内放置智能鞋垫 (PadR, PadL) 测量 VA、步数、速度和 CAL,所测速度和 CAL 由鞋垫配套软件自带的室内模式算法所得。

除了在跑步机上 Running4 阶段以 12.8 km/h 速度运动时,因每个受试者可持续时间长短不一,其他运动阶段均取中间稳定状态 8 min 时间的数据进行统计比较。VA 的平方和开方得到向量的模 (VM) 用于不同设备间所测加速度的比较,即 $VM = \sqrt{ax^2 + ay^2 + az^2}$,其中 ax 、 ay 、 az 为三轴加速度。

在室外球场训练中,选择至少 20 min 连续对抗时间模拟比赛状态进行测试,由于运动环境限制,身体碰撞经常发生,所测运动员仅在右髌处 (GWaist) 佩戴 GT3X+ 测量 VA 和步数,左臂佩戴 SWA 测量



步数、距离和 CAL, 所穿运动鞋内放置智能鞋垫 (PadR, PadL) 测量 VA、步数、距离和 CAL。PadR 和 PadL 在室外环境采用室外模式利用 GPS 计算活动距离和 CAL。

1.3 统计方法

智能鞋垫所测 VA、步数和 CAL 与 GTX3+ 和 IC 所测数据进行比较时, 均使用每 10 s 间歇收集的数据。智能鞋垫所测步数、速度、距离和 CAL 与 SWA 所测数据进行比较时, 均使用每个受试者不同状态连续运动时间内所得总数据。所有数据采用 SPSS25.0 进行分析。连续变量符合正态分布的用 $\bar{X} \pm SD$ 表示; 2 种以上不同仪器所测数据间的比较采用双因素重复测试方差分析 (two-factor repeated measures ANOVA)。2 种仪器所测数据间的比较采用配对 T 检验。所有统计方法显著性水平均选取双侧 0.001。

2 研究结果

2.1 室内测试结果

2.1.1 三维加速度测量比较结果

由于在水平步行或跑步运动中, 垂直和前进 2 个

表 2 使用 GT3X+ 和智能鞋垫在室内不同运动阶段所测三维加速度计算所得 VM ($\bar{X} \pm SD$)

Table 2 VM calculated from 3-axial acceleration measured by GT3X+ and Pads during different indoor exercise trials ($\bar{X} \pm SD$)

运动方式	PadR	PadL	GWaist	GAnkleR	GAnkleL
Climbing	1 333±3	1 225±5	1 056±0*	1 245±1*#	1 256±1*#
Walking	1 539±3	1 458±6	1 052±0*	1 244±1*#	1 234±1*#
Running1	2 185±17	2 137±18	1 152±2*	1 671±3*#	1 676±2*#
Running2	3 106±5	3 053±12	1 319±2*	2 127±3*#	2 112±3*#
Running3	3 590±7	3 524±15	1 392±3*	2 425±4*#	2 384±3*#
Running4	4 053±17	4 004±31	1 471±4*	2 716±8*#	2 634±8*#

注: * 表示与 PadR 和 PadL 所测值间存在显著差异, $P < 0.001$; # 表示与 GWaist 所测值间存在显著差异, $P < 0.001$ 。

2.1.2 步数测量比较结果

在使用 GT3X+ 和智能鞋垫所测步数的比较分析中, Climbing 和 Running2-4 阶段, PadR+L、GWaist 和 GAnkleR+L 间高度相关并无显著性差异 (表 3)。Running1 阶段, PadR+L 和 GWaist 间无显著不同, 但两者均与 GAnkleR+L 差异大于 10% 并呈现显著性差异。如果将 Running1 阶段 GAnkleR+L 所测的步数以 30 步 / 10 秒的速度为界分别进行分析, 当 GAnkleR+L 所测的步数 ≤ 30 步 / 10 秒时 (Running1◆), PadR+L、GWaist 和 GAnkleR+L 间无显著差异性; 但当 GAnkleR+L 所测的步数 > 30 步 / 10 秒时 (Running1◆◆), 与 Walking 阶段结果相一致, PadR+L 和 GWaist 间无

加速度会呈现周期性变化, 在收脚时, 重心向上单只脚触地, 垂直方向加速度是呈正向增加的趋势, 之后继续向前, 重心下移两脚触地, 加速度相反; 而水平加速度在收脚时减小, 在迈步时增加。当在球场上时, 运动员不时需要侧边快速移动, 矢状轴加速度变化情况同于水平加速度。由于不同部位佩戴的 GT3X+ 和智能鞋垫内置的三轴加速度计的加速度方向较难达成一致, 同时 3 个加速度计算所得的 VM 是用于识别身体运动和预测摔倒状态的主要指标, 故本研究采用 VM 进行不同三轴加速度测试仪器数据间的比较。

在室内椭圆机和跑步机测试中, 使用 GT3X+ 和智能鞋垫所测三维加速度间的相关性分析以 VM 进行统计分析结果显示, 所有受试者 2 种设备所得 VM 数据间均呈显著高度相关 ($r=0.729 \sim 0.997$)。然而, 在所有运动方式测试中, PadR 和 PadL 的 VM 显著高于 GT3X+, 同时 GAnkleR 和 GAnkleL 的 VM 显著高于 GWaist (表 2)。随着运动方式由登山转化为快走到速度渐增的跑步, PadR 和 PadL 逐步增加, 其增加程度明显高于髋部和脚踝处 GT3X+ 的 VM。因此, PadR 和 PadL 的 VM 与 GT3X+ 的差异性也随着运动方式的改变和速度的提高而逐步增大。

显著不同, 但两者均与 GAnkleR+L 差异 $> 10\%$ 并呈现显著性差异, GAnkleR+L 的值约为 PadR+L 和 GWaist 所测值的 2 倍。当将智能鞋垫与 SWA 所测步数进行比较时, 除了在 Walking 阶段, 两者所测步数差异大于 10% 并呈现显著性差异, 其他运动阶段均无显著差异。

2.1.3 速度测量的比较结果

与椭圆机或跑步机自身设定的速度相比, SWA 所测速度在 Climbing、Walking 和 Running1 阶段显著不同, 而 Running2-4 阶段无显著差异性; 智能鞋垫所测速度除 Running2 阶段差异性 $< 10\%$, 其他阶段均存在显著差异 (表 4)。



表 3 使用 GT3X+、智能鞋垫和 SWA 在室内不同运动阶段所测步数 ($\bar{X}\pm SD$)

Table3 Steps measured by GT3X+, Pads and SWA during different indoor exercise trials($\bar{X}\pm SD$)

运动方式	PadR+L/(步·10 秒 ⁻¹)	GWaist/(步·10 秒 ⁻¹)	GAnkleR+L/(步·10 秒 ⁻¹)	PadR+L/步	SWA/步
Climbing	20.47±0.04	20.57±0.25	20.61±0.03	995.90±6.17	983.95±5.06
Walking	16.41±0.04	13.00±0.11	33.06±0.06 [#]	797.05±9.21	713.85±26.61 ⁺
Running1	25.37±0.10	25.64±0.10	31.33±0.24 [#]	1232.84±30.98	1224.32±32.92
Running2	27.81±0.05	28.04±0.04	28.09±0.04	1351.30±12.73	1342.95±11.64
Running3	28.48±0.05	28.72±0.04	28.76±0.05	1357.45±29.90	1348.75±28.72
Running4	29.03±0.07	29.26±0.07	29.32±0.07	846.25±104.12	822.56±105.13
Running1◆	26.85±0.06	27.15±0.05	27.24±0.08		
Running1◆◆	21.25±0.08	21.40±0.07	42.78±0.14 [#]		

注: * 表示与 PadR 和 PadLL 所测值间存在显著差异, $P < 0.001$; # 表示与 GWaist 所测值间存在显著差异, $P < 0.001$; Running1◆ 为步数 ≤ 30 步 / 10 秒; Running1◆◆ 为步数 > 30 步 / 10 秒。

表 4 使用智能鞋垫和 SWA 在室内不同设定速度运动阶段所测速度 ($\bar{X}\pm SD$)

Table4 Speeds measured by Pads and SWA during different indoor exercise trials($\bar{X}\pm SD$)

运动方式	设定速度 / (m·s ⁻¹)	PadR+L/(m·s ⁻¹)	SWA/(m·s ⁻¹)
Climbing	2.666 7	1.614 8±0.022 5 ⁺	1.549 0±0.077 7 ⁺
Walking	0.888 9	1.214 9±0.011 3 ⁺	1.260 4±0.018 4 ⁺
Running1	1.777 8	2.207 9±0.087 2 ⁺	2.225 9±0.069 5 ⁺
Running2	2.666 7	2.527 8±0.019 9	2.729 2±0.045 1
Running3	3.111 1	2.587 4±0.023 5 ⁺	2.931 2±0.053 5
Running4	3.555 6	2.585 9±0.056 3 ⁺	3.043 4±0.150 8

注: * 表示与设定速度间存在显著差异, $P < 0.001$ 。

2.1.4 CAL 测量比较结果

CAL 测定使用 IC 作为标准对照。分析结果显示 PadR+L 所测 CAL 与 IC 高度相关(表 5), 但显著高估了 Walking 阶段和低估了 Climbing 以及 4 个不同速度 Running 阶段的 CAL ($P < 0.001$)。在 Running1 阶段, PadR+L 和 IC 测量值间的差异 $< 10\%$ 。SWA 显著低估了 Climbing 和 Running3-4 阶段的总能量消

耗值, 但是在 Walking 和 Running1-2 阶段, SWA 与 IC 所测总值间无显著不同, 差异均在 10% 以内。PadR+L 和 SWA 两者进行比较, PadR+L 显著高估了 Walking 阶段的总能量消耗值和低估了其他 5 个阶段的总能量消耗值 ($P < 0.001$)。在 Running1 阶段, PadR+L 和 SWA 测量值间的差异小于 10% 。

表 5 使用 PadR+L、IC 和 SWA 在室内不同运动阶段所测 CAL ($\bar{X}\pm SD$)

Table5 CAL measured by Pads, IC and SWA during different indoor exercise trials ($\bar{X}\pm SD$)

运动方式	PadR+L/(kcal·10 s ⁻¹)	IC/(kcal·10 s ⁻¹)	PadR+L/kcal	IC/kcal	SWA/kcal
Climbing	0.958±0.005 1 ⁺	1.504±0.005 5	46.59±1.36 [#]	72.23±1.59	52.94±1.51 ⁺
Walking	0.720±0.003 3 ⁺	0.602±0.004 4	34.97±0.81 [#]	28.90±1.20	30.45±0.93
Running1	1.302±0.008 6 ⁺	1.432±0.008 0	63.29±2.77 [#]	66.38±3.32	69.73±3.23
Running2	1.493±0.005 6 ⁺	1.956±0.009 6	72.75±1.65 [#]	93.86±2.55	86.18±2.32
Running3	1.529±0.006 1 ⁺	2.206±0.009 2	73.06±2.26 [#]	103.84±3.29	87.37±2.99 ⁺
Running4	1.596±0.007 3 ⁺	2.382±0.012 7	46.56±5.81 [#]	68.22±8.01	53.34±7.18 ⁺

注: * 表示与 IC 所测对应值间存在显著差异, $P < 0.001$; # 表示与 SWA 所测对应值间存在显著差异, $P < 0.001$ 。

2.2 室外球场训练结果

由于足球运动中身体碰撞较频繁, 脚踝处不便佩戴仪器, 因此只在右髌处佩戴了 GT3X+ (GWaist)。使用 GWaist、PadR 和 PadL 所测三维加速度计算所得的 VM 数据间显著相关 ($P < 0.001$), 但

PadR 和 PadL 显著高于 GWaist ($P < 0.001$)。这与室内运动测试结果相一致。在使用 GWaist、SWA 和 PadR+L 所测步数中, 三者间显著相关 ($P < 0.001$), 但 PadR+L 所测每 10 s 步数显著高于 GWaist, 所测总步数显著高于 SWA, 而 GWaist 和 SWA 间无显著



差异。室外场地测试中,智能鞋垫采用室外 GPS 模式,PadR+L 测得的运动总距离和热量总消耗与 SWA 所测值间无显著性差异($P=0.972$)。

3 分析与讨论

大量研究发现使用单加速度计识别身体运动的有效性与佩戴部位紧密相关。Trost 等^[12]研究发现髌部佩戴 GT3X+ 的有效性略优于手腕处佩戴的模式,精确度分别为 91% 和 88%。Ellis 等^[14]也发现髌部和手腕部佩戴 GT3X+ 的数据精确度分别为 92% 和 88%。Manini 等^[6]的研究显示佩带在脚踝处的三轴加速度计 Wocker 的精确度达到 95% 的,而手腕处佩戴的 Wocker 精确度为 84.7%。Manini 等^[12]在测试 Wocker 识别儿童身体运动的精确度时发现,佩戴在脚踝处的精确度为 92.4%,佩戴在手腕处为 91%。以上研究结果综合显示手腕处佩戴监测器的有效性低于脚踝和髌部,而脚踝略高于髌部,但这些研究都是测试加速度计识别静态或低强度运动状态下的身体运动^[5,12-14]。本研究结果中,随着跑步速度的显著增加,GAnkleR+L 的 VM 也显著增加,GWaist 增加缓慢,而 PadR+L 增加的幅度明显大于 GAnkleR+L,推测在中高强度运动状态下(>8 km/h),内置三轴加速度计的鞋垫可能比佩戴在其他部位的加速度计对于身体移动更加敏感。但由于没有其他标准测量仪器数据作为参照,不能确定智能鞋垫测量三轴加速度的敏感度和有效性高于还是低于 GAnkleR+L,因此还需进一步测定比较智能鞋垫和 GT3X+ 识别不同身体运动的精确度和有效性。

研究发现腰间佩戴 GT3X+ 测定受试者在跑步机上以不同速度(8~16 km/h)慢跑或快跑时的步数精确度很高,绝对错误百分比 $\leq 1\%$ ^[5]。Tudor-Locke 等^[13]也报道髌部佩戴 GT3X+ 可较准确测量 0.84~11.28 km/h 速度运动的步数。而 Feito 等^[14]和 Lee 等^[15]发现在低速行走时 GT3X+ 测量步数的准确率较低,当速度逐步增加时准确率也增加。但目前尚未找到国内外对脚踝处佩戴 GT3X+ 测量步数有效性进行评估的相关文献。本研究发现 Running2-4 阶段,PadR+L、GWaist 和 GAnkleR+L 间高度相关并无显著性差异,这些是 GT3X+ 佩戴在髌部时测量步数准确率较高的运动速度,因此智能鞋垫在这些速度范围也能较准确地测量步数。而在 Walking 和 Running1 阶段,佩戴在髌部的 GT3X+ 测量步数的有效性可能较低,本研究结果也显示在这 2 个阶段当 GAnkleR+L 所测的步数 >30 步/10 秒时,PadR+L 和 GWaist 间无显著不同,但两者均与 GAnkleR+L 差异 $>10\%$,并呈现

显著性差异,GAnkleR+L 约为 PadR+L 或 GWaist 所测值的两倍;而当 GAnkleR+L 所测的步数 ≤ 30 步/10 秒时,PadR+L、GWaist 和 GAnkleR+L 间无显著性差异。原因可能在于当步数 >30 步/10 秒时,在同样速度下,受试者步数 ≤ 30 步/10 秒时的步伐,转胯幅度不明显,从而影响了 GWaist 和 GAnkles 测量步数的一致性。因此不同研究中对于 GT3X+ 佩戴在髌部测量低速运动时步数有效性的评估结果不一样,可能在于实验方法上的不一致,包括自我选择的慢跑或走路速度与步伐大小。但智能鞋垫测量步数的有效性跟 GWaist 更接近,而不是 GAnkleR+L,具体原因尚不清楚,需要进一步确认和解释。

有研究评估了 SWA 测量步行运动时步数的有效性,Storm 等^[16]和 Lee 等^[17]研究结果显示 SWA 会显著低估步行时的步数,这与本研究结果一致。数据显示 Walking 运动阶段,SWA 测量的步数显著低于 PadR+L,而 PadR+L 显著低于有效性比较高的 GAnkleR+L,所以在这个运动状态下,测量步数的有效性从高到低的顺序为:GAnkleR+L $>$ GWaist/PadR+L $>$ SWA。但目前国内外几乎没有关于评估 SWA 在跑步阶段测量步数有效性的文献数据。研究数据显示,除了 Walking 阶段,SWA 和 PadR+L 在其他运动阶段测定的步数无显著差异,间接显示 SWA 在 Running1 阶段测定的步数显著小于 GAnkleR+L,但能较准确测量 Running2-4 阶段的步数。

目前国内外尚无关于评估 SWA 测量速度有效性的文献数据,因此本研究结果首次验证了 SWA 可有效测量高强度跑步运动时(速度 ≥ 9.6 km/h)的速度,但不适用于慢速跑、步行和爬山运动时的速度测量。而智能鞋垫只可有效测量中等强度时的速度(9.6 km/h)。在 Climbing 阶段,PadR+L、SWA、GWaist 和 GAnkleR+L 所测的步数间均无显著性差异,显示这几种测定方式都适用于测定 Climbing 的步数。

本研究关于 SWA 测量 CAL 准确性的结果跟之前的研究结果基本一致^[9]。在之前的研究中,笔者团队检测了 SWA 应用于 9 名职业女足运动员在跑步机上以不同强度奔跑时 CAL 测量的有效性。结果显示每个受试者的 SWA 和 IC 的每分钟数据显著相关。在 70% VO_{2max} (相对应的平均速度为 9.31 km/h,代谢当量为 10 MET) 强度运动时,SWA 和 IC 的每分钟数据无显著性差异,相当于本研究中的 Running2。而在 79% VO_{2max} 和 87% VO_{2max} 时(相对应的平均速度分别为 11.76 km/ 和 12.18 km/h,代谢当量分别为 11.5 MET 和 13 MET),SWA 显著低估了 CAL,相当于本研究中 Running3-4。SWA 在 10 MET 代谢



当量附近监测 CAL 最为准确,而此强度也是职业女足比赛时的常见强度。因此,认为 SWA 可有效应用于女足运动员在比赛中的 CAL 测定。这也是本研究选择 SWA 作为场地足球训练中能量代谢测量参照仪器的原因之一。除此之外, Lee 等^[7]比较了 8 种市面上可售的能量消耗测试仪,包括 BodyMedia FIT armband、加速度计 Actigraph、DirectLife、the Fitbit One、the Fitbit Zip、the Jawbone Up、Nike Fuel Band 和 Basis B1 Band, 其中的 BodyMedia FIT armband 是与 SWA 同系列热量消耗测试仪的基础型号。研究显示使用这 8 种测试仪测量多种不同类型运动中的 CAL 时,包括久坐、不同速度行走、跑步机上慢跑和中到高强度的各种运动(上下阶梯、健身车、椭圆机、Wii 网球练习和篮球), BodyMedia FIT armband 的误差评定为 9.3%, 是 8 种仪器中误差最小的。而专业版 SWA 的精确性比基础版更高, 因此更加具有可靠性。

跟之前研究不同的是, 本研究结果显示在 Walking 和 Running1 阶段 SWA 与 IC 所测值间无显著不同, Walking 阶段速度为 3.2 km/h, Running1 阶段速度为 6.4 km/h。但之前研究结果显示在 56% VO_{2max} (相对应的平均速度为 8.44 km/h, 代谢当量为 8.2 MET) 时, SWA 显著高估了 13.89% 的 CAL, 并且与 Fruin 等^[8]的发现相一致。他们曾提出 SWA 在跑步机上测量快步行走(速度为 4.8 km/h 和 6.4 km/h) 的 CAL 时显著高估了 13%~27%。King 等^[9]发现 SWA 不仅高估在跑步机上行走时(速度为 3.2 km/h, 4.8 km/h 和 6.4 km/h) 的 CAL, 而且还会高估奔跑速度分别为 8.0 km/h 和 9.7 km/h 时的 CAL。不同的数据分析结果可能是由于实验所使用的 SWA 内置的专业研究软件版本不同而造成的。Fruin 和 King 等的研究中 SWA 所使用的软件版本为 5.1 或更早, SWA 显著高估快步行走或跑步时的 CAL。而 Drenowatz 等^[20]使用 6.1 版本的软件发现 SWA 显著低估了代谢当量 > 10 MET 时的 CAL。笔者团队之前的研究曾使用 6.1 版本, 发现 SWA 显著高估慢跑时的 CAL 但低估快速跑时的 CAL。而本研究使用的是最新的 8.1 版本, 结果显示在低强度运动阶段 SWA 与 IC 所测值间无显著不同, 因此 SWA 测量 CAL 的有效区间进一步增加, 也进一步提高了使用 SWA 测量足球训练比赛中的能量消耗的有效性和作为参考对照值的可靠性。

本研究使用 PadR+L 测量 CAL 所得的数据和 IC 或者 SWA 相比结果趋势一致, PadR+L 显著高估了 Walking 阶段的能量消耗率和低估了其他 5 个阶

段的能量代谢率。但在 Running1 阶段, PadR+L 和 IC 或 SWA 测量值间的差异小于 10%。说明此智能鞋垫可以有效用于测量较低速度(6.4 km/h)跑步时的 CAL。

尚缺乏国内外对于评估 Actigraph 和 Armband 在足球运动场上应用有效性的文献, 目前无法确定此智能鞋垫是否比 Actigraph 或 Armband 更能有效进行场外测试。但考虑到在实际足球动作中脚部的动作变化频繁, 髋部和上肢的动作并非总是与脚部同步一致, 因此, PadR+L 所得的 VM 和步数有可能会显著高于 GWaist 和 SWA 所得相应数据, 本研究数据与此推测相符, 但仍需进一步的研究验证。

场地测试中, 智能鞋垫采用室外 GPS 模式, PadR+L 测得的运动总距离和热量总消耗与 SWA 所测值间无显著性差异。笔者团队的前期研究^[9]和此次室内的运动测试均验证 SWA 能有效测量足球训练比赛中的 CAL, 因此采用 GPS 模式的智能鞋垫也可有效应用于足球场上的 CAL 测试中。但国内外尚无文献证明 SWA 可有效测定足球场上的运动总距离, 本研究数据虽说明 PadR+L 的数据和 SWA 无显著差异, 但是否准确有效仍需进一步研究验证。

4 结论

本研究尝试通过检测内置三轴加速度计的智能鞋垫对于感知运动员身体运动并提供能量消耗情况的准确性和有效性, 来探索该智能鞋垫在监测职业运动员运动状态的可能性。室内运动测试结果显示在中高强度运动状态下(> 8 km/h), 内置三轴加速度计的鞋垫可能比佩戴在其他部位的加速度计对于身体移动更加敏感。智能鞋垫在登山或中高强度跑步状态下可较准确测量步数, 但在快走和慢跑时步数测量有效性较低。除此之外, 智能鞋垫可较有效测量中等强度跑步(9.6 km/h)和慢跑(6.4 km/h)时的 CAL。

在室外场地训练中, 智能鞋垫所得的 VM 和步数虽显著高于 GT3X+ 和 SWA 所测数据, 但可能更能有效反映球场上的动作变化。当智能鞋垫采用室外 GPS 模式时, 智能鞋垫可较准确测量 CAL, 但其测量的运动总距离还需进一步使用其他 GPS 测量仪器进行有效性验证。

总的来说, 此款内置三轴加速度计的智能鞋垫便于穿戴和长时间监测, 提供的多种运动指标数据在一些特定运动状态中比较有效, 尤其适用于室外场地运动的监测, 易于被不同项目运动员接纳和使用。但不同运动项目有不同的运动模式和动作特点,



此智能鞋垫是否适用于其他运动项目还需进一步专项测试来验证。

参考文献:

- [1] CLELAND I, KIKHIA B, NUGENT C, et al. Optimal placement of accelerometers for the detection of everyday activities[J]. *Sensors(Basel)*, 2013, 13(7):9183 -9200.
- [2] TROST S G, ZHENG Y, WONG W K, Machine learning for activity recognition: Hip versus wrist data [J]. *Physiological Measurement*, 2014, 35(11):2183-2189.
- [3] GJORESKI M, GJORESKI H, LUŠTREK M, et al. How accurately can your wrist device recognize daily activities and detect falls?[J].*Sensors (Basel)*, 2016, 16(6): 800.
- [4] ELLIS K, KERR J, GODBOLE S, et al. A random forest classifier for the prediction of energy expenditure and type of physical activity from wrist and hip accelerometers[J]. *Physiological Measurement*, 2014, 35(11): 2191-2203.
- [5] JONES D, CROSSLEY K, DASCOSBE B, et al. Validity and reliability of the fitbit flex and actigraph gt3x+ at jogging and running speeds[J]. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 2018, 13(5):860-870.
- [6] MANNINI A, INTILLE S S, ROSENBERGER M, et al. Activity recognition using a single accelerometer placed at the wrist or ankle[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2013, 45(11):2193-2203.
- [7] LEE J M, KIM Y, WELK G J, Validity of consumer-based physical activity monitors[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2014, 46(9):1840-1848.
- [8] ST-ONGE M, MIGNAULT D, ALLISON D B, et al. Evaluation of a portable device to measure daily energy expenditure in free-living adults[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2007, 85(3):742-749.
- [9] 王贝, 赵德峰, 赵海燕, 等. 便携式能量消耗测试仪 SenseWear Armband 估测职业女子足球运动员运动能量消耗的有效性[J].*中国运动医学杂志*,2017,36(3): 243-247.
- [10] CROUTER S E, ANTCZAK A, HUDAK J R, et al. Accuracy and reliability of the ParvoMedics TrueOne 2400 and MedGraphics VO₂000 metabolic systems [J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2006, 98(2): 139-151.
- [11] YILDIRIR A, TOKGOZOGLU S L, ODUNCU T, et al. Soy protein diet significantly improves endothelial function and lipid parameters[J]. *Clinical Cardiology*, 2001, 24(11):711-716.
- [12] MANNINI A, INTILLE S S, ROSENBERGER M, et al. Activity recognition in youth using single accelerometer placed at wrist or ankle[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2013, 45(11):2193-2203.
- [13] CATRINE T L, BARREIRA T V, SCHUNA J M. Comparison of step outputs for waist and wrist accelerometer attachment sites[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2015, 47(4):839-842.
- [14] YURI F, BASSETT D R, THOMPSON D L. Evaluation of activity monitors in controlled and free-living environments[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2012, 44(4):733-741.
- [15] LEE J A, WILLIAMS S M, BROWN D D, et al. Concurrent validation of the Actigraph gt3x+, Polar Active accelerometer, Omron HJ-720 and Yamax Digiwalker SW-701 pedometer step counts in lab-based and free-living settings[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2015, 33(10): 991-1000.
- [16] STORM F A, HELLER B W, CLAUDIA M. Step detection and activity recognition accuracy of seven physical activity monitors[J]. *PLoS One*, 2015, 10(3):e0118723.
- [17] LEE J A, LAURSON K R. Validity of the SenseWear Armband step count measure during controlled and free-living conditions[J]. *Journal of Exercise Science and Fitness*, 2015, 13(1):16-23.
- [18] FRUIN M L, RANKIN J W. Validity of a multi-sensor armband in estimating rest and exercise energy expenditure[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2004, 36(6):1063-1069.
- [19] KING G A, TORRES N, POTTER C, et al. Comparison of activity monitors to estimate energy cost of treadmill exercise [J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2004, 36(7):1244-1251.
- [20] CLEMENS D, EISENMANN J C. Validation of the SenseWear Armband at high intensity exercise[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2011, 111(5):883-887.

(责任编辑:刘畅)