

文章编号:1004-7220(2017)06-0541-07

女性穿着运动文胸与未着文胸状态下步态特征的差异性

李上校¹, 任景萍², 周兴龙¹, 刘卉¹

(1. 北京体育大学 运动人体科学学院, 北京 100084; 2. 首都体育学院 运动科学与健康学院, 北京 100191)

摘要: **目的** 比较女性穿着运动文胸和未着文胸行走时步态特征和步行稳定性的差异, 为运动文胸的设计和评价提供依据。 **方法** 使用 Qualisys 红外光点运动捕捉系统采集 12 名 C 罩杯乳房大小女性分别穿着运动文胸及未着文胸状态下在跑步机上行走(6 km/h)的运动学参数。 **结果** 相比未着文胸状态, 穿着运动文胸时上躯干角最大值及最小值显著减小, 躯干屈曲角和躯干扭转角的幅度较小; 10 个步态周期的髋关节屈曲角幅度的标准差显著小于裸胸状态, 乳房不同支撑状态对步频无显著影响。 **结论** 不同乳房支撑状态显著影响上躯干角度、躯干扭转角与躯干屈曲角。裸胸状态行走时躯干运动幅度增大, 行走稳定性下降。不同乳房支撑状态下行走步频存在个体差异。

关键词: 乳房; 躯干; 步态; 行走稳定性

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2017.06.010

Differences in gait characteristics of women walking with and without sports bra

LI Shang-xiao¹, REN Jing-ping², ZHOU Xing-long¹, LIU Hui¹ (1. *Sport Science College, Beijing Sport University, Beijing 100084, China*; 2. *School of Kinesiology and Health, Capital University of Physical Education and Sports, Beijing 100191, China*)

Abstract: Objective To compare the differences in gait characteristics and stability of women walking with or without sports bra. **Methods** Twelve women with C cup breast were required to walk on the treadmill (at the speed of 6 km/h) with and without sports bras, respectively. Their gait parameters were collected by using Qualisys Track Manager high-speed infrared motion capture system. **Results** Compared with the bare-breasted condition, the maximum and minimum angles of the upper trunk were significantly smaller when subjects wearing the sports bra, the range of trunk flexion angles and trunk torsion angles were also relatively smaller, and the standard deviation of hip flexion angles during 10 gait cycles was obviously smaller. However, no differences were found in stride frequency between two breast support conditions. **Conclusions** Different breast support conditions have a significant influence on the upper trunk angle, trunk flexion angle and trunk torsion angle. Walking without bra will increase the range of trunk angle and deteriorate the walking stability. The stride frequencies under different breast support conditions have individual differences.

Key words: Breast; Trunk; Gait parameters; Walking stability

收稿日期:2017-02-19; 修回日期:2017-04-26

基金项目:北京市教育委员会科技计划一般项目(SQKM201610029002)。

通信作者:刘卉,教授,博士研究生导师,E-mail: liuhuibupe@163.com。

运动文胸是女性在运动时穿着的专门内衣,通过限制乳房的移动以保护乳房免受震荡的影响,降低乳房肌肉与韧带等组织损伤的风险。目前研究已证实,运动文胸限制乳房位移的作用相对日常文胸更加有效^[1-3];穿着运动文胸可减少乳房疼痛^[4-5];女性在运动时应穿着运动文胸,尤其是乳房较大的女性需要运动文胸提供更多的支撑^[6]。

人体是一个复杂、统一的有机体,各器官系统间相互联系相互影响,运动过程中乳房状态的改变可能会对人體动作产生影响。研究发现,运动文胸的支撑强度会影响穿着舒适性,从而进一步影响身体的动作特征^[6]。乳房的支撑状态可能会改变女性的跑步姿势^[7],乳房支撑不够时,女性可能通过改变动作模式以减少乳房的运动^[8]。目前关于乳房运动对身体姿态影响的研究还鲜有报道,仅有一些针对乳房不同支撑状态对步频影响的研究,但结论也并不一致。闫颖等^[9]研究发现,穿着运动文胸跑步与行走的步频明显低于未着文胸状态。Boschma等^[10]研究表明,随着乳房支撑强度增加,步频下降。而 Shivitz 等^[11]研究发现,随着乳房支撑的增加,女性跑步的步频并没有一致的规律。

步行稳定性是指人体步行平衡受到干扰后趋近或返回到初始平衡状态的能力^[12],它的维持涉及肢体各关节和肌肉的协同运动,同时与躯干的姿势有关^[13]。可以通过步态时空参数的变异性水平来评价步行稳定性,如计算多个步态周期的步长、步频和肢体关节角度的标准差、变异系数等指标^[14]。正常情况下,人体在步行状态中通过姿势的不断改变与肢体动作微调来满足身体在行走过程中的动态稳定性^[15]。当行走个体的内部因素(肢体行走功能)和外部因素(温度、地面等环境)发生改变时,行走个体可能会产生步态失稳现象。

穿着运动文胸行走时会改变个体的运动状态,故可能会影响步态特征及步行稳定性。因此,本文通过比较女性穿着运动文胸和裸胸状态行走时身体姿态特征和步行稳定性的差异,探讨穿着运动文胸对女性步行姿态的影响。研究结果有助于降低女性运动时可能的损伤风险,为运动文胸设计和评价提供依据,帮助女性选择合适的运动文胸。

1 研究方法

1.1 受试者

受试者为12名健康未婚女性,年龄(22.7 ± 2.0)岁,身高(163.3 ± 6.4)cm,体重(54.9 ± 6.7)kg,体质量指数 BMI(20.5 ± 1.5)kg/m²,胸围差(15.8 ± 1.1)cm,乳房厚度(7.8 ± 1.0)cm;乳房尺寸均为C罩杯,其中75C有7人,70C有5人。由专业人员测量受试者的乳房基本信息,胸围差指上胸围与下胸围的差值,乳房厚度定义为自然状态下右乳头点在矢状面上距左右乳根连线的垂直距离。受试者身体健康状况良好,无运动系统、神经系统疾病及其他严重疾病病史,测试期间不在妊娠期或哺乳期。

1.2 实验过程

受试者穿着统一的测试短裤、测试鞋及运动文胸,在h/p/cosmos跑步机(型号Quasar,h/p/cosmos公司,德国)上以6km/h速度热身6min。为了减少受试者裸胸运动的尴尬,避免视觉干扰,跑步机背面对实验操作台。

热身结束后,在受试者身体贴上反光标点。标记点设置按照Helen Hayes模型^[16](29个点),并增加胸骨角点(两侧胸骨角连线的中点)和背侧胸骨角等高点(背部与胸骨角点高度相等,约在第4胸椎棘突处)。受试者分别在裸胸状态及穿着运动文胸状态以6km/h速度在跑步机上行走6min,穿着运动文胸及裸胸状态顺序随机,组间休息10min,使用Qualisys红外光点高速运动捕捉测试系统(Oqus 300,Qualisys Track Manager,瑞典)采集运动过程中反光标点的运动学参数,采集频率为200Hz。

运动文胸为市售全罩杯中强度背心式无托中厚模杯文胸(见图1)。

1.3 数据处理与统计分析

受试者左足跟着地到下一次左足跟着地定义为一个完整的步行周期。使用Qualisys Track Manager识别第5~6min过程中连续10个步行周期的标记点,获得三维坐标。标记点三维坐标使用Butterworth低通滤波法进行平滑,截断频率为8Hz^[17]。结合Helen Hayes贴点方案选择Deleva修正后的



(a) 正面

(b) 背面

图1 实验所用运动文胸照片

Fig.1 Photo of sports bra used in experiment (a) Front view, (b) Back view

Zatsiorsky-Seluyanovs 人体惯性参数计算骨盆中心和各关节中心^[16]。

根据相关关节中心和标记点建立固连在大腿、小腿、足、骨盆坐标系及躯干的局部坐标系。大腿和小腿坐标系原点在膝关节中心, X 轴指向左, Y 轴指向后, Z 轴沿肢体长轴指向上。下肢各关节角度根据欧拉角方法计算。骨盆和躯干坐标系以骨盆中心为原点, X 轴指向前, Y 轴指向左, Z 轴指向上。躯干坐标系相对骨盆坐标系 YZ -轴转动的角度分别为躯干屈曲角和扭转角。上躯干角指胸骨角点和背侧胸骨角等高点连线与地面的角度, 正、负值分别表示上躯干后倾和前倾。

首先计算在每一个步行周期过程中各关节角度的最大值、最小值和幅度(最大与最小值之差), 再计算某受试者 10 个步行周期的平均值^[18] 作为该受试者的数据, 描述和评价该受试者步态特征, 以 10 个步行周期该指标的标准差^[19] 评价步态稳定性。

采用配对样本 t 检验分析穿着运动文胸与裸胸状态运动时各指标的差异。使用 SPSS 18.0 软件进行统计分析, 显著性水平为 0.05。

2 结果

2.1 步频

受试者穿着运动文胸和裸胸状态的步频分别为 (65.44 ± 3.59) 、 (65.26 ± 3.36) 步/min(见表 1)。总体来看, 受试者穿着运动文胸与裸胸状态在跑步机上行走时步频无显著差异, 但其中 4 名受试者穿着运动文胸的步频大于裸胸, 3 名受试者裸胸状态下的步频大于穿着运动文胸, 还有 5 名受试者的步

表 1 不同乳房支撑状态下步频比较 ($n=12, *P<0.05$)

Tab.1 Comparison of the walking frequency under different breast support conditions

受试者	穿着运动文胸步频/(min^{-1})	裸胸状态步频/(min^{-1})
1	64.70 ± 0.72	65.37 ± 0.77 *
2	64.28 ± 0.62	63.71 ± 0.90
3	69.01 ± 0.62	67.99 ± 0.80 *
4	72.05 ± 1.22	70.98 ± 0.91 *
5	61.16 ± 0.39	60.12 ± 0.28 *
6	62.44 ± 0.28	62.63 ± 0.42
7	61.91 ± 1.04	62.03 ± 1.09
8	66.23 ± 0.60	67.31 ± 0.48 *
9	62.28 ± 0.58	63.03 ± 0.47 *
10	67.84 ± 0.76	66.57 ± 0.87 *
11	63.97 ± 0.41	64.17 ± 0.31
12	71.05 ± 0.66	70.89 ± 0.73
平均	65.44 ± 3.59	65.26 ± 3.36

频在两种乳房支撑状态下无显著差异。

2.2 躯干运动特征

穿着运动文胸步行时上躯干角的最大值和最小值均显著小于裸胸步行状态 ($P < 0.001$), 而上躯干角变化幅度和 10 个步态周期的标准差在两种乳房支撑状态下均没有显著差异(见表 2)。

表 2 穿着运动文胸与裸胸状态上躯干角比较 ($n=12, *P<0.05$)

Tab.2 Comparison of the upper trunk angle under different breast support conditions

指标	穿着运动文胸躯干角/(°)	裸胸状态躯干角/(°)
最大值	-0.13 ± 3.38	2.73 ± 2.23 *
最小值	-5.26 ± 3.38	-2.22 ± 2.11 *
幅度	5.13 ± 0.94	4.95 ± 0.95
最大值标准差	1.07 ± 0.37	1.04 ± 0.25
最小值标准差	0.97 ± 0.35	0.98 ± 0.26
幅度标准差	0.87 ± 0.28	0.93 ± 0.26

穿着运动文胸行走时躯干屈曲角和躯干扭转角的变化幅度均小于裸胸步行状态 ($P < 0.05$), 不同乳房支撑状态对躯干屈曲角和躯干扭转角的最大值、最小值无显著影响(见表 3)。

表3 穿着运动文胸与裸胸状态行走时躯干角度比较($n=12$, * $P<0.05$)

Tab.3 Comparison of the trunk flexion angle and trunk torsion angle under different breast support conditions

指标	躯干屈曲角/(°)		躯干扭转角/(°)	
	穿着运动文胸	裸胸状态	穿着运动文胸	裸胸状态
最大值	18.98 ± 4.77	18.81 ± 4.66	15.84 ± 4.45	16.21 ± 4.17
最小值	23.66 ± 4.32	23.76 ± 4.26	-14.82 ± 2.73	-15.78 ± 3.66
幅度	4.68 ± 0.78	4.94 ± 0.87 *	30.66 ± 5.1	31.99 ± 5.18 *
最大值标准差	0.76 ± 0.19	0.8 ± 0.32	1.25 ± 0.54	1.27 ± 0.5
最小值标准差	0.78 ± 0.19	0.92 ± 0.33 *	1.32 ± 0.44	1.44 ± 0.49
幅度标准差	0.79 ± 0.18	0.89 ± 0.34	1.74 ± 0.73	1.83 ± 0.67

2.3 下肢关节角度

裸胸状态下的髋关节屈曲幅度标准差显著大于穿着文胸状态($P<0.05$)。两种乳房支撑状态下髋

关节最大内收角、最大外展角与内外旋角幅度、最大外旋角度有显著差异($P<0.05$),而其他髋、膝关节角度均没有显著差异(见表4)。

表4 穿着运动文胸与裸胸状态行走时下肢关节角度比较($n=12$, * $P<0.05$)

Tab.4 Comparison of the lower limb joint angles under different breast support conditions

指标	髋关节/(°)		膝关节/(°)	
	穿着运动文胸	裸胸状态	穿着运动文胸	裸胸状态
屈伸角幅度	53.47 ± 3.13	53.51 ± 2.99	67.18 ± 2.51	66.46 ± 2.16
最大屈角	46.60 ± 6.97	46.37 ± 6.71	65.23 ± 5.82	64.55 ± 5.46
最大伸角	6.88 ± 7.07	7.14 ± 7.14	1.94 ± 4.94	1.91 ± 5.27
屈伸幅度标准差	0.99 ± 0.25	1.20 ± 0.35 *	1.24 ± 0.45	1.32 ± 0.43
最大屈角标准差	0.61 ± 0.19	0.62 ± 0.27	1.07 ± 0.34	1.06 ± 0.42
最大伸角标准差	0.94 ± 0.28	1.06 ± 0.37	0.88 ± 0.32	0.81 ± 0.43
内收外展角幅度	20.79 ± 2.68	20.69 ± 2.77	8.74 ± 2.87	8.84 ± 2.73
最大内收角	10.98 ± 2.24	10.48 ± 2.43 *	4.85 ± 2.98	5.34 ± 3.05
最大外展角	9.81 ± 1.68	10.22 ± 2.05 *	3.89 ± 4.31	3.50 ± 4.43
内收外展幅度标准差	0.90 ± 0.21	1.00 ± 0.25	0.58 ± 0.22	0.55 ± 0.12
最大内收角标准差	0.75 ± 0.30	0.73 ± 0.19	0.43 ± 0.19	0.36 ± 0.10
最大外展角标准差	0.60 ± 0.24	0.75 ± 0.19	0.33 ± 0.16	0.32 ± 0.17
内外旋幅度	23.94 ± 6.02	25.19 ± 5.96 *	21.14 ± 5.58	21.52 ± 5.90
内旋角度峰值	9.75 ± 8.13	10.01 ± 7.63	—	—
外旋角度峰值	14.19 ± 8.48	15.19 ± 7.84 *	25.63 ± 8.44	26.10 ± 8.59
内收旋角幅度标准差	2.52 ± 0.93	2.60 ± 0.93	1.81 ± 0.61	1.76 ± 0.67
最大内旋角标准差	1.24 ± 0.43	1.12 ± 0.37	—	—
最大外旋角标准差	2.27 ± 0.96	2.38 ± 0.71	1.52 ± 0.71	1.58 ± 0.82

3 分析与讨论

3.1 步频

总体上,乳房不同支撑状态并没有影响女性行

走时的步频,但对每个受试者来说,乳房不同支持状态对步频会产生不同的影响。Shivitz 等^[11]研究认为,乳房支撑状态对步频没有影响;而闫颖等^[9]和 Boschma 等^[10]的研究结果表明,穿着运动文胸行走

的步频明显低于裸胸状态。乳房大小可能是影响不同乳房支撑状态下步频差异的原因,在 Boschma 等^[10]的研究中,受试者为 C、D 罩杯女性,但未给出受试者具体的乳房尺寸,研究中的罩杯参照国际乳房尺寸可能较大。小到中等的单侧乳房质量在 500 g 左右及以下^[20],而大的乳房可能会达到 750 ~ 1 000 g^[21],如果乳房质量较大,则可能会对步频等参数造成影响。另外,跑步机上的适应时间也可能干扰不同乳房支撑状态下运动的步频。跑步机上的运动与地面运动不同,在跑步机上有步频增加、步长变短、步态周期缩短的趋势^[22-24],一般认为跑步机上运动需要适应 5 min 左右才能到达稳定状态^[25-26]。闫颖等^[9]的研究中,受试者在跑步机上只热身了 3 min,并且受试者均先进行裸胸状态下的 2 min 运动,然后再进行穿着运动文胸状态的测试,出现穿着运动文胸状态步频减小^[6]的结果可能与受试者在跑步机上运动时间较短和两种状态的测试顺序有关。而 Shivitz 等^[11]测试 18 名 C、D 罩杯女性分别穿着低、中及高支撑文胸跑步的研究结果发现,7 名受试者随着乳房支撑状态增加步频减小,3 名增大,6 位无明显变化,还有 1 位无规律;受试者热身 5 ~ 10 min 后以随机顺序进行裸胸以及低、高支撑文胸状态的运动,但运动时间只有 40 s,故计算出的步频可能同时受乳房支撑状态以及跑台上运动时间的影响。本研究的受试者乳房均为 C 罩杯,通过对跑台上行走中第 5 ~ 6 min 内 10 个步态周期的步频分析发现,乳房支撑状态对部分受试者的步频产生了不同影响,也有一些受试者步频并无明显变化,故造成总体上两种乳房支持状态下步频并无明显差异。后续研究应进一步增加样本量,增加受试者在跑台上的适应时间,分析乳房大小、支撑状态等因素对步频的影响。

3.2 躯干运动特征的变化

穿着运动文胸行走时上躯干角最大值、最小值均显著小于裸胸步行状态,说明穿着运动文胸行走时上躯干较前倾,而裸胸步行则相对是更加挺胸的状态。乳房本身没有骨骼和肌肉,它主要由韧带、腺体和皮肤牵拉做支撑,乳房悬韧带包裹乳腺并将其固定在胸壁上,对乳房起支持和固定作用^[20,27]。乳房位于胸前第 2 ~ 6 肋骨之间,其运动可能首先影响上躯干的姿态。已有研究表明,静态条件下乳房体

积的大小会影响脊柱的姿态。一项针对乳房假体对身体姿态的研究发现,乳房质量增加会造成脊柱的颈曲和腰曲前凸^[28]。女性进行乳房缩小手术后脊柱前屈的角度减小^[29],并且头、肩以及膝关节中心显著后移^[30]。本研究结果表明,步行时乳房无稳定支撑会造成女性更加挺胸。

运动时乳房相对躯干有额外的运动^[16,31-32],会牵拉韧带和皮肤。为了抵抗乳房运动产生的转动扭矩,并且减少乳房对韧带和皮肤的拉力,女性背部在颈椎及胸椎区域肌肉持续收缩^[33],上躯干后伸以保持躯干直立。因此,裸胸步行时略挺胸的姿态是为了维持躯干的稳定以及减少乳房与躯干的相对运动。上躯干姿态的变化可能会进而影响整个脊柱姿势的改变,乳房如果长期处于支撑不足的状态,可能会造成颈背部肌肉的疼痛与疲劳。

乳房处于无支撑状态行走时,躯干运动幅度增加。行走过程中,整个躯干需要在垂直姿态上保持动态平衡,以此来维持人体的稳定状态。已有研究证明,裸胸运动时乳房会产生较大位移,且 59% 是上下方向^[34],为了减轻韧带皮肤的拉力,躯干可能需要相应前屈后伸以减小乳房与身体之间竖直方向的相对运动,故裸胸状态下的躯干屈曲角波动范围较大(见表 3)。裸胸状态运动时乳房在水平方向也有较大的位移^[34]。乳房向外侧运动时,会牵拉乳房内侧的皮肤和韧带,为减少不适感躯干随着乳房向外侧的运动而运动来降低乳房躯干的相对运动,故裸胸状态下躯干扭转角的范围更大。步行时躯干肌和肢体屈伸肌群交替协调收缩带动各关节活动,并伴有骨盆旋转等^[13],躯干的运动会影响骨盆运动甚至是下肢的运动。躯干屈曲角和躯干扭转角范围增大可能会影响盆带肌的运动,进而影响髋关节的运动。乳房不同支撑状态下髋关节角度的差异(见表 4)可能与躯干扭转角的调整有关。

3.3 行走稳定性的变化

穿着运动文胸行走时躯干屈曲角幅度较小,同时 10 个周期躯干屈曲角最小值的标准差较小(见表 4)。已有研究证明,行走时躯干活动范围大是中老年人发生跌倒的重要危险因素^[35],躯干角度的变化反映人体在行走过程中保持上体平衡的能力^[36]。躯干的运动是身体主动控制以协调胸廓、骨盆和下肢等运动的关系,最终保持人体稳定^[37]。研究发

现,女性穿着高跟鞋行走时,受试者会有意地减少躯干的运动来维持身体的稳定^[38]。裸胸状态10个周期中的髋关节屈曲角度幅度的标准差显著大于穿着运动文胸状态,表明裸胸状态行走时髋关节屈曲运动调整较多,稳定性较差。因此,穿着运动文胸运动时人的平衡能力和稳定性较裸胸状态好,裸胸状态下女性行走稳定性下降。

一项通过测力台测试隆胸手术前后女性平衡能力的研究发现,乳房质量增大后,女性闭眼站立时压力中心偏移椭圆轨迹包络面积增大,说明乳房质量增加会导致女性平衡调节能力下降^[28]。虽然本研究中受试者乳房体积不大,但乳房无支撑限制时位移较大,使身体重心改变较多,且乳房晃动也会使韧带皮肤的不适感增加。乳房相对躯干的额外运动对于女性而言是一个干扰,裸胸状态下躯干的运动需要同时考虑人体整体的运动以及乳房的运动。躯干活动增加,髋关节屈曲角度调整较多,不利于人体运动的稳定和平衡,会降低行走稳定性。

4 结语

不同乳房支撑状态下C罩杯女性行走时,步态差异主要体现在躯干及上躯干运动特征的变化。穿着运动文胸状态上躯干较为前倾,而裸胸状态上躯干处于挺胸状态。裸胸状态行走时躯干屈曲角与扭转角的幅度显著增大,行走稳定性下降。不同乳房支撑状态下C罩杯女性步行时的下肢关节角度无显著差异,但行走步频存在个体差异。

参考文献:

- [1] MCGHEE D, STEELE J. Breast elevation and compression decrease exercise-induced breast discomfort [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2010, 42(7): 1333-1338.
- [2] MCGHEE DE, STEELE JR, ZEALEY WJ, *et al*. Bra-breast forces generated in women with large breasts while standing and during treadmill running: Implications for sports bra design [J]. *Appl Ergon*, 2013, 44(1): 112-118.
- [3] WHITE J, SCURR J, HEDGER W. A comparison of three-dimensional breast displacement and breast comfort during overground and treadmill running [J]. *J Appl Biomech*, 2011, 27(1): 47-53.
- [4] GUMM R, CUNNICK G, MOKBEL K. Evidence for the management of mastalgia [J]. *Curr Med Res Opin*, 2004, 20(5): 681-684.
- [5] BOWLES K, STEELE J. Does inadequate breast support pose an injury risk? [J]. *J Sci Med Sport*, 2003, 6(4): 67.
- [6] LORENTZEN D, LAWSON L. Selected sports bras: A biomechanical analysis of breast motion while jogging [J]. *Phys Sportsmed*, 1986, 15(5): 128-139.
- [7] WHITE J, SCURR J, SMITH NA. The effect of breast support on kinetics during overground running performance [J]. *Ergonomics*, 2009, 52(4): 492-498.
- [8] EDEN KB, VALIANT GA, LAWSON LJ, *et al*. Three dimensional kinematic evaluation of sport bra design: 1121 [J]. *Med Sci Sport Exer*, 1992, 24(5): 187.
- [9] 闫颖. 走和跑运动中中文胸对乳房运动学参数影响的研究 [D]. 北京: 北京体育大学硕士学位论文, 2013.
- [10] BOSCHMA AL. Breast support for the active woman: Relationship to 3D kinematics of running [D]. Corvallis: Oregon State University, 1994.
- [11] SHIVITZ NL. Adaptation of vertical ground reaction force due to changes in breast support in running [D]. Corvallis: Oregon State University, 2001.
- [12] HAMACHER D, SINGH NB, V DIEËN JH, *et al*. Kinematic measures for assessing gait stability in elderly individuals: A systematic review [J]. *J R Soc Interface*, 2011, 8(65): 1682-1698.
- [13] 胡飞, 顾冬云, 戴尅戎, 等. 基于非线性时间序列法研究人体步行稳定性[J]. *医用生物力学*, 2012, 27(1): 51-57.
- [14] HU F, GU DY, DAI KR, *et al*. Nonlinear time series analysis of gait stability during walking [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(1): 51-57.
- [15] BRUIJN SM, MEIJER OG, BEEK PJ, *et al*. Assessing the stability of human locomotion: A review of current measures [J]. *J R Soc Interface*, 2013, 10(83): 20120999.
- [16] SARDAIN P, ROSTAMI M, THOMAS E, *et al*. Biped robots: Correlations between technological design and dynamic behavior [J]. *Control Eng Pract*, 1999, 7(3): 401-411.
- [17] 万祥林. 运动鞋屈曲刚度对舒适性及短跑、纵跳表现的影响 [D]. 北京: 北京体育大学硕士学位论文, 2013.
- [18] ZHOU J, YU W, NG SP. 3D dynamic analysis of breast without and with a sports bra [C]//Proceedings of 17th World Congress on Ergonomics. Beijing: [s. n.], 2009.
- [19] WONG DW, LAM WK, YEUNG LF, *et al*. Does long-distance walking improve or deteriorate walking stability of transtibial amputees? [J]. *Clin Biomech*, 2015, 30(8): 867-873.
- [20] LI L, HADDAD JM, HAMILL J. Stability and variability may respond differently to changes in walking speed [J]. *Hum Mov Sci*, 2005, 24(2): 257-267.

- [20] GEFEN A, DILMONEY B. Mechanics of the normal woman's breast [J]. *Technol Health Care*, 2007, 15(4): 259-271.
- [21] GRASSLEY JS. Breast reduction surgery. What every woman needs to know [J]. *Awhonn Lifelines*, 2002, 6(3): 244-249.
- [22] ALTON F, BALDEY L, CAPLAN S, *et al.* A kinematic comparison of overground and treadmill walking [J]. *Clin Biomech*, 1998, 13(6): 434-440.
- [23] WARABI T, KATO M, KIRIYAMA K, *et al.* Treadmill walking and overground walking of human subjects compared by recording sole-floor reaction force [J]. *Neurosci Res*, 2005, 53(3): 343-348.
- [24] 张美珍. 在跑台上和地面上跑时生物力学参数的差异分析 [D]. 北京: 北京体育大学硕士学位论文, 2009.
- [25] ZENI JA, HIGGINSON JS. Gait parameters and stride-to-stride variability during familiarization to walking on a split-belt treadmill [J]. *Clin Biomech*, 2010, 25(4): 383-386.
- [26] MATSAS A, TAYLOR N, MCBURNEY H. Knee joint kinematics from familiarised treadmill walking can be generalised to overground walking in young unimpaired subjects [J]. *Gait Posture*, 2000, 11(1): 46-53.
- [27] 柏树令. 系统解剖学 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2013.
- [28] NICOLETTI G, MANDRINI S, FINOTTI V, *et al.* Objective clinical assessment of posture patterns after implant breast augmentation [J]. *Plast Reconstr Surg*, 2015, 136(2): 162-170.
- [29] SAHIN I, ISKENDER S, OZTURK S, *et al.* Evaluation of breast reduction surgery effect on body posture and gait pattern using three-dimensional gait analysis [J]. *Aesthetic Plast Surg*, 2013, 37(3): 549-553.
- [30] MAZZOCCHI M, DESSY LA, RONZA SD, *et al.* A Study of postural changes after breast reduction [J]. *Aesthetic Plast Surg*, 2012, 36(6): 1311-1319.
- [31] 李上校, 任景萍, 闫颖, 等. 行走过程中文胸对乳房运动学参数的影响 [J]. *北京体育大学学报*, 2014, 37(7): 75-79.
- [32] 任景萍, 闫颖, 周兴龙. 不同速度走和跑运动中运动文胸对乳房振幅的影响 [J]. *首都体育学院学报*, 2015, 27(2): 172-177.
- [33] LETTERMAN G, SCHURTER M. The effects of mammary hypertrophy on the skeletal system [J]. *Ann Plast Surg*, 1980, 5(6): 425-431.
- [34] SCURR J, WHITE J, HEDGER W. Breast displacement in three dimensions during the walking and running gait cycles [J]. *J Appl Biomech*, 2009, 25(4): 322-329.
- [35] 屈莎. 预测中老年人跌倒敏感指标和风险评价等级的研究 [D]. 北京: 北京体育大学博士学位论文, 2015.
- [36] 邹晓峰. 士兵在负重行军时步态的生物力学特征 [D]. 北京: 北京体育大学博士学位论文, 2010.
- [37] HUANG Y, MEIJER OG, LIN J, *et al.* The effects of stride length and stride frequency on trunk coordination in human walking [J]. *Gait Posture*, 2010, 31(4): 444-449.
- [38] 刘华. 高跟鞋对成年女性行走时躯干、下肢运动协调的影响 [D]. 福州: 福建医科大学硕士学位论文, 2011.