

跑鞋与着地方式对跑步损伤的影响

张力文^a, 马云茹^a, 朱晓兰^b, 刘卉^a

(北京体育大学 a. 运动人体科学学院; b. 附属竞技体校, 北京 100084)

摘要:长跑是骨骼肌肉系统损伤发病率最高的运动健身项目之一,与跑鞋和着地方式有很大关系。在百链云图书馆和谷歌学术数据库中检索有关跑鞋和着地方式与跑步损伤关系的生物力学研究,最终选择42篇进行文献综述,发表时间为1981~2016年。跑鞋所宣称的缓冲和动作控制的作用并未得到证实,裸足跑作为更自然的跑步方式得到提倡。前脚掌着地的跑步方式对膝关节的损伤更小,但踝关节和跖骨的负荷较大;后跟着地则相反。因此,跑步者应根据自身情况选择适合的跑步方式。但转变跑步方法对跑步者下肢生物力学特征的影响尚未明确,这方面的研究会对比跑步者转变跑步方式提出更好的建议。

关键词:跑步损伤;裸足跑;着地方式;跑鞋;生物力学

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2018.01.013

The Influence of Running Shoes and Foot-Strike Patterns on Running Injuries

ZHANG Liwen^a, MA Yunru^a, ZHU Xiaolan^b, LIU Hui^a

(a. Sport Science College, b. Affiliated Athletic School, Beijing Sport University, Beijing 100084, China)

Abstract: Long distance running is a popular sport with a high risk of getting musculoskeletal injuries, which is closely related to running shoes and foot-strike patterns. Biomechanical researches on relationship of running shoes and foot-strike patterns with running injuries were searched on the chain cloud library and Google academic database, and a total of 42 papers published from 1981 to 2016 were reviewed. There is not enough evidence to prove that running shoes have an effective cushioning and motor controlling function as what they claim, while barefoot running as a kind of more natural running pattern should be encouraged. Generally speaking, the forefoot strike has a lower injury risk on the knee, but increases the load on ankle and metatarsal bones. On the contrary, the rear foot strike always has a higher injury risk on the knee while a lower load on ankle and metatarsal bones. Therefore, runners should choose a suitable running method depending on their own conditions. The influence of running method transformation on biomechanical characteristics of lower limbs is not clear, and researches in such area may give more effective suggestions for runners to change their running methods.

Key words: running injuries; barefoot running; foot-strike pattern; running shoes; biomechanics

长跑是最普及的健身项目之一,与短跑的短时间高强度的特点不同,长跑更适合日常健身(下文

所述跑步均指长跑)。已有研究证明,每周一定时间的跑步健身可以显著降低患冠心病和Ⅱ型糖尿

收稿日期:2017-02-20;修回日期:2017-04-15

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助课题(2015YB003)

通信作者:朱晓兰,副教授,E-mail:zhuxiaolan77@163.com

病的风险,另外对减脂、增加心肺功能和缓解心理压力也有一定效果^[1]。因此,近年来全球参与跑步的人数持续增长,美国已经有3 500万人参与到跑步运动中,而中国每年在田径协会注册的马拉松赛事多达49个,仅在北京就有超过200万跑步者。

跑步也是骨骼肌肉系统损伤发病率最高的运动健身项目之一。最近的一些数据显示,跑步所造成的损伤发生率高达26.0%~92.4%,其中30.0%~90.0%损伤造成了跑步者们训练量的减小甚至停训^[2]。跑步所造成的下肢损伤主要发生在膝关节,发生率高达7.2%~50.0%,而其他常见的损伤还包括胫骨、跟腱、腓肠肌、足部和大腿肌肉损伤^[3]。尽管运动医学和运动生物力学工作者一直对跑步损伤的原因和预防措施进行研究,但跑步损伤发生率却没有明显减小。

跑步姿势和跑鞋对骨骼肌肉系统产生的影响会在长跑过程中积累,进而造成过度使用性损伤^[4]。目前虽然一些教练员和临床运动医学人员建议跑步者使用不同的跑鞋和跑步技术,但跑步相关损伤的病因尚未明确。如何着地、如何选择跑鞋,甚至是否应该穿鞋跑步等具体问题尚存在争议。因此,本文检索了百链云图书馆以及谷歌学术数据库,通过“barefoot”、“shod running”、“running injuries”、“forefoot”、“rear foot”等英文检索词以及“裸足跑”、“跑步损伤”等中文检索词,将有关生物力学的研究纳入筛选标准,最终选择42篇进行文献综述,文献发表时间为1981~2016年。通过总结分析已有关于跑鞋和跑步姿势与跑步损伤关系的文献,讨论不同跑步方式的优缺点,希望为跑步爱好者们提出预防跑步损伤的建议,同时为相关研究提供借鉴。

1 穿鞋跑与裸足跑对下肢运动生物力学的影响

人类穿运动鞋跑步的历史尚不到100年,第一篇有关裸足跑和穿鞋跑的研究发表于1981年^[5]。自从2010年Lieberman^[6]在Nature杂志上发表了关于裸足跑的研究论文以来,关于是否应该裸足跑的问题成为跑步研究的热点。

1.1 跑鞋的作用

在20世纪70年代,现代跑鞋尚未发明之前,人

们习惯于裸足跑或者是穿着较为简易、支撑度低的鞋跑步。跑步运动的兴起推动着跑鞋研发和变革,现代跑鞋的主要作用是缓冲和防止足部过度内外翻。

1.1.1 跑鞋的缓冲作用 跑步者在跑步时受到的重复高冲击载荷是造成肌肉骨骼系统过劳损伤的原因之一^[7],故跑鞋制造者往往通过在中底使用缓冲材料或结构增加跑鞋的缓冲性能,以减少跑步着地时的地面反作用力。但现有研究并没有充分证据表明鞋的缓冲设计能够减小着地时的冲击力、地面反作用力加载率和损伤风险。很多研究都已证明,跑步者会根据鞋底或地面的硬度调整跑步时的身体姿态^[8-9],而最大力(加速度)或最大力(加速度)加载率的大小并没有受到鞋底硬度^[10-11]或地面硬度^[12]的影响。Kong等^[8]对比了穿新跑鞋和跑了200英里之后旧跑鞋对跑步时人体姿态和受力的影响,发现旧跑鞋鞋底硬度提高,穿旧跑鞋跑步在着地过程中身体姿态发生了变化,但地面反作用力和加载率与新跑鞋相比并没有显著区别。Wakeling等^[13]的研究则证明,在软硬差别很大的地面上跑步,支撑阶段地面反作用力峰值也无显著差异,跑步者可以在一步之内通过调整下肢动作形式保持身体重心在垂直方向上的稳定。而对跑步和跳跃落地时下肢肌电特征的研究也发现,鞋底硬度会改变着地时下肢肌肉激活特征^[13-14]。

跑步者会通过肌肉激活的控制调节身体动作,以适应鞋底或地面的硬度,避免由于地面冲击力过大所造成的损伤。因此,跑鞋的缓冲装置对减少地面反作用力和加载率并没有明显作用。且鞋底缓冲装置的存在还可能降低跑步者的本体感觉,削弱神经肌肉系统针对不同硬度地面进行调整的能力^[15]。

1.1.2 跑鞋对足内外翻的控制作用 一般认为,跑步者下肢力线排列错位(malalignment)或不稳是造成跑步损伤的重要原因,而跑步时距下关节的过度内、外翻往往与下肢过度使用性损伤有关。因此,跑鞋设计者会在鞋中底的内侧或外侧加入不同硬度的材料来帮助控制距下关节的内外翻幅度^[16]。但目前相关研究的结果并不一致^[3,7,17-18],故还不能确定距下关节过度运动与跑步损伤间的关系。

研究表明,带有动作控制功能的鞋能减少跑步

时足内翻幅度和垂直地面反作用力^[16],降低有足外翻跑者的损伤风险^[19],但也有研究认为,这种鞋引起的动作改变很小^[3],且具有较大的个体差异性^[20]。同时,并没有充分的证据证明改变足部动作的跑鞋可以改变大腿或小腿的不良动作,故穿这种鞋跑步并不能降低下肢软组织损伤风险^[4,21]。而且穿鞋慢跑时,由于存在较大较厚的鞋后掌,足跟所受到的外翻力矩比不穿鞋时更大,且足落地后缓冲时间增长^[22],离地时足还来不及调整至中立位,踝关节及周围肌肉未做好蹬伸准备,容易造成损伤^[23]。

1.1.3 跑鞋的不利作用 过度保护的跑鞋可能造成足部肌肉能力减退。维持足弓的功能不仅要靠骨骼和韧带,也要靠强壮的足部肌肉。只有不断地使用、练习这些肌肉,才有可能更好地维持足弓的功能,同时主动支撑足弓并抵抗运动中的高冲击力。但传统跑鞋理论将足看作刚体,使用支撑结构或大量的缓冲材料将足包裹起来,尤其是在内侧纵弓处,使足部在运动过程中只激活很少的肌肉。这虽然能在一定程度上减轻足底筋膜炎的症状,但是治标不治本,当不穿着跑鞋的时候,足底筋膜炎的病痛并没有得到缓解,而且可能降低那些维持足弓的肌肉功能,甚至发生内侧纵弓塌陷或足底筋膜炎^[24]。因此,传统跑鞋对足弓的支撑作用反而可能成为造成损伤的危险因素。未来的研究可以对比习惯穿鞋跑步者和裸足跑者足部肌肉的能力差异,以进一步了解跑鞋对足部肌肉的影响。

过度保护的鞋底还会降低足部本体感觉。感觉反馈在避免损伤中起到重要作用,这种感觉多来自于本体感受和触觉。足底的本体感受器感受足底的形变,提高身体对位置变化的敏感性,帮助中枢神经在足部位置快速变化时及时作出反应,从而预防损伤。Robbins等^[25]通过对比青年人穿鞋和裸足状态下的位置觉发现,穿鞋情况下足部位置觉的误差比裸足情况下增加了4°;而相较于穿着较为硬且薄的鞋垫,老年人足部位置觉的误差在穿着更软更厚的鞋垫后变得更大^[15]。因此,穿着跑鞋会减弱足底触觉反应,阻止足部正常的本体感觉刺激,错误的本体感觉造成肌肉在动态的环境中不能准确按照预期动员,从而造成相应结构的损伤^[26]。

总之,虽然跑鞋设计者们一直在追求更好的缓

冲和动作控制的功能,但是人体神经肌肉系统对于外界负荷具有适应和协调能力,过大过厚鞋跟或者是不适宜的中底材料有可能会引起距下关节的异常运动;而跑鞋的支撑作用和过度保护,则会降低足部肌肉能力和本体感觉。因此,目前的研究结果说明跑鞋并未很好地预防损伤,甚至有加重损伤的风险。未来需要开展更多纵向研究,进一步确定跑鞋和跑步损伤之间的关系,例如研究已有跑步损伤者穿着跑鞋一段时间后损伤风险指标是否有所改变。

1.2 裸足跑

1.2.1 裸足跑的优点 已有研究发现,裸足活动能提高足部肌肉组织的能力,尤其是那些维持内侧纵弓的肌肉^[24]。Robbins等^[24]研究发现,裸足跑步者4个月后的内侧纵弓平均高度增加了4.7 mm,而没有进行裸足活动的对照组跑步者内侧纵弓的平均高度减小了4.9 mm,说明裸足承重的活动可以激活那些在穿鞋活动中不活跃的肌肉,从而增加足弓高度,故鼓励一些跑步爱好者们多进行一些裸足活动。更强健的足部肌肉会给骨骼和关节提供有力的支持,可能减少损伤的危险,未来需要进一步的研究来证明增加足部肌肉的能力是否可以降低跑步损伤发生率。

与穿鞋跑的作用相反,裸足跑还可以促进本体感觉。Waddington等^[27]发现,足球运动员裸足时对踝关节外翻动作的辨别能力要好于穿鞋时,推测原因是裸足与地面接触时会放大触觉传感器产生的感觉^[28]。足部直接接触地面还会使足底本体感受器更快做出反应,使肌肉系统迅速调整适应足部的运动变化,帮助纠正足部的位置、减小地面反作用力,从而防止韧带过劳损伤的发生^[26]。有研究认为,裸足跑者能够感受到那些有风险的地面反作用力的大小和加载率,从而调整步态和肌肉活动^[29]。

研究还发现,裸足跑可以优化跑步时的身体姿势。对比穿鞋和裸足跑的步态可以发现,裸足跑步长短、步频快、下肢关节运动幅度小,一步中着地时间短、腾空时间长,且着地时踝关节更加跖屈,意味着倾向于以全脚掌或前脚掌着地^[30-33]。裸足跑步态的特征,特别是着地方式上的调整使裸足跑着地时下肢受到的负荷更小^[6,30-31]。裸足跑者不再需要具有缓冲功能的跑鞋去帮助减小冲击力的影响^[34],

因为他们即使是在坚硬的地面上跑步,在着地初期也没有产生冲击力的峰值。而且在同样跑速情况下,裸足跑耗氧量更少,跑步经济性更强^[31,35]。一项针对裸足生活人群的研究发现,其大脚趾往往处于外展位,跑步蹬离地面时大脚趾提供了积极的支撑作用,从而降低了前足跖骨区的负荷,减少足底筋膜炎和跖骨疲劳性骨折发生的风险^[36-37]。

1.2.2 裸足跑的缺点 裸足跑意味着足部暴露,足有可能被地面的尖锐物划伤,在极端天气下被地表高温烫伤,而且一旦受伤,伤口易感染。虽然大多数裸足跑者采用全脚或前脚着地,但也有人裸足跑时以足跟着地,这被认为是一种不自然的、有害的裸足跑姿势^[38],足跟形变和所受到的垂直地面反作用力均比穿鞋者大。此外,裸足跑还容易造成足部小肌肉过早疲劳,从而增加跖骨疲劳性骨折发生的风险^[39],且大脚趾在蹬离地面过程中的作用增大,前足负荷和损伤风险增加^[36]。

2 跑步时足着地方式

跑步常见的着地方式有足跟着地、前足着地和全脚掌着地。足跟着地指足跟先于跖趾关节着地(足跟-足趾),前足着地是跖趾关节先于足跟着地(跖趾关节-足跟-足趾),全脚掌着地指足跟和跖趾关节基本同时着地^[33]。69.0%~95.1%跑步者采用足跟着地,而只有4.9%~31.0%跑步者采用前足或全脚掌着地^[29],说明绝大多数人更习惯足跟着地的跑步方式。本文主要讨论前足着地与足跟着地对损伤的影响。

不同的着地方式可能导致损伤的部位和机制有所不同。足跟着地者可能更容易产生下肢运动损伤,因为重复、迅速和大量的冲击载荷,以及较大的膝关节和髌关节力矩,都有可能造成下肢应力性骨折、胫骨内侧压力综合征、足底筋膜炎等一系列的损伤。相反,使用前足着地者虽然具有较小的膝关节和髌关节力矩,但由于踝关节在矢状面上的力矩较大,容易产生跟腱炎、跖骨骨折等一系列足部疾病。而且由于个体差异,尤其是解剖结构差异的存在,例如机体胼胝、肌肉形态和足弓形状等的适应性,使不同着地方式的损伤力学机制变得更加复杂。

2.1 足跟着地

跑步者足着地时的高冲击力被认为是造成某

些损伤的原因。足跟着地者落地过程中受到较大的地面反作用力,尤其是较大的地面反作用力加载率,很有可能造成下肢的应力性骨折^[40]。一项对在校大学生跑步者的研究发现,习惯足跟着地的跑步者比习惯前足着地的跑步者重复发生应力损伤的几率高出近1倍^[29]。当采用足跟先着地跑步时,膝关节伸展而踝关节是相对背屈的,当踝关节转变成跖屈的时候,膝关节屈曲,伸膝的肌肉做离心收缩来克服地面反作用力。习惯足跟着地的跑步者的膝关节转动要做更多的功^[41],这就意味着髌股面和胫股面的压力增大,从而比前脚掌着地者有着更高的膝关节损伤风险^[42-43]。

2.2 前足或中足着地

不少研究表明,使用全脚掌和前脚掌着地能够提高跑步效率并减少损伤,故这两种着地方式越来越受到推崇。目前比较流行的POSE跑法^[44]和太极跑(Chirunning)^[45]都强调中足或前足着地。使用全脚掌或者前脚掌着地者往往表现出比足跟着地者更快的步频和更小的步幅,足落地点在前后方向上接近重心,这就减小了地面反作用力作用于膝关节和髌关节的力臂,从而减小了力矩。实际上即使是足跟着地的方式,步幅减小10%,压力峰值和加载率也会有所减小,使膝关节和髌关节得到缓冲^[22]。因此,髌股关节痛的患者可以采用转换为前足着地的跑步方式来减轻病痛,患有膝关节骨性关节炎的患者也可推荐使用全脚掌和前脚掌着地的跑步方式^[37]。

3 结语

科学跑步健身、预防跑步损伤是所有跑步者追求的目标。与跑步损伤相关的危险因素众多,其中穿鞋跑和裸足跑何种更好还存在很大争议,传统的穿鞋且后跟着地的跑法似乎面临了很大的挑战,更多人开始推崇裸足跑或者穿着裸足跑鞋来制造相对靠前的着地方式。足前部着地、裸足跑、POSE跑法和太极跑有一些共同的特点,即步长小、步频快、下肢关节运动幅度小。从目前研究所得到的一般性推断是,无论是足跟着地还是前足着地,都可能造成损伤,但相较而言,除去每周的跑步距离、BMI、性别和比赛距离等因素,足跟着地者的损伤率比前足着地者大。足跟着地的跑步方式会对膝关节和

髌关节造成更大的负荷,在不断重复的步态周期中,负荷的积累可能会引起骨组织的损伤,然而其优势在于踝关节矢状面力矩较小且跖骨不必承受太大的压力,不会对踝关节和跖骨造成太大的影响。反之,前足着地的方式能减小膝关节和髌关节的负荷,但会造成跖骨痛和其他一些足疾。

不论是选择穿鞋跑还是裸足跑,或者是前足着地还是足跟着地,都需根据跑步者自身情况作出选择。引起跑步损伤的原因不仅是跑步装备和跑步姿势的问题,同时个体差异的存在也使得损伤因素更加多元化。因此,需要更多更详细的高质量研究探索跑步损伤的生物力学机制,了解造成不同人群跑步损伤的原因和可能的预防方案,从而更好地帮助跑步者减少损伤之苦。

参考文献:

[1] KOPLAN JP, POWELL KE, SIKES RK, *et al.* An epidemiologic study of the benefits and risks of running[J]. *JAMA*, 1982, 248(23): 3118-3121.

[2] VAN MECHELEN W. Running injuries. A review of the epidemiological literature [J]. *Sports Med*, 1992, 14(5): 320-335.

[3] GENT RN, SIEM D, VAN MIDDELKOOP M, *et al.* Incidence and determinants of lower extremity running injuries in long distance runners: A systematic review [J]. *Br J Sports Med*, 2007, 41(8): 469-480.

[4] HRELJAC A. Etiology, prevention, and early intervention of overuse injuries in runners: A biomechanical perspective [J]. *Phys Med Rehabil Clin N Am*, 2005, 16(3): 651-667.

[5] DIEBSCHLAG W. Pressure distribution on the sole of the human foot while standing and walking, barefoot and with shoes [J]. *Z Orthop Ihre Grenzgeb*, 1982, 120(6): 814-820.

[6] LIEBERMAN DE, VENKADESAN M, WERBEL WA, *et al.* Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners [J]. *Nature*, 2010, 463(7280): 531-535.

[7] HRELJAC A. Impact and overuse injuries in runners [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2004, 36(5): 845-849.

[8] KONG PW, CANDELARIA NG, SMITH DR. Running in new and worn shoes: A comparison of three types of cushioning footwear [J]. *Br J Sports Med*, 2009, 43(10): 745-749.

[9] HARDIN EC, VAN DEN BOGERT AJ, HAMILL J. Kinematic adaptations during Running: Effects of footwear,

surface, and duration [J]. *Med Sci Sport Exer*, 2004, 36(5): 838-844.

[10] HINTERMANN B, NIGG BM. Pronation in runners. Implications for injuries [J]. *Sports Med*, 1998, 26(3): 169-176.

[11] MCNAIR PJ, MARSHALL RN. Kinematic and kinetic parameters associated with running in different shoes [J]. *Br J Sp Med*, 1994, 28(4): 256-260.

[12] FERRIS DP, LIANG K, FARLEY CT. Runners adjust leg stiffness for their first step on a new running surface [J]. *J Biomech*, 1999, 32(8): 787-794.

[13] WAKELING JM, PASCUAL SA, NIGG BM. Altering muscle activity in the lower extremities by running with different shoes [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2002, 34(9): 1529-1532.

[14] 傅维杰, 刘宇, 黄灵燕, 等. 不同着地方式下鞋缓冲特性对下肢肌肉活化及共激活的影响 [J]. *中国运动医学杂志*, 2014, 33(9): 860-868.

[15] ROBBINS S, WAKED E. Foot position awareness: The effect of footwear on instability, excessive impact, and ankle spraining [J]. *Crit Rev Phys Rehabil Med*, 1997, 9(1): 53-74.

[16] CHEUNG RT, WONG MY, NG GY. Effects of motion control footwear on running: A systematic review [J]. *J Sports Sci*, 2011, 29(12): 1311-1319.

[17] WEN DY, PUFFER JC, SCHMALZRIED TP. Lower extremity alignment and risk of overuse injuries in runners [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1997, 29(10): 1291-1298.

[18] TAUNTON J, RYAN MB, CLEMENT DB, *et al.* A prospective study of running injuries: The Vancouver sun run "in training" clinics [J]. *Br J Sp Med*, 2003, 37(3): 239-244.

[19] MALISOUX L, CHAMBON N, DELATTRE N, *et al.* Injury risk in runners using standard or motion control shoes: A randomised controlled trial with participant and assessor blinding [J]. *Br J Sports Med*, 2016, 50(8): 481-487.

[20] NIGG BM, WAKELING JM. Impact forces and muscle tuning: A new paradigm [J]. *Exerc Sport Sci Rev*, 2001, 29(1): 37-41.

[21] YEUNG SS, YEUNG EW, GILLESPIE LD. Interventions for preventing lower limb soft-tissue running injuries [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2010, 6(7): CD001256.

[22] ALTMAN AR, DAVIS IS. Barefoot running: Biomechanics and implications for running injuries [J]. *Curr Sports Med Rep*, 2012, 11(5): 244-250.

[23] 李建设, 顾耀东, 陆毅琛, 等. 运动鞋核心技术生物力学研究 [J]. *体育科学*, 2009, 29(5): 40-49.

[24] ROBBINS SE, HANNA AM. Running-related injury prevention through barefoot adaptations [J]. *Med Sci Sports*

- Exerc, 1987, 19(2): 148-156.
- [25] ROBBINS S, WAKED E, MCCLARAN J. Proprioception and stability: Foot position awareness as a function of age and footwear [J]. *Age Ageing*, 1995, 24(1): 67-72.
- [26] ROBBINS S, WAKED E. Factors associated with ankle injuries [J]. *Sports Med*, 1998, 25(1): 63-72.
- [27] WADDINGTON G, ADAMS R. Football boot insoles and sensitivity to extent of ankle inversion movement [J]. *Br J Sp Med*, 2003, 37(2): 170-175.
- [28] JENKINS DW, CAUTHON DJ. Barefoot running claims and controversies: A review of the literature [J]. *J Am Podiatr Med Assoc*, 2011, 101(3): 231-246.
- [29] DAOUD AI, GEISLER GJ, WANG F, *et al.* Foot strike and injury rates in endurance runners: A retrospective study [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2012, 44(7): 1325-1334.
- [30] DIVERT C, MORNIEUX G, BAUR H, *et al.* Mechanical comparison of barefoot and shod running [J]. *Int J Sports Med*, 2005, 26(7): 593-598.
- [31] SQUADRONE R, GALLOZZI C. Biomechanical and physiological comparison of barefoot and two shod conditions in experienced barefoot runners [J]. *J Sports Med Phys Fitness*, 2009, 49(1): 6-13.
- [32] WIT BD, CLERCQ DD, AERTS P. Biomechanical analysis of the stance phase during barefoot and shod running [J]. *J Biomech*, 2000, 33(3): 269-278.
- [33] DE CLERCQ D, AERTS P, KUNNEN M. The mechanical characteristics of the human heel pad during foot strike in running: An *in vivo* cineradiographic study [J]. *J Biomech*, 1994, 27(10): 1213-1222.
- [34] NIGG BM. The role of impact forces and foot pronation: A new paradigm [J]. *Clin J Sport Med*, 2001, 11(1): 2-9.
- [35] WEBB P, SARIS WH, SCHOFFELN P, *et al.* The work of walking: A calorimetric study [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1988, 20(4): 331-337.
- [36] 梅齐昌, 顾耀东, 李建设. 基于足部形态特征的跑步生物力学分析[J]. *体育科学*, 2015, 35(6): 34-40.
- [37] VANNATTA CN, KERNOZEK TW. Patellofemoral joint stress during running with alterations in foot strike pattern [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2015, 47(5): 1001-1008.
- [38] GOBLE C, WEGLER J, FOREST CP. The potential hazards of barefoot running: Proceed with caution [J]. *JAA-PA*, 2013, 26(3): 49-53.
- [39] NAGEL A, FERNHOLZ F, KIBELE C, *et al.* Long distance running increases plantar pressures beneath the metatarsal heads: A barefoot walking investigation of 200 marathon runners [J]. *Gait Posture*, 2008, 27(1): 152-155.
- [40] MILNER CE, FERBER R, POLLARD CD, *et al.* Biomechanical factors associated with tibial stress fracture in female runners [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2006, 38(2): 323-328.
- [41] ARENDSE RE, NOAKES TD, AZEVEDO LB, *et al.* Reduced eccentric loading of the knee with the pose running method [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2004, 36(2): 272-277.
- [42] KERRIGAN DC, FRANZ JR, KEENAN GS, *et al.* The effect of running shoes on lower extremity joint torques [J]. *Pm R*, 2009, 1(12): 1058-1063.
- [43] BRAUNSTEIN B, ARAMPATZIS A, EYSEI P, *et al.* Footwear affects the gearing at the ankle and knee joints during running [J]. *J Biomech*, 2010, 43(11): 2120-2125.
- [44] ROMANOV N, ROBSON J. The pose method of running [M]. USA: Pose Tech Corp, 2002.
- [45] DREYER D. Chirunning [M]. New York: Simon and Schuster, 2009.