

文章编号:1004-7220(2018)06-0577-06

不同地面对跑步下肢运动生物力学的影响

张雨, 王琳

(上海体育学院, 上海 200438)

摘要:诸多因素会影响跑步运动损伤的发生,其中内在因素包括人体解剖学因素、受伤史、下肢运动生物力学和运动中的神经肌肉控制等,外在因素包括训练方法、跑步鞋、跑步路面等。跑步路面被认为是造成跑步运动损伤发生的重要潜在风险因素之一。总结不同地面对跑步下肢运动学、动力学、神经肌肉调控、运动损伤方面的影响,发现在不同地面跑步时,人体可能通过自身的神经肌肉调节功能进行运动学调整以获得动力学适应,调节下肢刚度以获得相似的冲击负荷。但是目前关于在不同路面上跑步的生物力学变化,多数研究只关注于运动学、动力学和神经肌肉调控中的某一方面,缺乏更进一步具体的三维运动生物力学数据,以及针对这种生物力学调整的具体神经肌肉调控机制。

关键词:跑步; 路面; 运动学; 动力学; 肌电

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2018.06.016

Influences on Sports Biomechanics of Lower Extremities During Running on Different Surfaces

ZHANG Yu, WANG Lin

(Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China)

Abstract: Risk factors for running injuries can be clustered into intrinsic factors and extrinsic factors. Intrinsic factors include human anatomy, history of previous injuries, sports biomechanics and human neuromuscular control, etc. Extrinsic factors include training method, running shoes and running surfaces, etc. Running surface is considered as one of the most potential risk factors for running injuries. This review summarized the findings on kinematics, kinetics, neuromuscular control and running injuries of lower extremity during running on different surfaces. In general, neuromuscular adjustment may contribute to kinematic adaption during running on different surfaces, and runners can adapt their kinetics and stiffness of lower extremity to achieve similar impact force. However, studies on biomechanical changes during running on different surfaces mainly focus on only one aspect of kinematics, kinetics and neuromuscular regulation. Further studies should focus on three-dimensional biomechanical analysis during running on different surfaces, as well as specific mechanisms of neuromuscular regulation for these biomechanical adjustments.

Key words: running; surfaces; kinematics; kinetics; electromyography (EMG)

跑步因为其简单易行,是深受人类喜爱的体育活动之一。据统计,在美国有超3 000万人参与业

余或竞赛型跑步^[1]。在中国,跑步也是参与人数比例最多的体育锻炼项目^[2]。在中长跑过程中,人体

收稿日期:2017-11-27; 修回日期:2018-01-30

基金项目:国家自然科学基金项目(11572202,11772201)

通信作者:王琳,副教授,E-mail: wanglin.sus@gmail.com

将会承受2.5~3.0倍的地面反作用力。过量和重复的机械负荷作用于人体组织,是导致跑步运动损伤发生的重要机制。有报道,跑步者每年跑步损伤的发生率高达40%~50%^[3]。在跑步的运动损伤中,最常见的损伤部位是膝关节,其次是踝关节和足部,反复的过度负荷可能会引起急性损伤(如扭伤、骨折、膝关节内紊乱)或诸如第2跖骨应力性骨裂/骨折等过劳性损伤^[4]。跑步时,相对较大和重复的地面反作用力会导致过劳性损伤风险的增加^[5]。在诸多影响跑步运动损伤发生的生物力学因素中,跑步路面被认为是一个潜在的风险因素^[6]。研究表明,人体神经肌肉调控系统会根据不同的运动表面的材料特性,主要是硬度(hardness)和摩擦系数(friction coefficient)对跑步运动中的人体运动学和动力学进行调整,以获得较好的跑步经济性和较小的冲击负荷。例如:地面反作用力负荷强度、下肢各个关节的力矩等;在硬度较高的运动表面进行长距离跑步时,易发生积劳性跖骨应力性骨折;而在摩擦力较高的运动表面进行运动时,发生踝关节扭伤几率增加^[7-9]。

长时间跑步会导致疲劳问题是跑步者面临的一个重要问题。针对在不同地面跑步的下肢生物力学分析中,主要是通过腿部力量和跳跃高度测量进行比较,目前尚缺乏在不同路面对于跑步者能量代谢影响的研究。此外,在影响跑步生物力学的因素中,运动鞋也是重要的外在因素。但是有研究表明,无论穿何种鞋,地面反作用力和支撑期时间与地面硬度并不相关。因此,跑步地面是影响跑步下肢生物力学的独立影响因素。

随着科技的进步,跑步的路面也在不断更新,常见的跑步路面有混凝土、草地、橡胶跑道、沥青等地面,跑步机因为其可控速度和坡度也广泛用于训练和实验室研究^[10]。关于在不同路面上跑步的运动学、动力学和神经肌肉调控研究,结论大多是存在争议的。本文以“running surface + biomechanics”“running surface + kinematic”“running surface + kinetic”“running surface + EMG”“running surface + injure”等关键词组合,在PubMed、WOS等数据库进行文献检索,纳入了相关性高、发表时间最近、引用度最高的文章进行综述。从不同地面跑步对下肢运动力学影响的角度,综述国内外在该领域的研

究进展,为进一步的研究提供参考。

1 不同跑步路面对下肢运动学的影响

不同地面跑步的运动学研究主要集中在步态周期、步长、步频及髌、膝、踝各关节角度特征等方面。Hardin等^[11]通过研究3种不同硬度(100、200、350 kN/m)地面对跑步运动学特征的影响发现,在不同硬度地面的情况下,支撑相的时间、步幅周期时间、膝关节最大屈曲角度都不变;但是,随着地面硬度的增加,接触地面时髌、膝关节屈曲角度减小,髌关节最大屈曲角度减小,髌、膝、踝关节的峰值角速度增加。因此,随着跑步路面硬度的变化,跑者会产生运动学适应。通过分析在不同硬度地面上的跑步运动学特征发现,在硬度较低地面上(例如沙地、草坪)跑步,初次触地期和支撑中期髌、膝关节屈曲角度和最大屈曲角度都大于硬地面(例如沥青、混凝土)^[12]。同时,在硬度较低的地面跑步与硬度较高的地面相比,垂直加速度显著降低,或许可以减少胫骨的损伤风险^[13]。

在不同地面跑步,由于个体跑步机制的差异,运动学变量的变化可能并不存在显著性,但存在可观察到的变化。在新型橡胶改性沥青表面和丙烯酸运动表面跑步,不同地面上的运动学变量不存在显著性差异,但是关节初始角度、峰值角度、角速度均存在可观察到的变化差异。在新型橡胶改性沥青表面和丙烯酸运动表面上跑步,踝、膝关节峰值角度呈现增加的趋势^[14],推测与跑步者个体对不同地面适应的机制有所不同有关。未来可以进一步开展不同路面大样本的研究或者将跑步者的纳入标准严格化,观察在不同地面跑步的运动学变量是否存在显著差异。

对于能否将跑步机上测试的结论运用到地面上,一直存在争论。在跑步机上跑步,身体重心的垂直位移低于在地面上跑步;同时,垂直和水平方向的速度变化也会低于地面。在脚初次接触地面时,跑步机上膝关节角度、鞋面与地面夹角都显著低于地面,脚与地面的接触时间明显低于地面上^[15]。在跑步机上跑步时,跑步节奏明显加快,步幅时间和步幅长度明显缩短;同时,膝关节矢状面峰值角度有显著性差异,屈曲与伸直角度都显著小于地面上^[16]。在跑步机上跑步有更长的支持时间、

较低的垂直速度,同时垂直速度和水平速度的变化更少^[17]。Nigg等^[18]通过观察跑者在地面和3个大小和功率不同跑步机上跑步发现,在跑步机和地面上跑步的运动学存在明显差异,大多数下肢运动学变量对于不同跑步者显示出不一致的趋势,故不能将跑步机上的运动学个体评估用于地面上。通过分析在跑步机与地面上跑步的运动曲线发现,髌、膝、后足等关节运动曲线类似,并且范围振幅、范围偏移和相位偏移显示的关节角度相似,最大的差异是后足在接触地面时矢状面的角度,在跑步机上跑步脚的背曲角度明显低于地面^[19]。Sinclair等^[20]通过比较跑者在跑步机和地面条件下跑步时支撑相的下肢三维运动学差异发现,在跑步机上跑步,脚触地期间的髌关节屈曲角度和踝关节偏移的峰值角度都显著减小,同时踝关节外翻的峰值更大,故跑步机上跑步的三维运动学与地面相比显著不同。因此,鉴于在地面上与跑步机上跑步的运动学存在明显差异,把跑步机上的结果运用到地面跑步上还是存在争议的。在临床和研究的设置中,应该谨慎使用跑步机来代替地面跑步。

综上所述,在不同地面跑步,人体的运动学变量存在差异。从运动学角度而言,针对不同的跑步路面,跑步者基本都是通过调节下肢髌、膝、踝的角度达到调节下肢刚度的目的。现有针对因跑步运动表面差异造成人体运动生物力学差异的研究多数围绕矢状面的二维运动学分析及垂直地面作用力的分析展开,这些研究对解释人体跑步时下肢运动损伤发生的原因并不充分,因为冠状面和水平面的关节生物力学变化与运动损伤也有密切的关系。只有进行人体的三维分析,才可能进一步揭示在不同运动表面跑步时人体上述运动学因素的变化特征,从而更多揭示跑步运动损伤发生的原因。

2 不同跑步路面对下肢动力学的影响

研究发现,在沥青和混凝土地面跑步时,所有足底变量和压力区域都是相似的;而在天然草地上跑步时,后脚掌和前脚掌区域会有更大的接触时间和接触面积。在沥青地面上跑步时,在后脚外侧区域会引起更大的负荷;但是在天然草地跑步时,产生的压力峰值显著低于其他地面。因此,如果跑步者控制练习的数量和强度,相比硬度大的地面(沥

青、混凝土),在硬度低的地面(天然草地)跑步时肌肉骨骼系统可能会承受较轻的负荷,可能会减轻运动损伤发生的风险^[21-22]。Fu等^[23]通过分析在水泥地、草地、标准塑胶跑道和室内具有缓冲性能的跑步机和不具有缓冲性能的跑步机上跑步时的足底压力数据发现,在着地过程中,在水泥地、塑胶跑道、不带缓冲型跑步机(不带缓冲)3种不同运动表面上,足底压力峰值(及出现时间)最大压力分布方面差异均不明显;与其他地面相比,草地和缓冲跑步机(带缓冲)均能减小触地时部分压力峰值,但最大压力分布差异不大;同时,在所有地面上,胫骨加速度均无显著性差异。

在跑步过程中,随着地面硬度的变化,下肢腿部的刚度也会进行一定调整,适应不同地面而实现最大的跑步经济性。Kerdok等^[24]通过分析在5种表面硬度(75.4、97.5、216.8、454.2、945.7 kN/m)跑步机上跑步的地面反作用力发现,地面硬度的下降导致跑者的能量代谢率下降和跑步者腿部刚度的增加,但是不同地面硬度对于地面反作用力来说,不存在显著性差异。这说明对于硬度不同的地面,跑步者会通过自身机制调节腿部刚度而达到适应性,地面反作用力并不会产生变化。

在跑步机与地面上跑步的动力学研究也有很多。Riley等^[25]首先通过对地面与跑步机上走路的比较分析发现,两种情况下动力学参数基本相似,差异也都在重复性范围内,故认为在跑步机和地面上的力学非常相似。随后,Riley等^[16]又通过比较在跑步机和地面上跑步的动力学参数发现,跑步机上的峰值推进力和峰值内侧地面反作用力显著降低。进一步将地面分为混凝土地面和草地,并将这两种地面与跑步机上跑步进行对比,发现在跑步机上跑步比混凝土地面和草地,拥有更小的足底最大压力,主要是在内侧前脚掌,大脚趾和小脚趾区域^[26]。与地面跑步相比,跑步机上跑步增加了脚与地面的接触时间,改变了足底压力分布,同时减少了峰值压力,尤其是足跟、内侧跖骨和大脚趾区域^[27]。因此,跑步机与地面上足底压力存在明显差异,并且跑步机上拥有更小的压力峰值,在跑步机上跑步可以作为康复早期一种训练方法,为下肢损伤的人提供较低的足底负荷。

不同硬度的地面对于地面反作用力和足底压

力来说,基本是相似的,但是在硬度较低的地面(如草坪等)和跑步机上,脚与地面的接触时间更长,表现出更大的冲击吸收性能和更小的压力峰值。但是目前大部分研究使用压力鞋垫进行动力学分析,使用三维动作捕捉测力台进行动力学分析的研究较少。因此,需要开展更多三维的分析研究,进一步探讨跑步者在不同运动表面跑步时下肢关节动力学、足底压力的变化。

3 不同跑步路面对神经肌肉控制的影响

在跑步的站立早期,主要是股四头肌肌群和腓绳肌进行制动(即质量中心向后的加速度)和支持(即质量中心向上的加速度),在站立期后半段,主要是腓肠肌和比目鱼肌进行支持和推动(即质量中心向前的加速度)^[28]。目前,多数研究都认为,在不同地面跑步时,下肢的肌肉活动还是有一定差异的,这种差异主要是人体的神经肌肉调控,但是,人们对引起这种改变的人体的神经肌肉调控机制尚不明确。

不同地面跑步的肌电信号的差异大多存在于支撑相中。Wang等^[29]通过比较后足落地习惯的跑者在混凝土地面、塑胶地面、草地、跑步机上跑步的肌电信号发现,不同地面上跑步肌电信号存在差异。在整个步态周期中的摆动期,各肌肉活动强度无明显差异,但是在支撑期,股直肌和股二头肌的肌电信号在跑步机上最低,在混凝土地面最强。研究显示,跑步者分别在地面和跑步机上跑步时,腿部肌肉的肌电信号模式在地面和跑步机模式之间大体相似,但是在地面接触期和摆动早期,在跑步机上跑步,股二头肌有更大更长的信号激活^[8];Baur等^[30]比较跑者在跑步机和地面上的跑步时胫前肌、腓肠肌和比目鱼肌的肌肉活动,结果发现,腓肠肌的肌电信号在地面上激活较跑步机上迟;在推动离地期,比目鱼肌在地面上有较高的振幅。因此,在运动神经肌肉控制研究中,必须考虑跑步机和地上运动之间肌肉活动的差异。

在硬度不同的地面进行跑步运动,下肢的肌电信号会发生变化来适应运动学的变化。硬度较大的硬地面(混凝土、塑胶跑道)和硬度较低的软地面(草地、沙地)上跑步发现,腓绳肌、股内外侧肌、股直肌、阔筋膜张肌在硬度较低的地面上的肌电信号

都大于在硬地面上,同时髌、膝关节运动范围也更大^[12,31]。

通过肌肉表现也可以检验不同运动地面对运动表现的影响。Katkat等^[32]分别测量了篮球运动员在沥青、合成草、天然草、瓦片粉、土壤、木地板和三元乙丙橡胶(EPDM)几种地面下的肌肉表现,结果表明,在木地板和三元乙丙橡胶训练后肌肉疲劳较少,腿部力量和跳跃高度更好;在沥青和合成草训练后肌肉最疲劳,腿部力量和跳跃高度更差。但是,Garcia-Perez等^[27]研究了在地面和跑步机上的疲劳情况发现,跑步表面和疲劳之间没有显著的相互作用。

从神经力学的角度出发,人体的神经肌肉系统可以针对外在环境的改变,利用信号反馈机制使输入和输出信号达到平衡,以适应变化的外部环境^[33]。同时,人体中枢神经系统会对外在环境的改变进行前馈调节,根据不同的环境对外周神经肌肉系统进行预活化以执行恰当的动作^[34]。在不同的地面上,跑者会通过神经肌肉控制及时调整自己的下肢刚度,这种调整会使跑者在跑步时,保持相似的质心运动(例如:维持相同的地面接触时间和步幅频率),而这与地面硬度无关。从硬地面转换成软地面,下肢腿部刚度会增加。通过调整腿部刚度来适应地面刚度,以维持相似的运动学。同时,在不同表面,人体会在新地面的第一步就快速调节腿部姿势以维持身体重心维持不变^[35-36]。相对于在不同运动表面跑步时的人体下肢运动学及力学变化的研究而言,目前对引发这种人体神经肌肉调控机制变化的研究比较缺乏,研究人体神经肌肉系统在不同运动表面跑步时的整合调节可以帮助我们解释上述下肢力学变化的原因。

4 路面对跑步运动损伤的影响

跑步损伤的发生及其相关因素一直是研究的热点。50%~75%的跑步损伤是由于过劳性损伤导致的^[37],并且在人工合成的地面进行体育活动与过劳性损伤的发生率增加有关,其中原因之一就是地面的机械硬度^[38]。但是,不同的研究对于地面机械硬度是否会导致损伤,结论并不一致。有研究报道,跑步损伤的一些因素并不明确或者存在矛盾的结果,但是跑步损伤与年龄、性别、地面硬度等因素

没有联系^[37]。相关研究对跑步损伤发生的原因进行总结,发现有流行病学支持的损伤原因主要是每周的跑步里程数、以前的跑步损伤史、较快的跑步速度和较少的跑步经验,其中影响跑步损伤最强的因素是每周的跑步里程数,并没有提及跑步路面与跑步损伤的关系^[39]。但是,也有研究发现,地面可以降低跑步损伤发生的风险,在较软的地面(跑步机和跑道等)比较硬的地面(混凝土、沥青等)更能降低风险^[40]。

5 问题与展望

综上所述,跑步路面可能会影响下肢的运动学、动力学、足底压力和肌肉的激活,但是在比较不同运动表面跑步时,人体下肢运动学、动力学、及肌肉激活的特征及这些指标之间的相互关系,还没有明确统一的结论。想要验证运动损伤的直接原因存在困难,而跑步的路面与运动损伤的关系基本都是间接的。

未来还需要开展更深入的人体三维运动分析,有助于进一步了解在不同运动表面跑步时人体上述生物力学因素的改变,探讨更多的跑步运动损伤发生的可能机制,从而为合理健身、提高训练表现、预防运动损伤的发生提供更多的理论支持。

参考文献:

- [1] NOVACHEK TF. The biomechanics of running [J]. *Gait Posture*, 1998, 7(1): 77-95.
- [2] 李宇. 我国群众体育发展趋势研究——基于全国3次群众体育调查结果的比较分析[J]. *体育学刊*, 2012, 19(1): 31-34.
- [3] FIELDS KB, SYKES JC, WALKER KM, et al. Prevention of running injuries [J]. *Curr Sports Med Rep*, 2010, 9(3): 176-182.
- [4] TAUNTON JE, RYAN MB, CLEMENT DB, et al. A retrospective case-control analysis of 2002 running injuries [J]. *Brit J Sport Med*, 2002, 36(2): 95-101.
- [5] HRELJAC A. Impact and overuse injuries in runners [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2004, 36(5): 845-849.
- [6] NIGG BM, YEADON MR. Biomechanical aspects of playing surfaces [J]. *J Sports Sci*, 1987, 5(2): 117-145.
- [7] DUFEK JS, MERCER JA, GRIFFIN JR. The effects of speed and surface compliance on shock attenuation characteristics for male and female runners [J]. *J Appl Biomech*, 2009, 25(3): 219-228.
- [8] TESSUTTI V, TROMBINISOUZA F, RIBEIRO AP, et al. In-shoe plantar pressure distribution during running on natural grass and asphalt in recreational runners [J]. *J Sci Med Sport*, 2010, 13(1): 151-155.
- [9] LY QH, ALAOUI A, ERLICHER S, et al. Towards a footwear design tool: Influence of shoe midsole properties and ground stiffness on the impact force during running [J]. *J Biomech*, 2010, 43(2): 310-317.
- [10] LAVCANSKA V, TAYLOR NF, SCHACHE AG. Familiarization to treadmill running in young unimpaired adults [J]. *Hum Mov Sci*, 2005, 24(4): 544-557.
- [11] HARDIN EC, BOGERT AJ, HAMILL J. Kinematic adaptations during running: Effects of footwear, surface, and duration [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2004, 36(5): 838-844.
- [12] PINNINGTON HC, LLOYD DG, BESIET TF, et al. Kinematic and electromyography analysis of submaximal differences running on a firm surface compared with soft, dry sand [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2005, 94(3): 242-253.
- [13] BOEY H, AELES J, SCHÜTTE K, et al. The effect of three surface conditions, speed and running experience on vertical acceleration of the tibia during running [J]. *Sport Biomech*, 2017, 16(2): 166-176.
- [14] DIXON SJ, COLLOP AC, BATT ME. Surface effects on ground reaction forces and lower extremity kinematics in running [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2000, 32(11): 1919-1926.
- [15] WANK V, FRICK U, SCHMIDTBLEICHER D. Kinematics and electromyography of lower limb muscles in overground and treadmill running [J]. *Int J Sports Med*, 1998, 19(7): 455-461.
- [16] RILEY PO, DICHARRY J, FRANZ J, et al. A kinematics and kinetic comparison of overground and treadmill running [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2008, 40(6): 1093-1100.
- [17] NELSON RC, DILLMAN CJ, LAGASSE P, et al. Biomechanics of overground versus treadmill running [J]. *Med Sci Sport*, 1972, 4(4): 233-240.
- [18] NIGG BM, BOER RW, FISHER V. A kinematic comparison of overground and treadmill running [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1995, 27(1): 98-105.
- [19] FELLIN RE, MANAL K, DAVIS IS. Comparison of lower extremity kinematic curves during overground and treadmill running [J]. *J Appl Biomech*, 2010, 26(4): 407-414.
- [20] SINCLAIR J, RICHARDS J, TAYLOR PJ, et al. Three-dimensional kinematic comparison of treadmill and overground running [J]. *Sport Biomech*, 2013, 12(3): 272-282.
- [21] TESSUTTI V, TROMBINISOUZA F, RIBEIRO AP, et al. In-shoe plantar pressure distribution during running on natural grass and asphalt in recreational runners [J]. *J Sci*

- Med Sport, 2010, 13(1): 151-155.
- [22] TESSUTTI V, RIBEIRO AP, TROMBINISOUZA F, *et al.* Attenuation of foot pressure during running on four different surfaces: Asphalt, concrete, rubber, and natural grass [J]. J Sport Sci, 2012, 30(14): 1545-1550.
- [23] FU WJ, FANG Y, LIU MS, *et al.* Surface effects on in-shoe plantar pressure and tibial impact during running [J]. J Sport Health Sci, 2015, 4(4): 384-390.
- [24] KERDOK AE, BIEWENER AA, MCMAHON TA, *et al.* Energetics and mechanics of humans running on surfaces of different compliance [J]. J Appl Physiol, 2002, 92(2): 469-478.
- [25] RILEY PO, PAOLINI G, CROCE UD, *et al.* A kinematic and kinetic comparison of overground and treadmill walking in healthy subjects [J]. Gait Posture, 2007, 26(1): 17-24.
- [26] HONG Y, WANG L, LI JX, *et al.* Comparison of plantar loads during treadmill and overground running [J]. J Sci Med Sport, 2012, 15(6): 554-560.
- [27] GARCÍA-PÉREZ JA, PÉREZ-SORIANO P, LLANA S, *et al.* Effect of overground vs treadmill running on plantar pressure: Influence of fatigue [J]. Gait Posture, 2013, 38(4): 929-933.
- [28] HAMNER SR, SETH A, DELP SL. Muscle contributions to propulsion and support during running [J]. J Biomech, 2010, 43(14): 2709-2716.
- [29] WANG L, HONG Y, LI JX. Muscular activity of lower extremity muscles running on treadmill compared with different overground surfaces [J]. Am J Sport Sci Me, 2014, 2(4): 161-165.
- [30] BAUR H, HIRSCHMULLER A, MULLER S, *et al.* Muscular activity in treadmill and overground running [J]. Isokinet Exer Sci, 2007, 15(3): 165-171.
- [31] WISSEMANN I, POTTHAST W, BRÜGGEMANN GP. Changes in EMG signals while running on different surfaces [C]//Proceedings of XXIV ISBS Symposium. Salzburg: [s. n.], 2006.
- [32] PAI YC, WENING JD, RUNTZ EF, *et al.* Role of feedforward control of movement stability in reducing slip-related balance loss and falls among older adults [J]. J Neurophysiol, 2003, 90(2): 755-762.
- [33] KARAMANIDIS K, ARAMPATZIS A. Mechanical and morphological properties of different muscle-tendon units in the lower extremity and running mechanics: Effect of aging and physical activity [J]. J Exp Biol, 2005, 208(20): 3907-3923.
- [34] 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.
- [35] FERRIS DP, LOUIE M, FARLEY CT. Running in the real world: Adjusting leg stiffness for different surfaces [J]. Proc Biol Sci, 1998, 265(1400): 989-994.
- [36] MECHELEN W. Running injuries. A review of the epidemiological literature [J]. Sports Med, 1992, 14(5): 320-335.
- [37] ANDRÉASSON G, PETERSON L. Effects of shoe and surface characteristics on lower limb injuries in sports [J]. Int J Sport Biomech, 2010, 2(3): 202-209.
- [38] HOEBERIGS JH. Factors related to the incidence of running injuries [J]. Sports Med, 1992, 13(6): 408-422.
- [39] JIN J. Running injuries [J]. J Am Med Assoc, 2014, 312(2): 202-202.
- [40] YAMIN NAAA, ALI AMRAN MN, BASARUDDIN KS, *et al.* Ground reaction force response during running on different surface hardness [J]. ARPN J Eng Appl Sci, 2017, 12(7): 2313-2318.