

糖尿病患者足底压力变化研究进展

黄依心, 张弛*

湖南师范大学附属第一医院内分泌科, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年4月14日; 录用日期: 2025年5月7日; 发布日期: 2025年5月15日

摘要

糖尿病是一种普遍存在的慢性代谢性疾病, 它引发的继发性病变对患者健康状态造成了严重损害。在众多并发症里, 糖尿病因其明显的发病率以及致残性受到了广泛关注, 常常会造成截肢等严重后果。研究显示足底生物力学参数的改变在这个病理过程中起到了关键作用。本文详细阐述了糖尿病及其足部并发症的基本特点, 研究了足底生物力学指标和糖尿病足的相关性, 还分析了致使足底压力异常的危险因素, 基于此本研究收集了当前主流的足底力学检测技术, 并且梳理了相关的干预策略, 通过整合分析现有文献, 本文想要为糖尿病足的临床防治工作提供科学依据和实践方面的参考, 同时也为该领域的研究明确方向。

关键词

糖尿病, 足部压力, 压力分布

Research Progress on Plantar Pressure Alterations in Diabetic Patients

Yixin Huang, Chi Zhang*

Department of Endocrinology, First Affiliated Hospital of Hunan Normal University, Changsha Hunan

Received: Apr. 14th, 2025; accepted: May 7th, 2025; published: May 15th, 2025

Abstract

Diabetes is a prevalent chronic metabolic disorder that induces secondary complications causing severe damage to patients' health. Among various complications, diabetes has attracted widespread attention due to its notable incidence and disabling nature, often leading to severe consequences such as amputations. Studies have demonstrated that alterations in plantar biomechanical parameters play a pivotal role in this pathological process. This paper elaborates on the fundamental

*通讯作者。

characteristics of diabetes and its foot complications, investigates the correlation between plantar biomechanical indicators and diabetic foot pathogenesis, and analyzes risk factors contributing to abnormal plantar pressure. Based on these findings, this study compiles current mainstream plantar pressure measurement technologies and systematically reviews related intervention strategies. Through a comprehensive analysis of existing literature, this research aims to provide a scientific basis and practical references for clinical prevention and management of diabetic foot, while also clarifying future research directions in this field.

Keywords

Diabetes, Plantar Pressure, Pressure Distribution

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

糖尿病是一种典型表现为持续性血糖升高的代谢障碍, 主要是因为胰岛 β 细胞功能有缺陷, 或者外周组织对胰岛素的敏感性降低[1]。这种疾病引起的糖代谢紊乱, 会对机体多个系统慢慢造成损害, 像神经组织、循环系统、视觉器官、泌尿系统以及下肢等都会受到影响[2]。在众多和糖尿病有关的并发症里, 糖尿病因其严重的临床后果, 受到了国际社会的普遍关注[3]。根据国际糖尿病联盟的统计数据, 在全球范围内, 每隔半分钟就会有一个糖尿病患者因为下肢血管病变而进行截肢手术, 这类患者每年的截肢发生率是 22%, 同时还有 11% 的年死亡风险[4]。该并发症不仅显著降低了患者的生存质量, 也给公共卫生体系和经济发展带来了很大压力。糖尿病足的病理机制包含多种因素, 其中足底生物力学特征发生改变, 在这种病的发生发展过程中起着关键作用, 所以去系统研究糖尿病患者足底压力分布的规律, 对糖尿病足的早期预防和有效治疗有很大的临床价值[5] [6]。

2. 糖尿病足概述

糖尿病足是糖尿病较为重要的慢性并发症中的一种, 主要呈现出足部疼痛、深度溃疡以及肢端坏疽等一系列综合症状[7]。该病症的临床表现存在明显的差异性, 从轻的皮肤干燥、温度不一样和感觉有障碍, 到严重的溃疡形成、组织坏死, 甚至到不得不进行截肢处理[8]。它的病理机制包含多种因素起作用, 最重要的是持续高血糖引起的血管损伤、神经功能不正常以及继发感染等[9]。长期处于高血糖状态会让血管内皮受到损害, 引起动脉粥样硬化以及管腔变狭窄, 影响足部的微循环, 造成组织缺血[10]。致使患者很难察觉到足部创伤或者感染的迹象[5]。与此同时糖尿病患者的免疫防御能力降低, 更容易受到细菌或者真菌等病原微生物的侵犯, 这样就加剧了足部病变的程度[11]。

3. 足底压力的生物力学基础

3.1. 足底压力的定义与功能

足底承受的力量主要源于人体站立或者移动时所产生的体重负荷[6]。一般而言足底受力呈现出较为明显的对称特性以及特定的分布模式, 在人体运动的时候, 足跟部、第一跖骨与第二跖骨处常常会表现出负荷集中的现象, 这些特定的解剖部位因为拥有丰富的脂肪组织以及出色的缓冲性能, 所以可有效地避免足部软组织受到机械性损伤[12]。足底负荷的合理分配不仅关乎足部功能能否正常发挥, 还是保证人

体步态稳定性的关键所在。

3.2. 足底压力与糖尿病足的关系

在糖尿病患者当中, 足底压力的分布模式和健康人群相比有着明显差异, 具体呈现出特定区域压力水平要么异常升高要么降低的情况[13]。长期处于高血糖状态一般会引起神经病变以及血管病变等并发症, 这些病理变化致使患者足底的感觉神经功能受到损害, 使得他们对足部压力以及损伤的感知能力大幅下降甚至完全丧失[14]。健康的个体可凭借感知足底压力分布并且及时调整步态, 这样就能避免局部组织长时间受到压迫, 不过糖尿病患者因为感知功能出现损伤, 很难及时察觉到足底压力的异常变化, 要是这种状况一直持续下去, 就会造成足底特定区域像足跟、足弓或者前掌承受过高的持续压力[15]。持续的高压状态会妨碍足底组织的血液循环, 引发缺血性改变, 在缺血的条件下, 足底组织由于缺少充足的氧气和营养供应, 会慢慢出现功能衰退以及细胞死亡, 随着病程不断发展, 这些受损区域容易形成足底溃疡, 如果没有得到及时有效的治疗, 溃疡可能会恶化变成坏疽, 对患者的足部健康乃至生命造成严重威胁。由此可看出足底压力和糖尿病足之间存在着复杂且紧密的关联, 有效控制足底压力是预防糖尿病足的关键举措。

4. 糖尿病患者足底压力分布的变化

糖尿病患者足底压力分布有着明显不均衡的特征, 有研究显示糖尿病足的压力分布模式大多集中在前足区域, 这里是神经性溃疡容易高发的区域, 其中跖骨头承受的负荷格外突出, 前足承受较大压力, 原因在于软组织厚度变化以及跖骨头突出等解剖学特征。根据 Lord 等人的研究数据, 跖骨区域集中了大约 60% 的峰值压力[16], 对于伴有周围神经病变的糖尿病患者, 其足底压力主要集中在前足跖骨头, 而没有周围神经病变的患者则表现为足弓与第二趾区域压力明显降低, 同时第二跖骨头部位压力明显上升[17]。糖尿病患者足底剪应力水平也出现了异常升高的趋势, 这种异常主要集中在前足内侧的第一跖骨头区域[18]。

5. 糖尿病患者足底压力改变的危险因素

5.1. 结构性改变的危险因素

糖尿病患者足部解剖结构出现异常是导致其发生结构性改变的一个重要诱因, 这样的改变会引起足底压力分布失衡, 明显增加足部溃疡出现的概率, 具体来讲结构性改变主要体现为足部形态异常、胼胝、足弓病变以及关节功能障碍等情况, 具体如下。

5.1.1. 足部形态异常

拇外翻、锤状趾以及爪形趾属于足部形态出现典型的状况, 在这些当中拇外翻的特点是大拇趾朝着侧方偏移并且第一跖骨出现内收, 这样的解剖学变化[19]不但会对足底正常结构产生影响, 还会引起该区域压力负荷变得过大, 与此同时或许会伴有疼痛以及局部红肿等症状。锤状趾呈现出趾端向下屈曲的状态, 其形态特点和锤头类似, 这种异常形态会让趾关节承受异常负荷, 接着就会引发疼痛以及活动受到限制, 爪形趾是以趾端呈现出爪状弯曲作为特征, 同样会致使足底压力分布失去平衡, 让趾部区域承受不均匀的压力[20]。糖尿病患者的神经血管病变会让他们更容易出现上述足部形态异常, 造成足底压力分布失衡。

5.1.2. 足弓结构异常

足弓高度出现异常情况(其中涵盖高弓足和扁平足)会明显影响足底的稳定性, 引起压力分布失衡, 高

弓足患者在负重的时候常常会出现外侧承重的倾向,致使前足外侧压力集中,而中足区域压力相对不足,要是不及时进行干预,就有可能诱发锤状趾,这种现象和糖尿病患者关系紧密,并且高弓足还是足底高压的主要形成原因[21]。相反足弓过低或者消失会造成足底中部承受很大压力,因为缺少足弓的支撑作用,没办法有效分散压力负荷,这可能引发疼痛、疲劳以及足部结构的变化[22]。

5.1.3. 胼胝

当足底承受过大的压力时易形成胼胝,胼胝即由于长期受压,足部某些区域可能形成角质层增厚[23]。胼胝的形成进一步改变了足底压力的分布,使得压力更加集中在这些区域,形成恶性循环。研究表明,25%年轻糖尿病患者(11~24岁)患有足底压力升高和/或足底水泡(肿块、组织增厚-足底愈合组织)[24]。受影响的区域是成年后发生某种足部疾病的高风险区域。生物力学的变化会增加水泡、皲裂和畸形的发生,也增加了足部溃疡的风险。

5.1.4. 关节功能障碍

糖尿病患者普遍存在关节活动度下降的现象,研究显示近30%的患者在其主要或次要关节均表现出不同程度的运动功能异常[16]。此类关节活动受限现象直接影响着足底压力的动态分布特征。基于糖尿病引发的肌群萎缩与关节僵直,患者的步态模式及足部位置往往发生显著变化,这些改变促使足底压力分布出现异常。这种异常的力学分布可能导致局部区域压力值显著上升,进而提升足部组织受损的概率。值得注意的是,踝关节与第一跖趾关节活动受限主要归因于韧带组织的纤维化与长度缩减,这种病理改变会引发足前部区域压力负荷的异常增高[15]。

5.2. 功能性改变的危险因素

足部功能异常的风险源主要源于神经系统和循环系统病变引发的压力感知与调控功能障碍。具体影响因素涵盖糖尿病相关神经损伤、血管病变、体质量、疾病持续时间、性别差异、血糖调控水平以及步态紊乱等,具体如下。

5.2.1. 糖尿病周围神经病变

糖尿病患者的神经病变会损害足部肌群的控制功能,引发步态紊乱或足部受力分布不均,致使特定足底区域承受异常高压,显著提升足部损伤概率[25]。此外,该病变还会削弱或完全丧失足底压力感知能力,导致患者无法及时察觉足部疼痛或不适。这种感知功能的减退会进一步影响足部压力的自主调节,从而显著增加足部溃疡的发生风险[26]。研究数据显示,轻度糖尿病神经病变患者的前足压力时间积分显著升高,且随着病程进展,足底压力异常现象更为明显[27]。Caravaggi等[28]的研究指出,前足区域的压力分布特征与糖尿病神经病变的类型、病程长短及病变程度存在显著相关性。Payne等[29]的研究进一步证实,神经病变相关参数在糖尿病足底压力分布中具有决定性影响,尤其在拇趾、第一跖骨头和足跟等特定区域表现尤为突出。

5.2.2. 糖尿病周围血管病变

下肢动脉功能异常可引发足部血液循环障碍,进而延缓创面修复进程。此外,血管功能障碍还会降低足部组织的柔韧性,使其更易遭受外力损伤[17]。临床观察表明,患有下肢动脉病变的个体在活动或静止状态下均可能产生缺血性疼痛,这种状况往往导致足底压力分布失衡。

5.2.3. 体重和 BMI

足底压力的核心影响因素为体重指数,研究表明两者之间存在显著的正向关联[30]。对于糖尿病患者而言,超重被证实是足底压力升高的独立风险因素。与健康群体相比,糖尿病患者的平均体重及体重指

数均显著偏高, 研究数据进一步证实, 这些指标的提升与足底压力值及其区域分布的增高具有密切关联[31]。相关研究[26]显示, 当患者体重指数超过 35 kg/m^2 时, 其足部外侧和中足区域承受的压力最为显著; 体质量超标不仅与足底压力异常及其分布特征相关, 还容易诱发多种足部疾患, 包括跟腱炎症和疣状增生等; 同时, 体重的增加还会导致肌肉组织损伤以及内侧纵弓形态发生病理性改变, 这些因素共同作用促使足底压力及其分布模式出现异常[32]。

5.2.4. 病程

糖尿病患者的足底压力分布模式异常会导致稳定性较差, 随着时间的推移, 这种稳定性改变会发展为许多足部并发症[12]。Xu 等[16]研究结果显示, 糖尿病患者在发病 5 年内拇趾峰值压力呈上升趋势, 随后随着病程的延长呈现明显的下降趋势。这是因为早期轻度糖尿病患者并发神经病变率增加, 进而导致足底压力异常; 但随着糖尿病病程的进一步增加, 峰值压力逐渐下降归因于中度或重度糖尿病患者神经病变加重和动脉疾病导致的皮肤敏感性降低所致, 可能还与骨痂形成和其他已知或未知因素有关。当下肢的周围神经和动脉逐渐退化, 可能导致感觉和运动障碍, 从而影响糖尿病足部的生物力学, 如踝关节运动学、步态动力学和足底压力分布[20]。也有部分证据表明, 患病超过 10 年的糖尿病患者的跖骨和足跟部位的压力 - 时间积分明显增加。跖骨头部压力 - 时间积分较高表明, 随着时间推移这些部位可能会出现溃疡, 尤其是压力相关性溃疡, 因为已证明高压 - 时间积分与糖尿病患者的溃疡有关[33]。

5.2.5. 其他相关因素

糖尿病患者的步态可能会出现异常, 如步幅减小、步速减慢等。这些步态异常会改变足底压力的分布模式, 增加某些区域的压力[34]。糖化血红蛋白水平升高也是导致组织破坏的关键因素。但 Ahroni 等[35]证明, 糖化血红蛋白并不是足底压力的独立因素。糖化血红蛋白和踝臂指数变化与第一跖骨头最大力和最大压力变化呈正相关。年龄也可能影响糖尿病患者足底压力的改变。随着年龄的增长[36], 人体的肌肉、骨骼和软组织逐渐退化, 对足底压力的承受能力减弱。胆固醇的变化与足跟外侧部分的脉冲变化和第二跖骨头的压力 - 时间积分变化呈正相关; 甘油三酯水平的变化与足底压力的变化无关[37]。关于脂质和足底压力参数之间的关联的研究很少。糖尿病患者神经病变症状评分和锁骨下静脉变化与足底压力的变化呈正相关, 但足部感觉与足底压力水平无关; 在研究过程中, 足底压力的变化也与感染、水泡和老茧的出现有关[38]。

综上所述, 糖尿病足溃疡是组织超负荷的结果, 通过瞬间的高压力或足底神经病变足部区域上未被发现的重复低至中等压力的积累[39]。动物模型研究表明, 机械负荷的重复与负荷的大小同样重要, 以及反复暴露于压力事件可降低组织损伤的阈值[40]。外部机械应力是一个复合值, 包括负荷施加方向、时间(重复、持续时间和速率)和大小(力/面积); 不仅是组织超负荷会导致组织破坏。机械负荷不足可能先于足底组织的机械超负荷。糖尿病和周围神经病变患者在溃疡形成前负重活动减少或变化, 表明负重活动的减少会形成一种生理环境, 导致外皮组织萎缩和组织对压力的抵抗力降低[41]。因此, 组织损伤的阈值可能会降至一项简单事件如一次异常长的步行或换鞋, 就会引发组织损伤。

针对上述研究结论, 糖尿病患者足底负荷水平的异常变化值得临床重点关注。通过持续追踪足底负荷的动态变化, 有助于实现足部病变的早期识别, 从而实施针对性的干预方案, 有效降低足部相关并发症的发生风险。

6. 足底压力检测方法

足底压力检测是评估糖尿病患者足底力学特征变化的一项关键技术, 它的测量方式主要可以分成静态和动态这两类, 静态评估一般是借助压力分布平台或者压力传感垫来完成的, 受试者处于站立状态时,

通过内置传感器获得足底各个区域的负荷分布数据。这种办法可有效评估站立姿态下的足底力学特征, 能为潜在足部病变的筛查提供依据, 不过它的局限性是没办法反映运动状态下的足底负荷变化[42], 动态评估采用智能鞋垫或者步态分析系统, 通过实时记录受试者行走过程里的足底负荷变化, 全面评估运动状态下的足底力学特征和步态模式, 可发现异常负荷分布以及步态问题[43]。该方法有实时监测、连续记录、无创检测等优势, 已经成为足底负荷评估的重要技术手段, 各种检测方法都有独特的优势和局限性, 选择的时候需要综合考虑研究目的以及临床应用需求, 比如鞋内系统更适合实际场景, 压力平台能提供更精确的实验数据。所以充分了解检测目标和具体要求, 对选择合适的足底负荷评估方法有着决定性意义。

7. 足底压力干预措施的研究进展

为应对糖尿病患者足底压力异常, 临床实践中主要采取药物治疗、矫形装置及鞋垫干预以及外科手术等策略。

7.1. 药物治疗

控制血糖、血脂以及血压这些关键指标是糖尿病足管理的核心部分, 药物干预在这个过程里能起到重要作用, 有研究显示神经生长因子和抗氧化剂等药剂对于改善神经和血管病变有明显效果, 可帮助缓解足底压力异常的症状[44]。不过药物的疗效存在个体差异, 而且长期使用可能会引起不良反应, 所以应该根据患者的个体特征来制定针对性的用药方案。

7.2. 矫形装置与鞋垫干预

在糖尿病足的预防跟治疗当中, 矫形装置以及鞋垫的应用有着重要意义, 经过定制化设计, 这些设备可让足底压力分布得到优化, 减轻特定区域的压力负担, 这样能有效预防溃疡形成, 随着技术不断发展, 集成了传感器跟智能算法的智能鞋垫渐渐在临床实践里得到应用, 它可以实时监测足底压力数据, 还可以依据患者需求动态调整支撑特性, 实现个性化健康管理。临床研究说明, 矫形装置跟鞋垫的使用能明显降低糖尿病足溃疡风险, 提高患者生活质量[45]。

7.3. 外科干预措施

当糖尿病足溃疡或者感染的程度变得较为严重时, 采用外科手段常常会变成一种必不可少的选择, 常见的外科操作包含病灶清理、脓液引流、皮肤移植以及肢体切除等, 这类干预的核心目标在于及时去除坏死组织、遏制感染蔓延并加速创面修复。然而, 外科治疗并非毫无风险, 有可能引起继发感染、术中出血以及愈合障碍等不良后果。鉴于此, 此类治疗必须在具备专业资质的医师监督下审慎开展, 同时需确保术后护理及康复方案得到严格执行[46] [47]。

8. 未来研究方向展望

智能鞋垫是一种能够实时监测和调节足底压力的新型技术, 也是一种集成了传感器和智能技术的鞋垫, 旨在监测步行过程中的足底压力及活动量等信息[48]。智能鞋垫通常内置传感器和算法, 如压力传感器、加速度计和陀螺仪等, 用于实时监测足底的压力分布、步态特征和姿势变化, 同时能够精确测量和记录足底的压力分布数据。通过分析这些数据, 医生和患者可以更好地了解足底压力的变化情况, 从而采取相应的干预措施[49]。

在糖尿病患者的足部管理中, 智能鞋垫可以帮助医生监测患者的足底压力分布, 及时发现异常情况, 预防并发症的发生。目前有足够、高质量的证据支持使用智能鞋垫缓解足底压力来预防糖尿病足溃疡复

发。基于智能鞋垫的压力监测与调节是预防和治疗糖尿病足部病变的重要手段[50]。通过实时监测足底压力数据, 医生和患者可以及时发现问题并采取针对性的干预措施。例如, 可以根据数据调整鞋袜的选择和使用, 以及改善患者的步态和行走习惯。同时, 智能鞋垫的自动调节功能也可以在一定程度上缓解足底压力过大的问题, 减轻患者的痛苦。

智能鞋垫还可以用于分析糖尿病患者的步态。通过监测步态, 可以检测出患者可能存在的异常行走模式, 如跛行或不稳定的步态, 从而提供个性化的康复建议或矫正措施, 以减轻足部压力和改善步态。因为每个模块上方可变形以实现预期压力重新分布[51]。

利用智能鞋垫监测糖尿病患者的足底压力变化, 可以及早发现足部问题, 预防足部溃疡和其他并发症的发生。医生可以根据智能鞋垫收集的数据, 制定个性化的预防措施和治疗方案, 帮助患者有效管理糖尿病足[35]。在日常活动中提醒患者足底压力高风险时期的技术, 从而使他们能够在这些时期积极减轻压力, 可能是一种有益的糖尿病足溃疡预防策略。

9. 结论

糖尿病患者足底压力变化研究是个包含技术、临床以及预防治疗的综合性课题, 经过持续研究与实践, 能为糖尿病患者提供更有效的管理和治疗办法, 减少足部并发症出现, 智能鞋垫技术在监测糖尿病患者足底压力变化方面的研究一直在不断发展。这项技术能协助医生更好地知晓患者的步态、足底压力分布以及可能存在的足部问题, 这样就能及时采取预防或治疗举措, 减少并发症发生。

研究人员对大量糖尿病患者的临床数据做分析, 探究足底压力与糖尿病足病变之间的相关性, 找寻可能的影响因素和预测指标。这些数据分析可为临床医生提供更精准的诊断和治疗建议, 助力减少并发症发生, 依据足底压力变化的研究结果, 研究人员不断探寻预防和治疗糖尿病足病变的策略, 这涵盖通过足部保健、矫正步态、减轻足底压力等途径来降低患者的足部病变风险, 提升其生活质量和健康状况。为预防糖尿病并发症, 得保持正常血糖水平, 接受合适且充分的医疗护理、参与治疗、合理饮食、进行身体活动, 穿干净衣服和足够舒适的鞋子, 让足部保持健康, 它能承受不同程度阻力, 它在改善糖尿病控制、提高糖尿病患者生活质量、预防与疾病相关并发症并延长预期寿命方面收获很大成功。目前糖尿病患者足底压力变化研究在技术和临床应用方面都有明显进展, 为糖尿病患者的康复和管理提供了更有效的手段, 未来伴随科技进步和医学研究深入, 糖尿病患者足底压力变化的研究将展现出更广阔的发展前景, 通过跨学科合作、制定个体化治疗策略以及深入基础研究, 能为糖尿病足的预防和治疗提供有力支持, 明显提升患者的生存质量和社会适应能力。

参考文献

- [1] American Diabetes Association (2014) Diagnosis and Classification of Diabetes Mellitus. *Diabetes Care*, **37**, S81-S90. <https://doi.org/10.2337/dc14-s081>
- [2] Hippisley-Cox, J. and Coupland, C. (2016) Diabetes Treatments and Risk of Amputation, Blindness, Severe Kidney Failure, Hyperglycaemia, and Hypoglycaemia: Open Cohort Study in Primary Care. *British Medical Journal*, **352**, i1450. <https://doi.org/10.1136/bmj.i1450>
- [3] Ong, K.L., Stafford, L.K., McLaughlin, S.A., et al. (2021) Global, Regional, and National Burden of Diabetes from 1990 to 2021, with Projections of Prevalence to 2050: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *The Lancet*, **402**, 203-234.
- [4] Lewis, J.E., Morris, K., Powell, T., Thomas, R.L. and Owens, D.R. (2020) Combining Diabetic Foot and Retinopathy Screening: A Step in the Right Direction—A Feasibility Study. *SAGE Open Medicine*, **8**, Article 2050312120946244. <https://doi.org/10.1177/2050312120946244>
- [5] 赵婷丽, 高妍, 贾兴泽, 等. 糖尿病周围神经病变患者足底压力参数变化与神经传导速度的关系[J]. 卒中与神经疾病, 2023, 30(4): 388-394.
- [6] 董晶晶, 魏玉龙, 胡庆川, 等. 基于足底压力探讨调息训练对人体平衡能力的影响[J]. 中华中医药杂志, 2022,

- 37(8): 4856-4859.
- [7] Wang, X., Yuan, C., Xu, B. and Yu, Z. (2022) Diabetic Foot Ulcers: Classification, Risk Factors and Management. *World Journal of Diabetes*, **13**, 1049-1065. <https://doi.org/10.4239/wjd.v13.i12.1049>
 - [8] Khanolkar, M.P., Bain, S.C. and Stephens, J.W. (2008) The Diabetic Foot. *QJM*, **101**, 685-695. <https://doi.org/10.1093/qjmed/hcn027>
 - [9] Deng, H., Li, B., Shen, Q., Zhang, C., Kuang, L., Chen, R., *et al.* (2023) Mechanisms of Diabetic Foot Ulceration: A Review. *Journal of Diabetes*, **15**, 299-312. <https://doi.org/10.1111/1753-0407.13372>
 - [10] McDermott, K., Fang, M., Boulton, A.J.M., Selvin, E. and Hicks, C.W. (2022) Etiology, Epidemiology, and Disparities in the Burden of Diabetic Foot Ulcers. *Diabetes Care*, **46**, 209-221. <https://doi.org/10.2337/dci22-0043>
 - [11] Guerra, F.V., Lee, T.Y.T., Eagers, E.P.S., Marcucci Chakkour, M., Marchi Neto, N.D., Bergamasco, J.M.P., *et al.* (2024) Estudo Epidemiológico de Pacientes Com Pé Diabético. *Journal of the Foot & Ankle*, **18**, 111-115. <https://doi.org/10.30795/jfootankle.2024.v18.1727>
 - [12] Cavanagh, P.R., Morag, E., Boulton, A.J.M., Young, M.J., Deffner, K.T. and Pammer, S.E. (1997) The Relationship of Static Foot Structure to Dynamic Foot Function. *Journal of Biomechanics*, **30**, 243-250. [https://doi.org/10.1016/s0021-9290\(96\)00136-4](https://doi.org/10.1016/s0021-9290(96)00136-4)
 - [13] Ahsan, M., Shanab, A. and Nuhmani, S. (2021) Plantar Pressure Distribution among Diabetes and Healthy Participants: A Cross-Sectional Study. *International Journal of Preventive Medicine*, **12**, 88. https://doi.org/10.4103/ijpvm.ijpvm_257_20
 - [14] Duan, Y., Ren, W., Liu, W., Li, J., Pu, F. and Jan, Y. (2022) Relationship between Plantar Tissue Hardness and Plantar Pressure Distributions in People with Diabetic Peripheral Neuropathy. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **10**, Article 836018. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.836018>
 - [15] Lu, Y.C., Mei, Q.C. and Gu, Y.D. (2015) Plantar Loading Reflects Ulceration Risks of Diabetic Foot with Toe Deformation. *BioMed Research International*, **2015**, 1-6. <https://doi.org/10.1155/2015/326493>
 - [16] Lord, M. and Hosein, R. (2000) A Study of In-Shoe Plantar Shear in Patients with Diabetic Neuropathy. *Clinical Biomechanics*, **15**, 278-283. [https://doi.org/10.1016/s0268-0033\(99\)00076-5](https://doi.org/10.1016/s0268-0033(99)00076-5)
 - [17] Cao, Z., Wang, F., Li, X., Hu, J., He, Y. and Zhang, J. (2022) Characteristics of Plantar Pressure Distribution in Diabetes with or without Diabetic Peripheral Neuropathy and Peripheral Arterial Disease. *Journal of Healthcare Engineering*, **2022**, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2022/2437831>
 - [18] Caselli, A., Pham, H., Giurini, J.M., Armstrong, D.G. and Veves, A. (2002) The Forefoot-to-Rearfoot Plantar Pressure Ratio Is Increased in Severe Diabetic Neuropathy and Can Predict Foot Ulceration. *Diabetes Care*, **25**, 1066-1071. <https://doi.org/10.2337/diacare.25.6.1066>
 - [19] Menz, H.B., Roddy, E., Marshall, M., Thomas, M.J., Rathod, T., Myers, H., *et al.* (2015) Demographic and Clinical Factors Associated with Radiographic Severity of First Metatarsophalangeal Joint Osteoarthritis: Cross-Sectional Findings from the Clinical Assessment Study of the Foot. *Osteoarthritis and Cartilage*, **23**, 77-82. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2014.10.007>
 - [20] Bus, S.A., Maas, M., de Lange, A., Michels, R.P.J. and Levi, M. (2005) Elevated Plantar Pressures in Neuropathic Diabetic Patients with Claw/Hammer Toe Deformity. *Journal of Biomechanics*, **38**, 1918-1925. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.07.034>
 - [21] Buldt, A.K., Forghany, S., Landorf, K.B., Levinger, P., Murley, G.S. and Menz, H.B. (2018) Foot Posture Is Associated with Plantar Pressure during Gait: A Comparison of Normal, Planus and Cavus Feet. *Gait & Posture*, **62**, 235-240. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.03.005>
 - [22] Chang, C., Yang, W., Wu, C. and Chang, L. (2022) Would Foot Arch Development in Children Characterize a Body Maturation Process? A Prospective Longitudinal Study. *Biomedical Journal*, **45**, 828-837. <https://doi.org/10.1016/j.bj.2021.10.012>
 - [23] 曹文群, 沈宇峰, 白姣姣, 等. 上海市社区糖尿病患者足部胼胝现状及影响因素调查[J]. 护理学杂志, 2010, 25(9): 75-76.
 - [24] 谢玉生, 黄蓉蓉, 罗玉红, 等. 糖尿病足溃疡复发风险预测模型的系统评价[J]. 中华现代护理杂志, 2024, 30(11): 1414-1421.
 - [25] Jorgetto, J.V., Oggiam, D.S., Gamba, M.A. and Kusahara, D.M. (2022) Factors Associated with Changes in Plantar Pressure of People with Peripheral Diabetic Neuropathy. *Journal of Diabetes & Metabolic Disorders*, **21**, 1577-1589. <https://doi.org/10.1007/s40200-022-01104-1>
 - [26] Sutkowska, E., Sutkowski, K., Sokołowski, M., Franek, E. and Dragan, S. (2019) Distribution of the Highest Plantar Pressure Regions in Patients with Diabetes and Its Association with Peripheral Neuropathy, Gender, Age, and BMI: One Centre Study. *Journal of Diabetes Research*, **2019**, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2019/7395769>

- [27] Zimny, S., Schatz, H. and Pfohl, M. (2004) The Role of Limited Joint Mobility in Diabetic Patients with an At-Risk Foot. *Diabetes Care*, **27**, 942-946. <https://doi.org/10.2337/diacare.27.4.942>
- [28] Caravaggi, P., Berti, L., Leardini, A., Lullini, G., Marchesini, G., Baccolini, L., *et al.* (2017) Biomechanical and Functional Alterations in the Diabetic Foot: Differences between Type I and Type II Diabetes. *Gait & Posture*, **57**, 12-13. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.07.063>
- [29] Payne, C., Turner, D. and Miller, K. (2002) Determinants of Plantar Pressures in the Diabetic Foot. *Journal of Diabetes and its Complications*, **16**, 277-283. [https://doi.org/10.1016/s1056-8727\(01\)00187-8](https://doi.org/10.1016/s1056-8727(01)00187-8)
- [30] Rojas-Torres, F., Infanzón-Talango, H., García-Ulloa, A.C., Hernández-Jiménez, S. and Rodríguez-Reyes, G. (2024) Exploring Plantar Pressure Distribution in Patients with Newly Diagnosed Diabetes: Implications for Foot Ulcer Prevention in an Overweight Mexican Population. *Endocrinología, Diabetes y Nutrición (English Ed.)*, **71**, 340-347. <https://doi.org/10.1016/j.endien.2024.09.007>
- [31] Mueller, M.J., Zou, D., Bohnert, K.L., Tuttle, L.J. and Sinacore, D.R. (2008) Plantar Stresses on the Neuropathic Foot during Barefoot Walking. *Physical Therapy*, **88**, 1375-1384. <https://doi.org/10.2522/ptj.20080011>
- [32] Taş, S., Bek, N., Ruhi Onur, M. and Korkusuz, F. (2017) Effects of Body Mass Index on Mechanical Properties of the Plantar Fascia and Heel Pad in Asymptomatic Participants. *Foot & Ankle International*, **38**, 779-784. <https://doi.org/10.1177/1071100717702463>
- [33] Hsi, W., Chai, H. and Lai, J. (2002) Comparison of Pressure and Time Parameters in Evaluating Diabetic Footwear. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, **81**, 822-829. <https://doi.org/10.1097/00002060-200211000-00004>
- [34] Amemiya, A., Noguchi, H., Oe, M., Ohashi, Y., Ueki, K., Kadowaki, T., *et al.* (2014) Elevated Plantar Pressure in Diabetic Patients and Its Relationship with Their Gait Features. *Gait & Posture*, **40**, 408-414. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.05.063>
- [35] Ahroni, J.H., Boyko, E.J. and Forsberg, R.C. (1999) Clinical Correlates of Plantar Pressure among Diabetic Veterans. *Diabetes Care*, **22**, 965-972. <https://doi.org/10.2337/diacare.22.6.965>
- [36] Oh, S., Kim, J., Choi, J., Jeong, W., Chang, H. and Lee, S. (2018) Comparison of Pedal Soft Tissue Thickness between Those with and without Diabetes. *The Journal of Foot and Ankle Surgery*, **57**, 860-864. <https://doi.org/10.1053/j.jfas.2018.02.003>
- [37] Qiu, X., Tian, D., Han, C., Chen, W., Wang, Z., Mu, Z., *et al.* (2015) Plantar Pressure Changes and Correlating Risk Factors in Chinese Patients with Type 2 Diabetes. *Chinese Medical Journal*, **128**, 3283-3291. <https://doi.org/10.4103/0366-6999.171394>
- [38] Sacco, I.C.N., Hamamoto, A.N., Tonicelli, L.M.G., Watari, R., Ortega, N.R.S. and Sartor, C.D. (2014) Abnormalities of Plantar Pressure Distribution in Early, Intermediate, and Late Stages of Diabetic Neuropathy. *Gait & Posture*, **40**, 570-574. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.06.018>
- [39] DiLiberto, F.E., Baumhauer, J.F. and Nawoczenski, D.A. (2016) The Prevention of Diabetic Foot Ulceration: How Biomechanical Research Informs Clinical Practice. *Brazilian Journal of Physical Therapy*, **20**, 375-383. <https://doi.org/10.1590/bjpt-rbf.2014.0195>
- [40] LeMaster, J.W., Mueller, M.J., Reiber, G.E., Mehr, D.R., Madsen, R.W. and Conn, V.S. (2008) Effect of Weight-Bearing Activity on Foot Ulcer Incidence in People with Diabetic Peripheral Neuropathy: Feet First Randomized Controlled Trial. *Physical Therapy*, **88**, 1385-1398. <https://doi.org/10.2522/ptj.20080019>
- [41] Maluf, K.S. and Mueller, M.J. (2003) Comparison of Physical Activity and Cumulative Plantar Tissue Stress among Subjects with and without Diabetes Mellitus and a History of Recurrent Plantar Ulcers. *Clinical Biomechanics*, **18**, 567-575. [https://doi.org/10.1016/s0268-0033\(03\)00118-9](https://doi.org/10.1016/s0268-0033(03)00118-9)
- [42] Leyh, C. and Feipel, V. (2022) Impact of Sex and Velocity on Plantar Pressure Distribution during Gait: A Cross-Sectional Study Using an Instrumented Pressure-Sensitive Walkway. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, **7**, Article 106. <https://doi.org/10.3390/jfmk7040106>
- [43] Hulshof, C.M., van Netten, J.J., Dekker, M.G., Pijnappels, M. and Bus, S.A. (2023) In-Shoe Plantar Pressure Depends on Walking Speed and Type of Weight-Bearing Activity in People with Diabetes at High Risk of Foot Ulceration. *Clinical Biomechanics*, **105**, Article 105980. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2023.105980>
- [44] Mohammad, G., Siddiquei, M.M. and Abu El-Asrar, A.M. (2013) Poly (ADP-Ribose) Polymerase Mediates Diabetes-Induced Retinal Neuropathy. *Mediators of Inflammation*, **2013**, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2013/510451>
- [45] Armstrong, D.G., Boulton, A.J.M. and Bus, S.A. (2017) Diabetic Foot Ulcers and Their Recurrence. *New England Journal of Medicine*, **376**, 2367-2375. <https://doi.org/10.1056/nejmra1615439>
- [46] van Netten, J.J., Price, P.E., Lavery, L.A., Monteiro-Soares, M., Rasmussen, A., Jubiz, Y., *et al.* (2016) Prevention of Foot Ulcers in the At-Risk Patient with Diabetes: A Systematic Review. *Diabetes/Metabolism Research and Reviews*, **32**, 84-98. <https://doi.org/10.1002/dmrr.2701>

-
- [47] Xu, L., Zeng, H., Zhao, J., Zhao, J., Yin, J., Chen, H., *et al.* (2019) Index of Plantar Pressure Alters with Prolonged Diabetes Duration. *Diabetes Therapy*, **10**, 2139-2152. <https://doi.org/10.1007/s13300-019-00697-w>
 - [48] Hemler, S.L., Ntella, S.L., Jeanmonod, K., Köchli, C., Tiwari, B., Civet, Y., *et al.* (2023) Intelligent Plantar Pressure Offloading for the Prevention of Diabetic Foot Ulcers and Amputations. *Frontiers in Endocrinology*, **14**, Article 1166513. <https://doi.org/10.3389/fendo.2023.1166513>
 - [49] 梁嘉欣. 可穿戴式智能足底压力视觉反馈技术对脑卒中患者步态与平衡功能的影响[D]: [硕士学位论文]. 广州: 南方医科大学, 2019.
 - [50] Ntella, S.L., Jeanmonod, K., Civet, Y., Koechli, C. and Perriard, Y. (2022) Pressure Offloading Device for Diabetic Footwear Based on Magnetorheological Fluids. 2022 25th *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Chiang Mai, 29 November-2 December 2022, 1-5. <https://doi.org/10.1109/icems56177.2022.9982804>
 - [51] 王梦囡, 陈宇, 陈康桂. 智能鞋垫的研发及在跑步中应用研究[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(4): 46-48.