糖尿病足

DOI:10.13406/j.cnki.cyxb.001175

2型糖尿病步态和平衡能力的研究进展

陈　燕[1],邓　芳[2],邓武权[1]

（1. 重庆市急救医疗中心/重庆市第四人民医院内分泌肾内科/糖尿病足诊治中心,重庆　400041;
2. 第三军医大学第一附属医院内分泌科,重庆　400038）

【摘　要】多种因素共同作用引起 2 型糖尿病的步态和平衡能力异常,增加了足部溃疡、跌倒以及死亡等高风险。随着技术不断进步,检测步态和平衡性的新型工具应运而生。早期诊断上述生物力学参数,并探寻新的防治措施对患者远期预后至关重要。本文就 2 型糖尿病的步态特征和平衡能力进展进行综述。

【关键词】2 型糖尿病;生物力学;步态特征;平衡能力

【中图分类号】R259　　【文献标志码】A　　【收稿日期】2017-01-03

Progress in gait and balance performance of patients with type 2 diabetes

Chen Yan[1], Deng Fang[2], Deng Wuquan[1]

(1. Department of Endocrinology and Nephrology, Multidisplinary Diabetic Foot Medical Center, Chongqing Emergency Medical Center/Chongqing the Fourth Hospital; 2. Department of Endocrinology, the First Affiliated Hospital of the Third Military Medical University)

【Abstract】Gait and balance dysfunction in patients with type 2 diabetes(T2DM) caused by a result of multiple factors increase high risk of foot ulcer, fall and death. As science and technology progressed, a variety of novel detective tools emerged for gait and balance parameters monitoring. Early diagnosis of above biomechanical parameters, as well as further tailored prevention and treatment with new measures are essential for long-term prognosis of T2DM. This article reviews the role of gait characteristics and balance ability in T2DM.

【Key words】type 2 diabetes; biomechanical parameters; gait characteristics; balance ability

世界卫生组织推荐糖尿病患者每周 6 d、每次 30 min 以上的规律身体锻炼,但运动前对患者的运动能力和安全性评估却极少关注。由于步态和平衡能力等生物力学改变,2 型糖尿病患者伤害性跌倒风险剧增[1]。众所周知,跌倒性外伤是引起患者身体功能下降和生命危及等恶性循环的关键始动因素。糖尿病患者的运动能力和姿势稳定性均下降,其与远端关节本体感觉障碍和踝关节背屈和足底屈肌强度下降有关。糖尿病所致周围神经病变导致足底皮肤和本体感觉损害,引起行动和平衡能力异常,表现为步态不稳和跌倒[2]。感觉运动神经损害是糖尿病周围神经病变最常见的并发症,常导致振动觉、触觉和感知觉丧失,以及冷热觉和疼痛觉下降,与足溃疡发生息息相关[3]。与此同时,下肢血管病变常导致步态和平衡等生物力学参数发生改变。因此,足生物力学的改变在糖尿病后期各种并发症和伴发病的发生发展中具有极其关键的作用[4]。生物力学改变导致糖尿病足部皮肤压力分布异常是足溃疡和截肢发生的关键因素之一。糖尿病患者出现足感觉缺失前即有跌倒的高风险,因此除糖尿病周围神经和血管病变以外,肌肉强度、关节活动性、机体功能失调或心理特征(如跌倒恐惧)均可能影响生物力学参数[5]。目前,国内在该方面的认识和研究工作尚有很大差距。因此,本文从最新的研究结果和进展进行综述。

1　人体步态和平衡控制

步态是指人体步行时的姿态和行为特征,是人体通过髋、膝、踝、足趾的一系列连续活动,使身体沿着一定方向移动的过程。步态分析常通过一系列参数进行评价,包括步态周期、运动学参数、动力学参数、肌电活动参数和能量代谢参数等。

作者介绍:陈　燕,Email:chenyan040703@126.com,研究方向:内分泌与代谢病。

通信作者:邓武权,Email:dengwuquan@163.com。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:81500596);重庆市社会民生科技创新专项资助项目(编号:cstc2016shmszx130072)。

优先出版:http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1046.r.20170313.1044.004.html(2017-03-13)

身体平衡控制是一个非常复杂的运动技能，涉及力学和生理等因素，以利于保持平衡和防止跌倒。以前被广泛假设认为，安静时身体姿势的控制，犹如一个围绕膝关节的倒立摆被动运动[6]。另外的观点则认为，安静体位控制是一个多节段的持续中枢神经反应。再后来，则认为多种控制策略均参与身体平衡。最近研究提示，保持身体平衡和方向性主要与以下因素有关：生物力学限制、运动和感觉策略、空间方向感、力学和认知调控。上述任意一个调控因素受损均可能引起身体平衡功能破坏[7]。足的其中一个主要功能是足后跟接触地面或不平地面适应中的吸震能力，以保持姿势的稳定性。因此，任何引起足部解剖学结构和生理功能改变的影响均可以影响躯体的生物力学稳定性。糖代谢异常合并的各种并发症均可能引起步态和平衡性改变，这种改变可通过直接和间接影响。直接影响包括糖尿病周围神经或血管病变，前者导致患者肌梭功能损害，足底皮肤感觉和运动认知能力下降均可引起保持姿势稳定性的感觉策略改变，而间接影响包括肌肉病变、足溃疡和脑血管病变[8-10]。研究发现，糖尿病患者踝关节和膝关节在支撑相的主动肌和拮抗肌共同收缩增强，Kwon 等[11]推测，共同收缩机制能让患者弥补感觉神经损害引起的生物力学改变使患者保持更为安全和稳定的步态。

2 生物力学评估方法和检测设备

糖尿病生物力学评估方法多种多样，包括专业问卷量表和检测设备。活动绩效能力评估量表通常包括 7 项步态评估和 9 项平衡能力测试项目[12]。近些年来，随着微型传感技术的发展，加速度传感器已经广泛应用于人体运动学测试[13]。

2.1 步态特征评估

人类行走步伐呈周期性变化，周期性步态是指一侧足跟着地到该侧足跟再次着地的过程。每个步态周期均包含一系列典型姿位的转移，称为步态时相，包括支撑相和摆动相。早期采用多阵列摄录机进行步态记录，后期进行数据回放分析。随着技术的进步，目前已发展至移动式穿戴设备评估法。步态评估方法较多，一般建议受试者步行 25 步以上，采用以下 3 种模式：①习惯性地面正常速度行走；②双重任务地面行走；③快速地面行走[4]。评价指标包括步长、步长时间、步幅、步行周期、步频、步速、步宽、足偏角等。

2.2 平衡能力检测

平衡能力的问卷调查常采用国际版跌倒效能感量表，用于评估害怕跌倒与跌倒自我效能情况[14]。目前，平衡能力检测方法包括静态和动态平衡评估（如从椅子起立的能力）。静态平衡检测常采用多种系统[15]。改良感觉整合平衡测试常用于站立位静态平衡评估，包括软、硬地上的睁、闭眼 4 种状态测试[16]。被检测者受不同视觉环境（软垫、硬地和睁、闭眼站位）和不同紧张程度的影响。其他评价方法还包括临床静态直立站姿评分法等[17]。计时起立-行走测试是常用的动态平衡评估法，指计时受试者从椅子上站立起来，直线移动 3 m，折返坐下所需要的时间[18]。该方法常用于测试老年患者功能性步行能力和摔倒的可能性。以前，用于体位控制能力的传统评价方法包括压力板和高祯红外线照相机等。体位稳定性通常采用压力板对足底压力中心（com center of pressure，CoP）的分布进行评估。站立的主要压力中心参数包括压力中心位移、左右 CoP 和前后 CoP。足踝和臀部的姿势控制策略则采用逆向动态计算方法表达，包括摇摆面积，CoP 位移距离和重心（com center of mass，CoM）[19]。穿戴式加速度传感器可用于全身不同部位直线加速度检测，通过与压力板的测试数据进行验证比较，穿戴式加速度传感器同样可以用于身体平衡性控制测试[20]。常用的测量设备包括陀螺仪、加速度传感器、加速度计、重力传感器。陀螺仪测角速度，加速度传感器测线性加速度，前者利用惯性原理，后者利用力平衡原理。加速度计在较长时间的测量中准确性高，而在较短时间内，由于信号噪声的存在而有误差。陀螺仪在较短时间内则比较准确，较长时间则会有漂移而存有误差。因此，需要加速度计和陀螺仪两者相互调整来确保航向的正确。现在，平衡姿态相关的惯性应用，如惯性测量单元（inertial measurement unit，IMU）由三轴陀螺仪和三轴加速度计组合而成。一项穿戴式 IMU（BalanSens，BioSensics）和压力板的对照测试研究提示，糖尿病患者和正常对照者的 CoM 和 CoP 之间均呈良好的线性相关，提示该类设备可用于人体的 CoM 和体位控制补偿策略测试[21]。

3 糖尿病和步态异常

多个糖尿病指南均推荐，糖尿病患者应进行规律的日常运动，这就更意味着需要提前对患者的运动能力和安全性进行评价。步态受中枢、外周神经、循环及骨骼肌系统共同调控。糖尿病可影响上述各系统，任何一个系统的调控失衡均可导致步态异常[22]。由于糖尿病发病率高，步态改变增加跌倒风险和额外医疗费用支出[23]。因此，早期识别糖尿病异常步态，并给予矫正具有重要作用。例如，患者步速降低则暗示可能需要采用安全防护措施避免摔倒[24]。步态安全，除了适当的变异性、稳定性、速度和反应时间外，可能需要通过某些外在和内在因素进行补偿[25]。步态异常与足溃疡、外伤损伤、住院甚至死亡等多种不良健康结局密切相关，是全身性疾病负担状态一个有用的预测指标[26-28]。认知障碍和步态异常与增龄相关，认知障碍可用于预测步态异常的发生率；相反，步态的改变，尤其是步速下降可作为早期认知功能衰退的预测因素[29]。

糖尿病神经病变患者常出现下肢和足部肌无力，与神经病变的体征和严重程度相关。磁共振检查提示，肌无力与肌肉萎缩程度平行相关。长程随访观察提示，糖尿病患者肌无力随时间推移加重，肌肉质量逐渐下降。肌无力可显著影响

患者的运动、步态不稳以及跌倒[30]。既往研究提示，糖尿病感觉运动神经病变患者有明显的步态改变，步速和步幅均降低[9,31]。运动神经病变导致的足部结构改变，其特征在于内在蚓状肌和骨间肌力变弱，从而导致渐进性萎缩和随之而来的足趾畸形。足畸形和关节活动受限可导致足底过度负荷和步态改变，是足运动力学异常的强预测因素[32]。然而，研究提示，步态改变可以出现在临床糖尿病周围神经病变之前。无论有无周围神经病变，糖尿病患者的下肢功能性力量均较同年龄组的健康人减弱[33]。Sawacha 等[34]通过三维步态分析研究提示，无论有无周围神经病变，糖尿病患者的静态和动态躯干和下肢关节运动能力均下降，合并周围神经病变者运动范围更小，提示该方法可能与预测临床可检测神经病变前的溃疡风险相关。1 项对 76 例 2 型糖尿病进行户外柏油路和鹅卵石路两种地形的真实世界研究提示，患者在柏油路的步速更快，鹅卵石路的步态周期变异系数（coefficient of variation of the gait cycle time，CVGCT）更高。回归分析表明，步速降低是由最大等长收缩下肢力量，怕跌倒和振动阈值下降共同所致。此外，从柏油路到鹅卵石路两种地形改变中，11.8%增加的 CVGCT 是由平均最大等长收缩力所致[35]。因此，在治疗步态改变的糖尿病患者时，生理（强度和本体）和认知行为（恐惧跌倒）这两种因素不应被忽视。CVGCT 这一指标与患者跌倒风险明显相关，步速减慢和高 CVGCT 均提示跌倒风险增高，因此常用于跌倒风险的预测和评估[36-37]。

4 糖尿病和平衡障碍

糖尿病患者平衡功能减退导致跌倒风险剧增，总体跌倒率可达 1.25 次/（年·人）[38]。尤其是老年足部感觉神经缺失性损害者更易出现跌倒[39]，提高 5 倍的跌倒风险[40-42]。躯体平衡通常是通过外周位置相关性肌肉控制（局部控制）和高级中枢神经感觉反馈途径（中枢控制）共同调节控制[43-44]。局部控制策略不需要通过视觉、前庭和体感反馈系统的作用[43,45]，此机制被认为是根据机体活动情况调控局部位置肌达到短程控制躯体摇摆[43]，而中枢控制机制则是依赖感觉反馈的长程躯体稳定调控[43,45-46]。证据表明，老年 2 型糖尿病感觉功能、肌肉代谢功能和执行力轻微下降即可引起跌倒风险增加。感觉系统由视觉、前庭和体感组成，是控制躯体平衡的关键因素，平衡的控制依赖上述各系统的共同作用。一个或多个感觉系统的减退可导致中枢神经的感觉冗余，影响平衡。迄今为止，尚无直接用于预测跌倒的方法，但多个研究已证实，躯体平衡功能减退和跌倒风险直接相关[47-48]。因而，目前常采用躯体平衡性用于间接评估患者跌倒的风险。

跨越障碍物是日常生活不可避免的活动，相对平地行走需要更大程度的神经肌肉激活。越障失败容易产生失去平衡、引起跻跌、导致跌倒等严重后果。跨越障碍过程中不仅要求摆动腿（先行腿）足趾和障碍物之间具有适当距离，而且要求站立腿（跟随腿）保持足够的稳定性。Hus 等[49]研究提示，糖尿病患者跨越障碍时跟随腿与障碍物之间的距离缩小，增加了碰撞障碍物导致跌倒的风险。摆动腿的膝屈曲和髋内收能力减弱被认为是跨越障碍时跻跌的危险因素，而踝跖屈肌机械力需求增加表明肌无力可能进一步减少对跻跌的弥补能力。跨越障碍可用于检测步态的变异性，用于识别糖尿病患者跻跌的风险。

通常情况下，重心在压力中心的正上方时，机体处于最稳定状态，两者偏移与横向加速度成正比变化，并与保持向上的肌肉需求相关[6]。糖尿病周围神经病变患者的局部稳定控制能力明显下降，但可以通过中枢控制机制进行弥补，从而促进机体稳定，且后者与患者神经病变的严重程度以及糖尿病病程相关[50-51]。糖尿病周围神经病变患者的踝关节策略减少常通过髋关节策略进行补偿[52]。既往多个研究均证实，2 型糖尿病周围神经病变患者较非神经病变及正常人静态站立姿势更为不稳，其中周围神经损害在糖尿病导致的不稳中具有极其关键的作用[9,53-54]。1 年内发生过跌倒史的糖尿病周围神经病变患者更易出现踝关节肌无力，包括背屈、蹠屈、内翻和外翻等[55]。2009 年 Turcot 等[56]首次应用穿戴式加速度传感器方式对糖尿病患者的平衡性进行评价，采用 Physilog 系统（BioAGM，CH）测量躯干和踝关节水平的直线加速情况。另外 1 个三轴加速度传感器（ADXL202，Norwood）被放置在 L5-S1 水平，2 个双轴加速度传感器（ADXL210，Norwood）被放置在左右小腿前面以及踝部。结果提示，糖尿病周围神经病变患者相对非神经病变和正常人的各加速度值均更高，提示姿态不稳定更严重[52]。此外，由于缺乏来自下肢对身体控制和躯体稳定的体感信息，增加了站立位的姿势摇摆。已有研究证实，不论睁眼还是闭眼状态，糖尿病感觉运动神经病变患者的姿势摇摆较对照组更大[57]。与非糖尿病患者比较，糖尿病周围神经病变患者在上下楼梯和平路时，侧方位离散极值和范围更大。同样，糖尿病周围神经病变患者上楼梯和平路的平均侧方位离散值更大，这就意味着需要更多的肌肉能量以达到维持躯体保持向上，是更易发生跌倒的缘故。无论有无神经损害，糖尿病患者的平衡控制能力均有下降，其远端关节的本体感觉受损、踝背屈肌和跖屈强度下降[59]。这表明糖尿病患者在足部感觉神经功能丧失前即处于跌倒的高危期，因此在周围神经病变诊断前识别糖尿病步态异常极其关键和重要[60]。

5 糖尿病前期和步态、平衡异常

2 型糖尿病的平衡和行动障碍往往归咎于周围神经损害，然而，研究发现即使只有轻微临床前期的神经功能下降甚至无神经损害即可引起体力和运动能力下降[61-62]。初诊糖尿病患者的神经肌电图检查提示，10%~18%合并神经损害，提示在早期轻微糖代谢异常时即有周围神经的损害[63]。既往

研究提示，无显性周围神经病变的 2 型糖尿病患者，已有下肢体感和平衡功能的下降[19]。除此之外，保持平衡的体感、视觉和前庭 3 个复杂交互的感觉系统随年龄增长功能逐渐减退。糖尿病视网膜病变可引起视力下降，然而目前证实糖尿病引起前庭功能下降的证据极少。因此，平衡功能障碍仅归咎于神经损害难以解释。同样，研究提示，糖尿病微血管和大血管病变在糖尿病早期甚至非显性糖代谢异常的糖尿病前期就有可能出现[64-65]。糖耐量异常周围神经病变（impaired glucose tolerance-peripheral neuropathy，IGT-PN）患者的躯体再定位错误是对照组的 2 倍，而单腿平衡测试时长仅为后者的一半，且这些异常与常用的临床平衡和运动测试指标以及神经电生理成正相关。IGT-PN 患者的站立平衡和躯体位置觉均有损害，因此早期筛查糖代谢异常患者的神经病变导致的平衡异常具有重要的作用[66]。

6 展 望

糖尿病患者的步态和平衡异常与足溃疡[9,31,34]、跌倒密切相关，常导致心理创伤、软组织损伤、骨折、截肢甚至死亡等严重后果。步态正常已逐渐被认为是身体健康的一个重要标志[67]。步态分析是研究步行规律的检查方法，旨在通过生物力学和运动学手段，揭示步态异常的关键环节及影响因素，从而指导康复评估和治疗，有助于临床诊断、疗效评估及机制研究。通过体能和平衡训练可能会改善下肢力量、体位平衡和行走能力[68-69]。Kanade 等[70]评价了不同阶段的糖尿病足患者，前后方向的 CoP 漂移逐渐增大，从单纯糖尿病周围神经病变到部分足截肢，其姿势不稳逐渐加重，提示糖尿病神经损害和糖尿病足呈恶性循环，相互加重。因此对该类患者进行早期诊断和干预，是预防糖尿病溃疡再发的关键。

通过运动干预可为糖尿病患者的平衡和运动能力带来益处。研究提示，太极运动可以改善糖尿病患者的步速和平衡性[71]。泰式按摩、针灸和特殊专项训练均可改善糖尿病周围神经病变患者的平衡性，可能的机制包括改善皮肤神经损害、足部压力重分布、肌肉长度和紧张度等[72-73]。Grewal 等[73]基于体感传感器监测，通过视觉反馈训练下肢关节，提示可改善糖尿病周围神经病变患者的躯体稳定，减少摔倒可能。另一项通过 12 周每周 3 次的中到强度有氧运动，糖尿病患者的步伐速度和手足反应时间加快，并且可以改善动态体位控制，但对预防跌倒未见明显减少[74]。1 项 Meta 分析提示，老年患者通过预防跌倒训练，可降低 4%的跌倒率[75]。但上述不同形式的补充疗法因为样本例数偏少，存在偏倚可能，是否对远期跌倒预防有效，需要进一步研究。另一方面，通过早期评估患者足生物力学参数，对异常参数给予矫正可为患者带来益处。1 项研究提示，予以足踝定制矫形器早期干预，可减少躯体不稳而增加协调性，且不影响患者日常活动[76]。因此，探寻行之有效的干预手段，早期改善患者足步态和平衡异常参数临床意义重大。目前国内对糖尿病相关的步态、平衡等生物力学认知、研究和防治策略还极度匮乏，需要进一步加强基础和临床数据积累，以期为未来开发和探寻适合中国人群新的防治手段奠定基础。

参 考 文 献

[1] Maurer MS, Burcham J, Cheng H. Diabetes mellitus is associated with an increased risk of falls in elderly residents of a long-term care facility[J]. J Gerontol A Biol Sci Med Sci, 2005, 60(9): 1157-1162.

[2] van Deursen RW, Simoneau GG. Foot and ankle sensory neuropathy, proprioception, and postural stability[J]. J Orthop Sports Phys Ther, 1999, 29(12): 718-726.

[3] Papanas N, Ziegler D. New diagnostic tests for diabetic distal symmetric polyneuropathy[J]. J Diabetes Complications, 2011, 25(1): 44-51.

[4] Thiede R, Toosizadeh N, Mills JL, et al. Gait and balance assessments as early indicators of frailty in patients with known peripheral artery disease[J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2016, 32: 1-7.

[5] Allet L, Armand S, de Bie RA, et al. Clinical factors associated with gait alterations in diabetic patients[J]. Diabet Med, 2009, 26(10): 1003-1009.

[7] Horak FB. Postural orientation and equilibrium: what do we need to know about neural control of balance to prevent falls?[J]. Age Ageing, 2006, 35(s2): ii7-ii11.

[8] Roman de Mettelinge T, Delbaere K, Calders P, et al. The impact of peripheral neuropathy and cognitive decrements on gait in older adults with type 2 diabetes mellitus[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2013, 94(6): 1074-1079.

[9] Allet L, Armand S, Golay A, et al. Gait characteristics of diabetic patients: a systematic review[J]. Diabetes Metab Res Rev, 2008, 24(3): 173-191.

[10] England JD, Franklin G, Gjorvad G, et al. Quality improvement in neurology: distal symmetric polyneuropathy quality measures[J]. Neurology, 2014, 82(19): 1745-1748.

[11] Kwon OY, Minor SD, Maluf KS, et al. Comparison of muscle activity during walking in subjects with and without diabetic neuropathy [J]. Gait Posture, 2003, 18(1): 105-113.

[13] Mathie MJ, Coster AC, Lovell NH, et al. Accelerometry: providing an integrated, practical method for long-term, ambulatory monitoring of human movement[J]. Physiol Meas, 2004, 25(2): R1-20.

[14] Yardley L, Beyer N, Hauer K, et al. Development and initial validation of the Falls Efficacy Scale-International (FES-I)[J]. Age Ageing, 2005, 34(6): 614-619.

[15] Arnold BL, Schmitz RJ. Examination of balance measures produced by the biodex stability system[J]. J Athl Train, 1998, 33(4): 323-327.

[16] Shumway-Cook A, Horak FB. Assessing the influence of sensory interaction of balance. Suggestion from the field[J]. Phys Ther, 1986, 66

(10):1548-1550.

[17] Caronni A,Cattalini C,Previtera AM. Balance and mobility assessment for ruling-out the peripheral neuropathy of the lower limbs in older adults[J]. Gait Posture,2016,50:109-115.

[18] Podsiadlo D,Richardson S. The timed "Up & Go":a test of basic functional mobility for frail elderly persons[J]. J Am Geriatr Soc,1991,39(2):142-148.

[19] Bonnet C,Carello C,Turvey MT. Diabetes and postural stability:review and hypotheses[J]. J Mot Behav,2009,41(2):172-190.

[20] Adlerton AK,Moritz U,Moe-Nilssen R. Forceplate and accelerometer measures for evaluating the effect of muscle fatigue on postural control during one-legged stance[J]. Physiother Res Int,2003,8(4):187-199.

[21] Najafi B,Horn D,Marclay S,et al. Assessing postural control and postural control strategy in diabetes patients using innovative and wearable technology[J]. J Diabetes Sci Technol,2010,4(4):780-791.

[22] Verghese J,Holtzer R,Lipton RB,et al. Quantitative gait markers and incident fall risk in older adults[J]. J Gerontol A Biol Sci Med Sci,2009,64(8):896-901.

[23] Roudsari BS,Ebel BE,Corso PS,et al. The acute medical care costs of fall-related injuries among the US older adults[J]. Injury,2005,36(11):1316-1322.

[24] Maki BE. Gait changes in older adults:predictors of falls or indicators of fear[J]. J Am Geriatr Soc,1997,45(3):313-320.

[25] Morley JE. Falls-where do we stand?[J]. Mo Med,2007,104(1):63-67.

[26] Verghese J,LeValley A,Hall CB,et al. Epidemiology of gait disorders in community-residing older adults[J]. J Am Geriatr Soc,2006,54(2):255-261.

[27] Cesari M,Kritchevsky SB,Penninx BW,et al. Prognostic value of usual gait speed in well-functioning older people-results from the Health,Aging and Body Composition Study[J]. J Am Geriatr Soc,2005,53(10):1675-1680.

[28] Wilson RS,Schneider JA,Beckett LA,et al. Progression of gait disorder and rigidity and risk of death in older persons[J]. Neurology,2002,58(12):1815-1819.

[29] Cohen JA,Verghese J,Zwerling JL. Cognition and gait in older people[J]. Maturitas,2016,93:73-77.

[30] Andersen H,Gadeberg PC,Brock B,et al. Muscular atrophy in diabetic neuropathy:a stereological magnetic resonance imaging study[J]. Diabetologia,1997,40(9):1062-1069.

[31] Katoulis EC,Ebdon-Parry M,Lanshammar H,et al. Gait abnormalities in diabetic neuropathy[J]. Diabetes Care,1997,20(12):1904-1907.

[32] Andersen H. Motor dysfunction in diabetes[J]. Diabetes Metab Res Rev,2012,28(s1):89-92.

[33] Vaz MM,Costa GC,Reis JG,et al. Postural control and functional strength in patients with type 2 diabetes mellitus with and without peripheral neuropathy[J]. Arch Phys Med Rehabil,2013,94(12):2465-2470.

[34] Sawacha Z,Gabriella G,Cristoferi G,et al. Diabetic gait and posture abnormalities:a biomechanical investigation through three dimensional gait analysis[J]. Clin Biomech(Bristol,Avon),2009,24(9):722-728.

[35] Allet L,Armand S,de Bie RA,et al. Clinical factors associated with gait alterations in diabetic patients[J]. Diabet Med,2009,26(10):1003-1009.

[36] Hausdorff JM,Rios DA,Edelberg HK. Gait variability and fall risk in community-living older adults:a 1-year prospective study[J]. Arch Phys Med Rehabil,2001,82(8):1050-1056.

[37] Lopopolo RB,Greco M,Sullivan D,et al. Effect of therapeutic exercise on gait speed in community-dwelling elderly people:a meta-analysis[J]. Phys Ther,2006,86(4):520-540.

[38] Wallace C,Reiber GE,LeMaster J,et al. Incidence of falls,risk factors for falls,and fall-related fractures in individuals with diabetes and a prior foot ulcer[J]. Diabetes Care,2002,25(11):1983-1986.

[39] Schwartz AV,Hillier TA,Sellmeyer DE,et al. Older women with diabetes have a higher risk of falls:a prospective study[J]. Diabetes Care,2002,25(10):1749-1754.

[40] Bonnet CT,Ray C. Peripheral neuropathy may not be the only fundamental reason explaining increased sway in diabetic individuals[J]. Clin Biomech(Bristol,Avon),2011,26(7):699-706.

[41] Richardson JK,Hurvitz EA. Peripheral neuropathy:a true risk factor for falls[J]. J Gerontol A Biol Sci Med Sci,1995,50(4):M211-215.

[42] Tilling LM,Darawil K,Britton M. Falls as acomplication of diabetes mellitus in older people[J]. J Diabetes Complications,2006,20(3):158-162.

[43] Collins JJ,De Luca CJ. Open-loop and closed-loop control of posture:a random-walk analysis of center-of-pressure trajectories[J]. Exp Brain Res,1993,95(2):308-318.

[44] Newell KM,Slobounov SM,Slobounova ES,et al. Stochastic processes in postural center-of-pressure profiles[J]. Exp Brain Res,1997,113(1):158-164.

[45] Priplata A,Niemi J,Salen M,et al. Noise-enhanced human balance control[J]. Phys Rev Lett,2002,89(23):238101.

[46] Collins JJ,De Luca CJ. The effects of visual input on open-loop and closed-loop postural control mechanisms[J]. Exp Brain Res,1995,103(1):151-163.

[47] Maki BE,Holliday PJ,Topper AK. A prospective study of postural balance and risk of falling in an ambulatory and independent elderly population[J]. J Gerontol,1994,49(2):M72-84.

[48] Lajoie Y,Gallagher SP. Predicting falls within the elderly community:comparison of postural sway,reaction time,the Berg balance scale and the Activities-specific Balance Confidence(ABC) scale for comparing fallers and non-fallers[J]. Arch Gerontol Geriatr,2004,38(1):11-26.

[49] Hsu WC,Liu MW,Lu TW. Biomechanical risk factors for tripping during obstacle--crossing with the trailing limb in patients with type Ⅱ diabetes mellitus[J]. Gait Posture,2016,45:103-109.

[50] Toosizadeh N, Mohler J, Armstrong DG, et al. The influence of diabetic peripheral neuropathy on local postural muscle and central sensory feedback balance control[J] .PLOS One, 2015, 10(8): e0135255.

[51] Ghanavati T, Shaterzadeh Yazdi MJ, Goharpey S, et al. Functional balance in elderly with diabetic neuropathy[J]. Diabetes Res Clin Pract, 2012, 96(1): 24-28.

[52] Lafond D, Corriveau H, Prince F. Postural control mechanisms during quiet standing in patients with diabetic sensory neuropathy[J]. Diabetes Care, 2004, 27(1): 173-178.

[53] Yamamoto R, Kinoshita T, Momoki T, et al. Postural sway and diabetic peripheral neuropathy[J]. Diabetes Res Clin Pract, 2001, 52(3): 213-221.

[54] Lim KB, Kim DJ, Noh JH, et al. Comparison of balance ability between patients with type 2 diabetes and with and without peripheral neuropathy[J]. PMR, 2014, 6(3): 209-214.

[55] Macgilchrist C, Paul L, Ellis BM, et al. Lower-limb risk factors for falls in people with diabetes mellitus[J]. Diabet Med, 2010, 27(2): 162-168.

[56] Turcot K, Allet L, Golay A, et al. Investigation of standing balance in diabetic patients with and without peripheral neuropathy using accelerometers[J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2009, 24(9): 716-721.

[57] Dickstein R, Shupert CL, Horak FB. Fingertip touch improves postural stability in patients with peripheral neuropathy[J]. Gait Posture, 2001, 14(3): 238-247.

[58] Brown SJ, Handsaker JC, Bowling FL, et al. Diabetic peripheral neuropathy compromises balance during daily activities[J]. Diabetes Care, 2015, 38(6): 1116-1122.

[59] Andreassen CS, Jakobsen J, Andersen H. Muscle weakness: a progressive late complication in diabetic distal symmetric polyneuropathy [J]. Diabetes, 2006, 55(3): 806-812.

[60] Petrofsky J, Lee S, Bweir S. Gait characteristics in people with type 2 diabetes mellitus[J]. Eur J Appl Physiol, 2005, 93(5-6): 640-647.

[61] Strotmeyer ES, de Rekeneire N, Schwartz AV, et al. The relationship of reduced peripheral nerve function and diabetes with physical performance in older white and black adults: the Health, Aging, and Body Composition (Health ABC) study[J]. Diabetes Care, 2008, 31(9): 1767-1772.

[62] Deshpande N, Hewston P, Aldred A. Sensory functions, balance, and mobility in older adults with type 2 diabetes without overt diabetic peripheral neuropathy: a brief report[J]. J Appl Gerontol, 2015, 305(3): 2592-2592.

[63] Lehtinen JM, Niskanen L, Hyvönen K, et al. Nerve function and its determinants in patients with newly-diagnosed type 2 (non-insulin-dependent) diabetes mellitus and in control subjects—a 5-year follow-up [J]. Diabetologia, 1993, 36(1): 68-72.

[64] Tabák AG, Herder C, Rathmann W, et al. Prediabetes: a high-risk state for diabetes development[J]. Lancet, 2012, 379(9833): 2279-2290.

[65] Raman R, Gupta A, Krishna S, et al. Prevalence and risk factors for diabetic microvascular complications in newly diagnosed type II diabetes mellitus. Sankara Nethralaya Diabetic Retinopathy Epidemiology and Molecular Genetic Study (SN-DREAMS, report 27)[J]. J Diabetes Complications, 2012, 26(2): 123-128.

[66] Goldberg A, Russell JW, Alexander NB. Standing balance and trunk position sense in impaired glucose tolerance (IGT)-related peripheral neuropathy[J]. J Neurol Sci, 2008, 270(1-2): 165-171.

[67] Verlinden VJ, van der Geest JN, Heeringa J, et al. Gait shows a sex-specific pattern of associations with daily functioning in a community-dwelling population of older people[J]. Gait Posture, 2015, 41(1): 119-124.

[68] Andersen H. Motor dysfunction in diabetes[J]. Diabetes Metab Res Rev, 2012, 28(s1): 89-92.

[69] Allet L, Armand S, de Bie RA, et al. The gait and balance of patients with diabetes can be improved: a randomised controlled trial[J]. Diabetologia, 2010, 53(3): 458-466.

[70] Kanade RV, Van Deursen RW, Harding KG, et al. Investigation of standing balance in patients with diabetic neuropathy at different stages of foot complications[J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2008, 23 (9): 1183-1191.

[71] Tsang T, Orr R, Lam P, et al. Health benefits of Tai Chi for older patients with type 2 diabetes: the "Move It For Diabetes study"--a randomized controlled trial[J]. Clin Interv Aging, 2007, 2(3): 429-439.

[72] Chatchawan U, Eungpinichpong W, Plandee P, et al. Effects of thai foot massage on balance performance in diabetic patients with peripheral neuropathy: a randomized parallel-controlled trial[J]. Med Sci Monit Basic Res, 2015, 21: 68-75.

[73] Grewal GS, Schwenk M, Lee-Eng J, et al. Sensor-based interactive balance training with visual joint movement feedback for improving postural stability in diabetics with peripheral neuropathy: a randomized controlled trial[J]. Gerontology, 2015, 61(6): 567-574.

[74] Morrison S, Colberg SR, Parson HK, et al. Exercise improves gait, reaction time and postural stability in older adults with type 2 diabetes and neuropathy[J]. J Diabetes Complications, 2014, 28(5): 715-722.

[75] Hill-Westmoreland EE, Soeken K, Spellbring AM. A meta-analysis of fall prevention programs for the elderly: how effective are they? [J]. Nurs Res, 2002, 51(1): 1-8.

[76] Yalla SV, Crews RT, Fleischer AE, et al. An immediate effect of custom-made ankle foot orthoses on postural stability in older adults[J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2014, 29(10): 1081-1088.

（责任编辑：唐秋姗）