

文章编号: 1004-7220(2025)02-0351-07

膝骨性关节炎女性患者初学太极云手动作的 下肢生物力学特征

林紫玲^{1,2}, 熊凤³, 侯美金^{2,4}, 马晔⁵, 刘本科⁶, 陈博⁷, 王芴斌^{1,2}

(1. 福建中医药大学 康复医学院, 福州 350122; 2. 福建省中医骨伤及运动康复教育部重点实验室, 福州 350122;

3. 南昌大学第一附属医院 康复科, 南昌 330000; 4. 福建中医药大学 康复产业研究院, 福州 350122;

5. 宁波大学 体育学院, 大健康研究院, 浙江 宁波 315211; 6. 同济大学附属养志康复医院 物理治疗科, 上海 200003;

7. 福州市第二人民医院 康复科, 福州 350122)

摘要:目的 观察膝骨关节炎(knee osteoarthritis, KOA)患者和健康人群在练习太极云手初学阶段的下肢动态稳定性和运动学、动力学特征差异。方法 招募30名太极初学者,包括15名KOA患者和15名健康对照组,在太极拳专家的指导下进行2h太极云手练习。采用运动捕捉系统和三维测力台,采集并计算云手运动过程中左侧下肢的动态稳定性指标以及运动学和动力学指标。结果 与健康对照组相比,KOA患者在云手动作中表现出更小的内外侧倾斜角,踝关节背屈角度的均值和峰值均减少,髋关节内收角度峰值减少,而膝关节屈曲峰值力矩增大($P<0.05$)。结论 KOA患者采用了适应性的姿势策略以维持太极云手运动中的横向稳定性,但在运动初学阶段应建议采用综合训练方案以减少下肢屈曲时的关节负荷。

关键词: 膝骨关节炎; 太极云手; 动态稳定性; 运动学; 动力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2025.02.014

Biomechanical Characteristics of Lower Limbs in Female Patients with Knee Osteoarthritis at the Beginning Stage of Learning Tai Chi Yunshou Movement

LIN Ziling^{1,2}, XIONG Feng³, HOU Meijin^{2,4}, MA Ye⁵, LIU Benke⁶, CHEN Bo⁷, WANG Xiangbin^{1,2}

(1. College of Rehabilitation Medicine, Fujian University of Traditional Chinese Medicine, Fuzhou 350122, China; 2. Key Laboratory of Orthopedics & Traumatology of Traditional Chinese Medicine and Rehabilitation Ministry of Education, Fuzhou 350122, China; 3. Department of Rehabilitation, the First Affiliated Hospital of Nanchang University, Nanchang 330000, China; 4. Rehabilitation Industry Institute, Fujian University of Traditional Chinese Medicine, Fuzhou 350122, China; 5. Research Academy of Grand Health, Faculty of Sports Sciences, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 6. Department of Physical Therapy, Yangzhi Rehabilitation Hospital, Tongji University, Shanghai 200003, China; 7. Department of Rehabilitation, the Second People's Hospital of Fuzhou City, Fuzhou 350122, China)

收稿日期: 2024-09-10; 修回日期: 2024-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(82074515, 81774384), 福厦泉国家自主创新示范区智能可穿戴与运动健康协同创新平台项目(2022FX7)

通信作者: 王芴斌, 教授, E-mail: wangxbn@fjtcn.edu.cn

Abstract: Objective To observe the differences in dynamic stability and kinematic/kinetic characteristics of the lower limbs between patients with knee osteoarthritis (KOA) and healthy individuals at the beginning stage of practicing Tai Chi Yunshou movement. **Methods** Thirty Tai Chi beginners, including 15 patients with KOA and 15 healthy controls, were recruited to practice Tai Chi Yunshou movement for two hours under the guidance of a Tai Chi expert. A motion capture system and a three-dimensional force platform were used to collect and calculate dynamic stability parameter as well as kinematic and kinetic parameters of the left lower limb during the Yunshou movement. **Results** Compared with healthy controls, patients with KOA demonstrated a smaller center of mass (COM)-center of pressure (COP) inclination angle, reduced mean and peak ankle dorsiflexion angle, reduced peak hip adduction angle and increased peak knee flexion moment during the Yunshou movement ($P < 0.05$). **Conclusions** Patients with KOA use adaptive postural strategies to maintain the lateral stability in Tai Chi Yunshou exercise, but a comprehensive training programme should be recommended to reduce the joint loading during flexion of the lower limbs at the beginning stages of this exercise.

Key words: knee osteoarthritis; Tai Chi Yunshou; dynamic stability; kinematics; kinetics

膝关节炎(knee osteoarthritis, KOA)是以退行性病理改变为基础的疾 病,可表现为膝关节肿痛、上下楼梯膝关节痛、坐起立行时膝部酸痛不适等^[1-2]。在中国,女性、男性老年人群中 KOA 的患病率分别为 42.8%、21.5%^[3]。由于神经肌肉控制能力下降、本体感觉减弱以及膝关节疼痛,KOA 患者的跌倒风险较高^[4]。数据显示,KOA 患者在 1 年内的跌倒频率可达 63.2%^[5]。由于 KOA 无法完全治愈,使用非药物治疗来控制 KOA 的进展、增强膝关节功能并改善生活质量显得尤为重要。

太极拳作为中国传统的运动功法之一,能够提高老年人本体感觉和平衡能力、防止跌倒,有助于膝骨性关节炎的功能康复^[6-7]。其中太极拳的经典招式云手,具有舒缓流畅的特点,尤为适合老年人练习^[8]。既往研究发现,经验丰富的太极拳练习者在云手招式过程中膝关节的屈伸、内外翻以及髌关节屈伸活动度相对于正常步行更小,有助于减小膝关节的压力^[9]。同时,经验丰富的太极拳练习者在云手运动中的地面反作用力也较步行更小^[10]。

然而,膝关节的不稳定性和关节过度负荷问题是 KOA 患者在运动治疗前需谨慎考虑的问题^[11],尤其是在练习太极云手的初期阶段。研究发现,膝关节疼痛的发生率在初学太极拳人群中呈现上升的趋势,可能与训练过程中为避免膝关节疼痛和功能障碍而采用不正确的运动策略有关^[12]。关节活动度的调整、肌肉的协同收缩等已被发现是维持稳定、减少跌倒风险的有效策略^[13-14]。但过度或不正确的适应性运动策略,可能会导致代偿性损伤或加

重膝关节的磨损^[15]。因此,观察 KOA 患者初学太极云手招式的下肢稳定性和生物力学特征,有助于为 KOA 患者初期的运动建议提供理论依据。

本文旨在比较太极云手招式在 KOA 患者和健康人群的动态稳定性和生物力学特征的差异,以期进一步明确 KOA 患者在初学太极云手招式中下肢的相应变化,为预防或减少锻炼损伤提供新思路 and 视角。本研究假设,与健康对照组相比,KOA 患者会采用适应性的运动策略以维持动态稳定,且不会增加关节负荷。

1 对象与研究方法

1.1 研究对象

1.1.1 试验组纳入标准 ①符合 KOA 诊断标准,参考 2018 年中华医学会骨科分会发布的《骨关节炎诊疗指南(2018 年版)》^[16];②年龄 ≥ 50 岁,女性;③两侧的膝关节 X 线影像显示 Kellgren-Lawrence 分级为 II 和/或 III 级;④自愿参加本次测试并签署知情同意书。

1.1.2 对照组纳入标准 ①年龄 ≥ 50 岁,女性;②能自然行走,各关节活动正常;③近 6 个月无关节僵硬疼痛、外伤史、手术史;④自愿参加本次测试并签署知情同意书。

1.1.3 排除标准 ①长期规律运动或太极拳练习者;② Berg 平衡量表(Berg balance scale, BBS)评分 < 40 分^[17];③患有严重心脑血管、精神疾病;④患有其他引起步态异常的全身骨骼肌肉疾病或功能障碍。

招募 KOA 患者(试验组)和健康人群(对照组)各 15 人(见表 1)。符合纳排的参与者将由同一名教学经验丰富的太极拳老师指导练习云手招式,动作质量需达到 80 分以上^[18],再进入下一阶段的试验流程。本研究获得福建中医药大学附属康复医院伦理委员会批准(2018KY-006-03)。

表 1 受试者基本信息

Tab. 1 Basic information of the subjects

指标	试验组(n=15)	对照组(n=15)	P
年龄/岁	64.60±4.50	62.53±3.87	0.19
BMI/(kg·m ⁻²)	24.07±2.34	23.55±3.83	0.66
v/(m·s ⁻¹)	0.07±0.03	0.06±0.02	0.61
BBS	55.83±0.48	55.69±0.60	0.92
K&L 等级	II: 9 III: 6	—	

注: v 为云手动作的速度。

1.2 实验仪器

1.2.1 运动捕捉系统 采用 10 个三维红外高速摄影头及 Qualisys 运动捕捉系统(Qualisys 公司,瑞典),配套直径 14 mm 的反光标志点,采集下肢髋、膝、踝关节运动学参数,采样频率为 100 Hz。

1.2.2 测力板 共有两块测力板(AMTI 公司,美国),数据捕捉区域为 8 m×2 m。以 1 kHz 采样频率采集运动过程中下肢关节的动力学参数,同时采集地面反作用力数据。

1.3 测试流程

受试者更换实验室服装(运动背心、短裤),按照 Qualisys Model 方案在身上粘贴 55 个反光标志点^[19],用双胶带将反光标志点贴在皮肤上。所有的标点贴置均由同一名操作人员完成。实验开始前,受试者先演习几次太极云手动作,熟悉环境与场地。同时告知受试者实验过程中眼睛目视前方,自然状态下完成太极云手动作。

首先采集受试者的 3 s 静态模型,而后要求受试者赤脚下以舒适的速度开始太极云手动作(见图 1)。每个参与者至少采集 3 次有效的云手动作。太极云手的运动周期定位为同一只脚连续两次接触,即判定为有效数据。

1.4 数据处理和实验参数

采用滤波阈值为 6 Hz 的 Butterworth 滤波器,降低标记物轨迹噪声。胸、骨盆、上臂、前臂、大腿、小腿和足的节段坐标系参考国际生物力学学会(International Society of Biomechanics)的推荐方

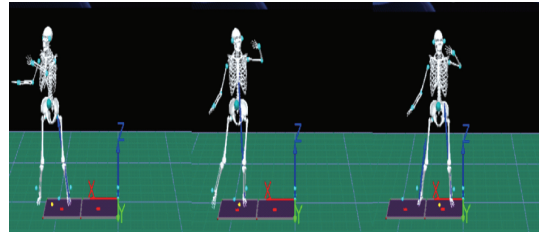


图 1 太极云手招式的动作示范

Fig. 1 Demonstration of the Tai Chi Yunshou movement

法^[20-21]。通过逆运动学和逆动力学算法计算关节角度和力矩^[22]。关节旋转顺序依次为屈/伸、内收/外展和内/外旋。所有数据均使用 Visual 3D(C-Motion 公司,美国)进行分析。

1.4.1 动态稳定性指标 参考既往的研究方法计算各节段的质量中心(center of mass, COM)^[22]。如图 2 所示,COM 至压力中心(center of pressure, COP)的倾斜角是指连接 COM 与 COP 的直线与通过 COP 垂直线形成的夹角,包括前后侧方向(θ_{AP})和内外侧方向(θ_{ML})。同时计算 COM 至 COP 之间的距离峰值,包括前后侧方向(COM-COP_{AP})和内外侧方向(COM-COP_{ML}),其计算公式为^[23]:

$$\theta_{\text{COM-COP}} = \arctan\left(\frac{\text{COM-COP}}{\text{COM}}\right) \quad (1)$$

式中:COM-COP 包含矢状面和冠状面 COM 到 COP 之间的矢量,以分别计算得出前后侧和内外侧方向的倾斜角和距离峰值。

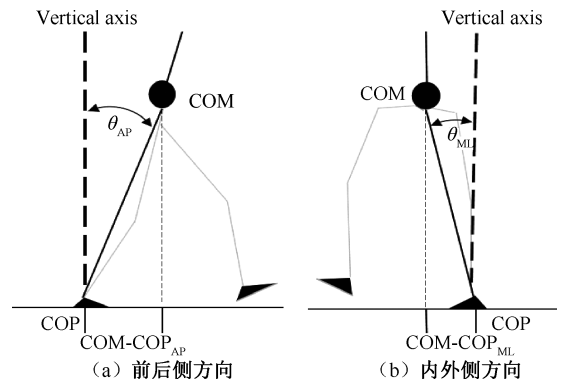


图 2 倾斜角和 COM 至 COP 之间距离峰值计算图示

Fig. 2 Calculation diagram of the inclination angle and peak distance between the COM and COP

(a) In anterior-posterior direction, (b) In medial-lateral direction

1.4.2 运动学指标 包括踝关节矢状面关节活动

度的均值和峰值、膝关节屈曲活动度均值和峰值、髋关节矢状面和冠状面的关节活动度均值和峰值。

1.4.3 动力学指标 包括髋关节的屈曲和内收力矩峰值、膝关节的屈曲力矩峰值和内收外力矩,并通过力矩-时间曲线分别计算膝关节的屈曲和内收角冲量^[24]。

各项指标均具有良好的重测信度^[25-26]。根据太极云手招式的特点,运动从左下肢开始,故选择左腿的单腿支撑期进行分析。

1.4.4 安全性指标 记录试验过程中有无出现不适等疼痛症状,若出现疼痛情况,采用视觉疼痛模拟评分记录。

1.5 统计学方法

采用 SPSS 25.0 软件进行数据分析,计量资料符合正态分布采用(均数±标准差)表示,不符合正态分布以 $M(P25, P75)$ 表示。根据正态性采用独立样本 t 检验或 Mann-Whitney U 秩和检验比较两组的动态稳定性、运动学和动力学参数的差异, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义,显著性水平 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果

2.1 动态稳定性指标

结果显示, KOA 患者在内外侧倾斜角 (θ_{ML}) 显著小于对照组 ($P < 0.05$), 而前后方向的倾斜角 (θ_{AP}) 差异没有统计学意义 ($P > 0.05$)。此外, COM 和 COP 的前后距离峰值 (COM-COP_{AP}) 和内外距离峰值 (COM-COP_{ML}) 在两组间差异没有统计学意义 ($P > 0.05$), 见表 2。

表 2 动态稳定性参数 (* $P < 0.05$)

Tab. 2 Parameters of dynamic stability

参数	试验组 ($n=15$)	对照组 ($n=15$)
$\theta_{AP}/(^{\circ})$	12.57±1.31	13.44±2.61
$\theta_{ML}/(^{\circ})$	1.45±0.30	1.74±0.35*
COM-COP _{AP} /cm	0.46±0.70	0.48±0.76
COM-COP _{ML} /cm	0.57±0.16	0.51±0.25

2.2 运动学指标

在左侧单支撑期, KOA 患者踝关节的背屈活动度峰值和平均值均小于对照组[见图 3(a)]。而踝关节跖屈活动度峰值和平均值在两组间的差异均无统计学意义 ($P > 0.05$)。KOA 患者膝关节的屈曲活动度峰值和平均值与对照组相比也无统计学意

义 ($P > 0.05$)。KOA 患者的髋关节内收活动度峰值显著小于对照组 ($P < 0.05$), 髋关节的屈曲活动度峰值和平均值、内收活动度平均值以及外展活动度的峰值和平均值差异在两组间也均无统计学意义 ($P > 0.05$), 见表 3。

表 3 下肢关节运动学参数 (* $P < 0.05$)

Tab. 3 Kinematic parameters of lower limbs 单位: ($^{\circ}$)

关节	参数	试验组 ($n=15$)	对照组 ($n=15$)
踝	背屈峰值	16.54±6.87	22.75±5.14*
	背屈平均值	10.07±5.93	14.82±4.63*
	跖屈峰值	16.73(11.29, 21.01)	13.82(8.93, 22.74)
	跖屈平均值	0.94(0.41, 1.69)	0.67(0.23, 1.23)
膝	屈曲峰值	43.20±6.19	46.71±7.97
	屈曲平均值	29.49±8.08	29.08±11.91
髋	屈曲峰值	35.99±8.56	38.47±11.06
	屈曲平均值	25.11±11.32	29.19±11.85
	内收峰值	4.91(4.41, 6.76)	8.40(5.37, 10.31)*
	内收平均值	1.39(0.89, 2.95)	2.06(1.14, 3.15)
	外展峰值	17.01±9.22	21.24±5.02
	外展平均值	5.73(0.62, 7.29)	5.87(3.85, 8.68)

2.3 动力学指标

髋关节的屈曲、内收力矩峰值在两组间的差异未见统计学意义 ($P > 0.05$)。KOA 患者的膝关节屈曲力矩峰值显著大于对照组[见图 3(b)]。而膝关节的内收外力矩、屈曲和内收角冲量均值在两组间的差异均无统计学意义 ($P > 0.05$), 见表 4。

表 4 髋、膝关节动力学参数 (* $P < 0.05$)

Tab. 4 Kinetic parameters of the hip and knee joint

单位: $N \cdot m/kg$

关节	参数	试验组 ($n=15$)	对照组 ($n=15$)
髋	屈曲力矩峰值	0.07(0.05, 0.18)	0.07(0.01, 0.07)
	内收力矩峰值	0.12±0.09	0.15±0.09
膝	内收角冲量均值	0.35(0.25, 0.55)	0.30(0.12, 0.47)
	内收外力矩	0.37±0.17	0.31±0.14
	屈曲角冲量均值	1.59±0.93	1.79±0.44
	屈曲力矩峰值	0.08±0.04	0.05±0.02*

2.4 安全性指标

两组在试验过程中均未发生膝关节疼痛等其余不良事件。

3 讨论

本文比较了太极云手动作用在 KOA 患者和健康对照组的动态稳定性、运动学和动力学参数的特征

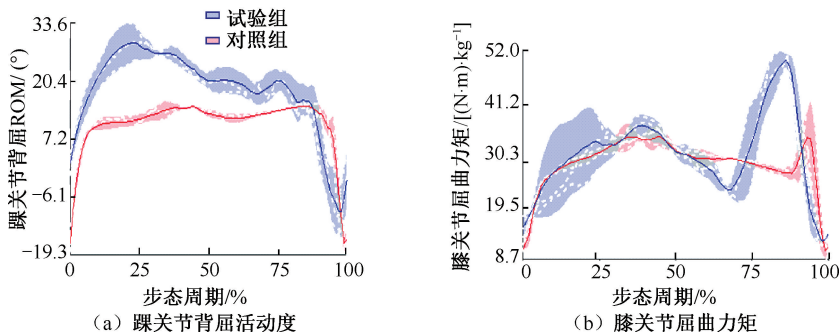


图3 两组踝关节背屈活动度和膝关节屈曲力矩全周期均值差异

Fig.3 Differences in ankle dorsiflexion range of motion (ROM) and knee flexion moment between two groups (a) Ankle dorsiflexion ROM, (b) Knee flexion moment

差异。结果发现,与本研究的部分假设一致,即KOA患者在太极云手动作中表现出更小的踝关节背屈活动度和髌关节内收活动度,以维持内外侧的动态稳定性。而与本研究假设不一致的是,KOA患者的屈曲力矩峰值显著大于健康对照组。

研究表明,前后方向的倾斜角越大,中外侧方向的倾斜角越小,则姿势的稳定性控制越好^[27]。本文发现,虽然前后方向的倾斜角无显著性差异,但KOA患者内外侧方向的倾斜角表现出更小的角度,该结果提示KOA患者在内外侧方向上具有更佳稳定性。Wu等^[28]研究发现,女性老年人在双任务情况下表现出更小的内外侧倾斜角,通过采用保守的步态策略,将身体的重力线尽可能靠近支撑脚中心,以达到最佳稳定的功能状态。结合太极云手的运动特点,当上臂向左或向右移动时,躯干和骨盆也会发生侧移。此外,研究发现增大躯干侧屈是减少膝关节内收外力矩的有效策略^[29]。由此可见,太极云手的运动特点和姿势策略的调整(增加躯干侧屈、骨盆侧移活动度)有助于KOA患者在保守策略下以维持稳定。Hahn等^[31]研究认为,减少COM和COP之间的距离可以产生更小的力臂,减少对肌肉力量的需求,减少支撑肢体的机械负荷^[30]。相反,较大的COM-COP距离峰值则容易使COM偏离稳定性限制。虽然本文未发现COM至COP的距离峰值具有显著组间差异,但该结果提示KOA患者在保持相同的COM-COP距离时,将身体重心更靠近支撑脚中心,故也会表现出更小的内外侧倾斜角。因此,在太极云手初学阶段,保证较小的COM-COP距离、增加躯干侧屈、骨盆侧移活动度以及重心靠近

支撑脚中心是维持稳定、减少跌倒的有效策略。

本文结果显示,相比于健康对照组,KOA组踝关节的背屈活动度均值和峰值均表现出更小的角度。研究发现,KOA患者在爬楼梯时也会表现出较小的踝关节背屈活动度^[32],长期太极拳练习者在双任务条件下,也会采用独特的步态策略以获得较低的跌倒风险^[33]。Sang等^[34]研究显示,踝关节背屈度每降低 1° ,膝关节的内收外力矩便会降低2.7%。由此可见,减少踝关节背屈活动度可能是KOA患者为减轻关节疼痛、保持关节稳定性的一种运动策略。同时,KOA组髌关节的内收活动度峰值也较健康对照组更小,提示KOA患者可能会采取较小的髌关节内收活动度,维持较大的侧向步幅,以增强侧向稳定性^[35]。因此,减少踝关节背屈活动度和髌关节内收活动度均是KOA患者为维持太极云手运动中稳定性的运动策略。

虽然膝关节的屈曲活动度在两组间未见显著差异,但KOA组膝关节屈曲力矩峰值较健康对照组更大,该结果可能与KOA患者在云手运动中出现肌肉共激活有关。研究发现,较高的肌肉共激活是肌肉无力下维持一定功能水平的代偿机制^[36]。其中,腘绳肌和股四头肌的共同激活会直接增加膝关节的屈曲力矩^[37]。另外,本文发现,内收外力矩作为间接反映膝关节内侧负荷分布的参照指标^[38],在两组之间差异没有统计学意义。该结果表明,太极云手是一种对膝关节温和、相对安全的侧步运动。相较于常规步态,太极云手的开立步法对股外侧肌、半膜肌、半腱肌、股二头肌的激活效果更明显,有助于提高练习者侧向步法的膝关节外展活动度和膝

关节肌群力量;同时,微屈的马步姿势也能够提高膝关节屈曲活动度^[39]。但实际应用中仍需结合针对性的康复训练来减少膝关节肌肉的共激活,如股四头肌的肌力训练、腓绳肌的牵伸训练,从而减少膝关节屈曲负荷^[40]。同时,在太极云手运动的初学期间,建议在专业教练的指导下锻炼,以确保正确的运动姿势,减少运动损伤的出现。

本研究也存在一定的局限性:①考虑 KOA 的发病人群主要在老年女性,故所招募的受试者均为女性,因而研究结果对老年男性是否会表现出同样的生物力学特征尚不清楚。②缺乏表面肌电数据,使得太极云手运动对下肢肌肉的影响尚不清楚。但本研究提供了太极云手运动对 KOA 患者生物力学特征的初步认识,未来可开展大样本、长期干预时间的随机对照研究,以证实太极云手运动对 KOA 患者稳定性和肌群的长期疗效。

4 结论

KOA 患者在太极云手运动时采用了相应的姿势策略以维持横向稳定性,具体表现为:减少踝关节背屈活动度,减少髌关节内收活动度以及增加膝关节的屈曲力矩峰值。基于这些结果,太极云手作为一种温和的运动方式,可推荐作为改善 KOA 平衡和身体能力的运动方式,但同时建议应结合其他针对性的训练,如增强肌肉力量、减少肌肉共激活,从而降低膝关节屈曲时的关节负荷。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:林紫玲负责数据统计和论文撰写;熊凤负责受试者招募;侯美金、马晔负责数据分析方法和论文修改;刘本科、陈博负责数据采集;王芩斌负责研究设计、论文指导和修改。

参考文献:

[1] 李宏恩, 马恺, 石春花, 等. 步态分析用于膝骨性关节炎诊断与功能评定的研究进展[J]. 生物医学工程与临床, 2024, 28(2): 281-286.

[2] MIGLIORE A, GIGLIUCCI G, ALEKSEEVA L, *et al.* Treat-to-target strategy for knee osteoarthritis. International technical expert panel consensus and good clinical practice statements [J]. *Ther Adv Musculoskelet Dis*, 2019(11): 1759720X19893800.

[3] ZAHNG Y, JORDAN JM. Epidemiology of osteoarthritis [J]. *Clin Geriatr Med*, 2010, 26(3):355-369.

[4] MANLAPAZ DG, SOLE G, JAYAKARAN P, *et al.* Risk factors for falls in adults with knee osteoarthritis: A systematic review[J]. *PM R*, 2019, 11(7): 745-757.

[5] SONOBE T, OTANI K, SEKIGUCHI M, *et al.* Radiographic knee osteoarthritis severity has no impact on fall risk: The locomotive syndrome and health outcomes in the aizu cohort study (LOHAS): A cross-sectional study [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2024, 25(1): 298.

[6] 李欣欣, 刘卉. 太极拳运动对健康老年人跌倒发生率、平衡和跌倒恐惧随访疗效的 Meta 分析[J]. 医用生物力学, 2021, 36(S1): 377.

[7] YANG F, LIU W. Biomechanical mechanism of Tai-Chi gait for preventing falls: A pilot study [J]. *J Biomech*, 2020(105):109769.

[8] 陈鹏, 刘海波, 姚杰, 等. 太极拳运动下肢生物力学研究进展[J]. 医用生物力学, 2017, 32(1): 92-97.

CHEN P, LIU HB, YAO J, *et al.* Progress of biomechanical study on the lower extremity in Tai Chi movemen [J]. *J Med Biomech*, 2017, 32(1): 92-97.

[9] LAW NY, LI JX. The temporospatial and kinematic characteristics of typical Tai Chi movements: Repulse monkey and wave-hand in cloud [J]. *Res Sports Med*, 2014, 22(2): 111-123.

[10] LI JX, LAW NY. Kinetics of the lower limb during two typical Tai Chi movements in the elderly [J]. *Res Sports Med*, 2018, 26(1): 112-123.

[11] KUCUKDEVECI A. Rehabilitation interventions in osteoarthritis[J]. *Best Pract Res Clin Rheumatol*, 2023, 37(2): 101846.

[12] 张彦龙, 陈思, 张愉, 等. 太极拳上步弓步动作足前角对膝关节载荷的影响及肌肉协调收缩策略[J]. 医用生物力学, 2021, 36(5): 718-724.

ZHANG YL, CHEN S, ZHANG Y, *et al.* Influences of foot progression angle during the Tai Chi step lunge movement on knee joint load and strategy of coordinated muscle contraction [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(5): 718-724.

[13] ZHANG X, PAN X, DENG L, *et al.* Relationship between knee muscle strength and fat/muscle mass in elderly women with knee osteoarthritis based on dual-energy X-Ray absorptiometry [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020,17(2): 573.

[14] CHAI Y, CHEN J, HOU M, *et al.* Gait strategies for individuals with knee osteoarthritis when transitioning between floor and stair walking [J]. *Front Physiol*, 2023, 14:1026299.

[15] 张欣. 从膝关节损伤角度分析太极拳的练习[J]. 科技视界, 2015(3): 67.

[16] 王弘德, 李升, 陈伟, 等. 《骨关节炎诊疗指南(2018年版)》膝关节骨关节炎部分的更新与解读[J]. 河北医科大学学报, 2019, 40(9): 993-995.

- [17] ABOU L, ILHA J, ROMANINI F, *et al.* Do clinical balance measures have the ability to predict falls among ambulatory individuals with spinal cord injury? A systematic review and meta-analysis [J]. *Spinal Cord*, 2019, 57(12): 1001-1013.
- [18] 石冰,胡勇刚,石峰. 大学生24式太极拳评价标准探讨[J]. 南阳师范学院学报(自然科学版), 2003(3): 111-113.
- [19] CAPPOZZO A, CATANI F, CROCE UD, *et al.* Position and orientation in space of bones during movement: Anatomical frame definition and determination [J]. *Clin Biomech*, 1995,10(4):171-178.
- [20] WU G, VAN DER HELM FC, Veeger HE, *et al.* ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion—Part II: shoulder, elbow, wrist and hand [J]. *J Biomech*, 2005, 38(5): 981-992.
- [21] WU G, SIEGLER S, ALLARD P, *et al.* ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion—Part I: ankle, hip, and spine [J]. *J Biomech*, 2002, 35(4): 543-548.
- [22] WINTER DA. Biomechanics of human movement with applications to the study of human locomotion [J]. *Crit Rev Biomed Eng*, 1984, 9(4): 287-314.
- [23] ABDUL YN, BASARUDDIN KS, ABU BS, *et al.* Quantification of gait stability during incline and decline walking: The responses of required coefficient of friction and dynamic postural index [J]. *J Healthc Eng*, 2022: 7716821.
- [24] TAMURA A, AKASAKA K, OTSUDO T, *et al.* Dynamic knee valgus alignment influences impact attenuation in the lower extremity during the deceleration phase of a single-leg landing [J]. *PLoS One*, 2017, 12(6): e179810.
- [25] MCGINLEY JL, BAKER R, WOLFE R, *et al.* The reliability of three-dimensional kinematic gait measurements: A systematic review [J]. *Gait Posture*, 2009, 29(3): 360-369.
- [26] STIEF F, BOHM H, MICHEL K, *et al.* Reliability and accuracy in three-dimensional gait analysis: A comparison of two lower body protocols [J]. *J Appl Biomech*, 2013, 29(1):105-111.
- [27] VAN DIJSSSELONK RB, DE JONG L, GROEN BE, *et al.* Gait stability training in a virtual environment improves gait and dynamic balance capacity in incomplete spinal cord injury patients [J]. *Front Neurol*, 2018(9): 963.
- [28] WU WL, WEI TS, CHEN SK, *et al.* The effect of Chinese Yuanji-dance on dynamic balance and the associated attentional demands in elderly adults [J]. *J Sports Sci Med*, 2010, 9(1):119-126.
- [29] GERBRANDS TA, PISTERS MF, Theeven P, *et al.* Lateral trunk lean and medializing the knee as gait strategies for knee osteoarthritis [J]. *Gait Posture*, 2017(51): 247-253.
- [30] HAHN ME, CHOU LS. Age-related reduction in sagittal plane center of mass motion during obstacle crossing [J]. *J Biomech*, 2004, 37(6): 837-844.
- [31] MANI H, HSIAO SF, TAKEDA K, *et al.* Age-related changes in distance from center of mass to center of pressure during one-leg standing [J]. *J Mot Behav*, 2015, 47(4): 282-290.
- [32] HICKS-LITTLE CA, PEINDL RD, HUBBARD TJ, *et al.* Lower extremity joint kinematics during stair climbing in knee osteoarthritis [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2011, 43(3): 516-524.
- [33] 马晓丽,李立,孙威,等. 长期太极拳练习者在下楼梯时受双任务范式的影响较小[J]. 医用生物力学, 2021,36(S1): 406.
- [34] KANG SH, LEE SJ, PRESS JM, *et al.* Real-time three-dimensional knee moment estimation in knee osteoarthritis: Toward biodynamic knee osteoarthritis evaluation and training [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2019, 27(6): 1263-1272.
- [35] 沈以昕,朱冬奇,牛文鑫. 太极拳的平衡维持作用及其生物力学研究进展[J]. 医用生物力学, 2018, 33(4): 372-377.
- [35] SHEN YX, ZHU DQ, NIU WX. Research progress on balance control and biomechanics of Tai Chi [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(4): 372-377.
- [36] SMITH SL, WOODBURN J, STEULTJENS M. Sex- and osteoarthritis-related differences in muscle co-activation during weight-bearing tasks [J]. *Gait Posture*, 2020(79): 117-125.
- [37] SMITH SL, ALLAN R, MARREIROS SP, *et al.* Muscle co-activation across activities of daily living in individuals with knee osteoarthritis [J]. *Arthritis Care Res*, 2019, 71(5): 651-660.
- [38] GERBRANDS TA, PISTERS MF, VERSCHUEREN S, *et al.* Determining the optimal gait modification strategy for patients with knee osteoarthritis: Trunk lean or medial thrust? [J]. *Gait Posture*, 2023(102): 1-9.
- [39] 庞博,纪仲秋,张子华,等. 基于AnyBody仿真的太极拳不同步型特征[J]. 医用生物力学, 2021, 36(6): 916-922.
- [39] PANG B, JI ZQ, ZHANG ZH, *et al.* Characteristics of different Tai Chi step types based on AnyBody simulation [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(6): 916-922.
- [40] WANG M, ZHANG C, YANG Z, *et al.* Muscle activation patterns and gait changes in unilateral knee osteoarthritis patients: A comparative study with healthy controls [J]. *Clin Rheumatol*, 2024, 43(9): 2963-2972.