

文章编号: 1004-7220(2025)01-0231-06

膝关节内收力矩影响因素的研究进展及其在膝骨关节炎诊疗中的应用

杨洪源¹, 张延明¹, 罗丁元², 王安然¹

(1. 山东第一医科大学(山东省医学科学院)运动医学与康复学院, 山东 泰安 271000;
2. 青岛大学附属泰安市中心医院 康复医学中心, 山东 泰安 271000)

摘要: 膝关节内收力矩(knee adduction moment, KAM)是膝关节生物力学研究中关键的生物力学指标,该指标与膝骨关节炎(knee osteoarthritis, KOA)的发生发展有密切的关系。因此,了解影响KAM的因素对于KOA疾病的诊疗具有重要作用。本文根据相关研究整理了可能影响KAM的因素。

关键词: 膝骨关节炎; 膝关节内收力矩; 影响因素

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2025.01.031

Research Progress on the Influencing Factors of Knee Adduction Moment and its Application in Diagnosis and Treatment of Knee Osteoarthritis

YANG Hongyuan¹, ZHANG Yanming¹, LUO Dingyuan², WANG Anran¹

(1. School of Sports Medicine and Rehabilitation, Shandong First Medical University (Shandong Academy of Medical Sciences), Tai'an 271000, Shandong, China; 2. Rehabilitation Medicine Center, Tai'an Central Hospital, Qingdao University, Tai'an 271000, Shandong, China)

Abstract: Knee adduction moment (KAM) is a key biomechanical index in knee joint biomechanics research, which is closely related to the occurrence and development of knee osteoarthritis (KOA). Therefore, understanding the factors influencing KAM is important for the diagnosis and treatment of KOA diseases. This review summarizes the factors that may affect KAM based on relevant research.

Key words: knee osteoarthritis; knee adduction moment; influencing factors

膝骨关节炎(knee osteoarthritis, KOA)是一种以软骨破坏、骨赘形成等为主要表现的退行性疾病,是引起膝关节疼痛、活动受限和导致慢性残疾的重要原因^[1]。一项使用中国健康与养老追踪调查(China health and retirement longitudinal study, CHARLS)数据分析发现,中国KOA发病率约为8.1%,其中女性相较于男性具有更高的发病率^[2]。

年龄、关节损伤、肥胖和关节畸形等是KOA常见的危险因素^[3]。KOA最常见于内侧间室,而内侧间室KOA的发生被认为和膝关节内侧间室负荷增加有关。膝关节内收力矩(knee adduction moment, KAM)是常用的反映膝关节内侧间室负荷的生物力学指标,主要由地面反作用力及其对膝关节中心的杠杆臂决定,通过向内侧传递至膝关节中心,力矢

收稿日期:2024-08-06; 修回日期:2024-09-02

通信作者:张延明,副教授,E-mail: 13562842022@163.com

量产生内收力矩^[4]。KAM 倾向于将膝关节置于内收至内翻位置,故 KAM 往往反映了膝内侧间室负荷的变化。并且较高的 KAM 可能导致软骨退化、关节间隙变窄以及关节疼痛,同时与 KOA 严重程度具有显著相关性^[5]。因此,明确影响 KAM 的因素对于深入了解 KOA 发生发展以及制定更好治疗干预措施至关重要。

1 影响 KAM 的内部因素

1.1 体质量指数

肥胖是引人瞩目的公共健康问题。根据世界卫生组织的调查和统计,目前,全球约有 1/8 人口患有肥胖症^[6]。肥胖不仅是心脏病、高血压、糖尿病及肿瘤等疾病的常见危险因素,同时也是 KOA 发生发展的重要影响因素之一^[7]。研究表明,与正常体重相比,较大的体质量指数 (body mass index, BMI) 会导致更大 KAM, 一项研究比较了 48 名肥胖者 (BMI = 33.03 ± 0.59) 与 48 名非肥胖者 (BMI = 21.5 ± 0.25) 在自选速度步行中的步态, 结果发现肥胖受试者步行时 KAM 更大^[8]。有研究使用 Eagle 运动捕捉系统收集并分析了 487 名确诊为 KOA 患者在步行中的步态, 结果表明患者体质量每增加 1 kg, KOA 最多会增加 0.4 N·m^[9]。也有在关于患有 KOA 老年人的前瞻性研究中发现, 体质量每减少 1 kg, KAM 会相应减少 0.5 N·m; 而体质量每减少 0.45 kg, 步行时膝关节所承受的负荷就会减少 400%^[10]。一项关于减肥手术对髌、膝关节疼痛影响的系统综述指出, 3 400 名参加减肥手术的参与者在术后体重减轻的同时, 他们的膝关节疼痛强度也有所减轻^[11]。由此可见, 肥胖不仅是 KOA 发生发展的影响因素, 也是引起膝关节疼痛的常见原因。因此, 减肥可能是一种通过降低 KAM 从而降低 KOA 发生、延缓疾病进展以及减轻膝关节疼痛的有效途径之一。

1.2 性别

流行病学研究结果显示, 女性患 KOA 风险是男性的 2 倍, 出现这种情况的原因可能与男性相较于女性具有更强健的骨骼肌肉系统和关节稳定性有关; 并且女性由于生育原因, 其骨盆更宽大且更易发生位置改变, 从而导致下肢生物力学发生改变。此外, 女性相较于男性激素水平更易发生变化, 尤

其是绝经后女性, 加剧了骨骼钙流失及肌肉质量下降。然而, 关于不同性别之间 KAM 是否存在差异, 目前尚未达成一致意见。部分研究表明, 在步态周期中不同性别之间膝关节运动学没有显著性统计学差异。然而, 也有研究发现, 女性在步态周期中初始触地时刻的膝关节屈曲力矩较低, 而在预摆动阶段的膝关节伸展力矩较高, 同时注意到女性在步态周期中具有较高的 KAM。研究人员招募 43 名男性和 43 名女性志愿者, 通过比较不同性别之间步态周期中作用于膝关节的力和力矩特征发现, 作用于膝关节的力在男性中较高, 而使用身高、体质量进行标准化后的力矩在女性中较高, 且女性在站立阶段膝关节额状面力矩更高^[12]。相似的, 也有研究在对 99 名没有 KOA 健康老年人膝关节负荷的横断面研究中发现, 老年女性在站立阶段的峰值 KAM 较男性高 27%, 平均 KAM 高 30%, 表明女性在步态周期中有更高的 KAM^[13]; 此外, 该研究还发现, 女性在步态周期中较高的 KAM 与女性较窄的步幅和骨盆随年龄增大而逐渐变宽有关。因此, 女性具有较高的 KOA 发病率可能与 KAM 有一定的相关性。

1.3 膝关节畸形

近年来, 研究者深入探讨了膝关节成角畸形与旋转畸形对 KAM 的复杂影响, 揭示了这些异常形态在膝关节力学机制中的关键作用^[14]。研究发现, 股骨前倾角增大对儿童 KAM 产生影响。与正常发育的儿童相比, 前倾角增加的儿童在从站立中期到末期的步态过程中, KAM 呈现出显著降低的趋势^[15]。该结果强调了股骨前倾角作为调节 KAM 的重要因素。另一方面, 胫骨内扭转对 KAM 的影响则表现出双向性。部分研究显示, 与正常儿童相比, 胫骨内扭转增加会显著降低膝关节 KAM 的第 1 峰值 (KAM1), 但同时却增加了第 2 峰值 (KAM2)。然而, 也有研究指出, 胫骨扭转的另一种模式, 即增加扭转度会导致 KAM1 的上升和 KAM2 的下降, 表明胫骨扭转对 KAM 的影响具有复杂性和多样性。进一步比较膝关节成角畸形与旋转畸形的影响, 研究普遍指出, 成角畸形对 KAM 的影响更为显著。Mcclure 等^[16] 研究发现, 与膝关节中性排列相比, 膝外翻畸形会导致 KAM1 和 KAM2 减少。相反, 膝内翻儿童会表现出更高的 KAM1 和 KAM2, 提示膝内翻畸形可能加剧膝关节内侧的负荷。值得注意的

是,体质量和膝关节内翻畸形的同时存在会进一步放大这种影响。Voignier 等^[17]认为体质量较高且伴有膝内翻畸形的个体,其 KAM 显著增大,这增加了膝关节内侧软骨退化的风险。也有研究深入探讨了膝内翻与 KOA 疾病进展之间的关系,结果发现,膝内翻患者不仅表现出较高的内侧地面反作用力和垂直负荷率幅度,这些力学特征的改变还可能降低 KOA 的发病年龄,并加速疾病的进展^[18]。这一发现为理解 KOA 的发病机制及制定早期干预策略提供了重要依据。综上所述,膝关节的成角畸形和旋转畸形均对 KAM 产生显著影响,且这些影响在不同类型畸形和个体特征间存在显著差异。因此,在临床实践中,应综合考虑患者的具体畸形类型、体质量及其他相关因素,以制定个性化的治疗方案和预防措施。

1.4 膝关节周围肌肉功能状态

根据膝关节解剖分析,穿过膝关节的肌肉传统上被分为膝关节屈肌和伸肌,并且它们具有矢状面运动的协助或对抗的功能。然而,膝关节功能负载并不限于单个运动轴。理论上,穿过膝关节的每块肌肉都应有其独特的解剖方向。当被激活时,它可以沿着特定的方向产生力矩,并抵抗引起该力矩的外力。因此,KOA 患者膝关节周围肌肉的功能状态可能引起 KAM 变化^[19-20]。研究表明,股四头肌的功能状态对于 KAM 具有较大的贡献。股内侧肌与股外侧肌的解剖横截面积比率越大,步态中的 KAM 越大^[21]。Jeong 等^[22]研究发现,股四头肌的肌肉参数决定了 KAM 和步态时空参数的相关特性,即股内侧肌与股外侧肌的肌肉厚度和激活比率与 KAM 相关,股内侧肌可能通过影响 KAM 对减弱膝关节额面负荷不平衡发挥着重要作用,从而有助于维持膝关节的稳定性,避免 KOA 的发生发展。然而,也有研究表明,股四头肌似乎对于 KAM 的影响并不明显。Zeng 等^[23]研究认为,膝关节步行中受到的负荷与步行速度具有相关性,而与股四头肌强度的相关程度较低。也有研究显示,股四头肌强化训练对 KAM 没有显著影响,但能有效缓解 KOA 引起的膝关节疼痛^[24]。KAM 是膝关节额状面负荷的重要反映指标之一。因此,解剖位置在膝关节内侧或外侧以及作用方向,与膝关节内翻或外翻一致的肌肉或肌肉群,似乎对 KAM 具有更重要的作用。然而,

目前缺少相关研究来验证该猜想的正确性。研究发现,增强阔筋膜张肌能够有效缓解 KOA 带来的疼痛等不适感,并延缓 KOA 疾病的发展^[25]。也有研究表明,髋关节、踝关节及脊柱周围肌肉对于 KOA 的疾病发生发展都具有一定的影响^[26]。但缺乏证据表明是否与 KAM 具有相关性,故未来的研究可以将此作为关注方向。

1.5 膝关节邻近关节的结构与功能特征

由于下肢是一个连续的关节系统,因此对于 KOA 患者而言,除了膝关节自身外,还应考虑髋部、脚踝功能状态以及各个关节之间的协调性^[27]。步态期间下肢各关节的协调变异程度可能与 KOA 的发生发展有关^[28]。研究人员通过观察 KOA 患者与健康对照者在步态中髋、膝关节的协调性发现,相比于健康对照者,KOA 患者具有更高的协调变异度^[29]。就各个关节之间的协调性而言,目前更多研究关注于髋、踝关节以及其他可能改变膝关节负荷结构的变化。研究发现,步态过程中一侧骨盆倾斜会增加另一侧 KAM^[30]。在研究 KAM 与 KOA 症状之间的关系中发现,骨盆倾斜角度显著影响 KAM 与 KOA 症状之间的关系,骨盆倾斜角度与 KOA 患者膝关节疼痛具有正相关性。比较足内侧和足外侧负荷对膝关节负荷的影响发现,足内侧负荷持续存在能使 KAM 平均减少 18%,这种减少是由于内侧的力转移到外侧而引起^[31]。研究认为,脚趾向外的脚位置可以通过减少相对于额平面中膝关节中心的净地面反作用力矢量的力臂长度机制来减少 KAM。另外,足尖外展角度(foot progression angle, FPA)与 KAM 的变化相关,FPA 能显著影响站立后期的 KAM^[32]。此外,不少研究证明,足部畸形,包括足外翻或足内翻以及高弓足、扁平足都会影响 KAM。

2 影响 KAM 的外部因素

2.1 运动因素

膝关节是运动的主要承担者,不同运动模式下的膝关节具有不同的生物力学特征。速度是运动中常见的评价指标。与缓慢的步速相比,步速越快,膝关节所受到的负荷越大,尤其对 KAM 的影响更加深远。研究发现,随着步速增加 15%,KAM 增加约 7%。众所周知,步速改变可以通过改变步幅

或步频实现,但仅仅增加步频可能不会改变步速;而无论是单独增加步幅或同时增加步频都会加快步速,从而增加 KAM。并且不同的运动场景以及运动形式都会产生不同的膝关节负荷。既往研究也证明了不同运动模式对膝关节负荷会产生不同的分布特征。同时,也有不少研究关注通过运动改善膝关节负荷的平衡。一项纳入了 33 项希望通过运动来改善膝关节负荷的研究荟萃分析,这些运动包括增强髌关节内收肌或外展肌、强化膝关节伸肌以及强化足跖屈肌,结果显示运动疗法对于 KAM 没有显著改善,但对于 KOA 患者,膝关节功能通过运动疗法均得到了一定程度的提升,尤其是膝关节疼痛等不适得到了有效的缓解^[33]。太极拳作为我国传统文化的瑰宝,对于保护膝关节健康和改善膝关节功能具有显著的作用^[34-35]。Liu 等^[36]研究发现,太极步态能够将 KAM 峰值降低 25%~47%,太极拳可能对于 KOA 的发生发展具有积极作用。虽然运动疗法对于 KAM 的影响目前仍存在争议,但毫无疑问的是,运动疗法对于膝关节的健康保护和延缓退变是一个重要的潜在方式。

2.2 鞋的影响

鞋作为日常不可或缺的穿戴品,种类繁多,从跑鞋、足球鞋到篮球鞋、休闲鞋,每一类都专为特定活动设计。然而,这些鞋类选择不仅关乎舒适与时尚,更直接影响着膝关节的生物力学特性。尤其是对 KOA 患者而言,鞋的影响尤为显著。一项研究揭示了穿鞋对膝关节负荷的显著影响,特别是 KAM 的增加,强调了鞋类选择在调节膝关节压力中的重要作用^[37]。更进一步研究指出,鞋跟高度可能是影响 KAM 变化的关键因素之一。为减轻 KAM,近年来相关学者尝试通过增厚外侧鞋底或内置侧向楔形矫形器等创新设计来干预^[38],其初衷是引导压力中心横向移动,达到减少内收力矩的效果。然而,这些解决方案并非毫无争议。有学者担忧它们可能引发脚部和腿部姿势的不良改变,甚至加速外侧鞋底的磨损,最终适得其反。此外,特定设计还可能诱发距下关节旋后,进而加剧膝关节内翻,导致 KAM 不降反升。另一方面,鞋底硬度同样是一个不容忽视的因素。研究指出,过硬的鞋底可能增加髌、膝关节的负荷,这对于 KOA 患者无疑是雪上加霜。因此,在选择鞋类时,平衡舒适度与支撑性,避

免过硬的鞋底设计,是保护膝关节健康的关键。

3 其他因素

对于 KOA 患者,除了关节形态结构以及周围肌肉等会引起 KAM 的改变外,也会因膝关节置换术发生改变。研究表明,膝关节置换术能够有效改善 KOA 患者静止状态下的 KAM,尤其是对于膝关节存在内翻畸形的患者。但是,对于患者运动状态下 KAM 的变化仍存在争议。有研究发现,在全膝关节置换(total knee arthroplasty, TKA)术后 6 个月期间可见 KAM 较术前改善,但这一变化在术后 1 年后会逐渐消失,这样的改变可能会加快聚乙烯衬垫的磨损,影响假体的使用寿命^[39]。对于进行单侧膝关节置换的患者,非手术侧 KAM 会出现增大的趋势,同时非手术侧膝关节疼痛会增加。因此, KOA 患者行 TKA 后的管理是手术效果重要的组成部分。对于 KOA 患者,使用手杖或助行器是常见的缓解疼痛和改善活动能力的手段。但也有研究认为,使用助行器并不会改善 KAM,且长时间使用助行器可能会降低患者的下肢肌肉质量,进一步加重 KOA 的发展。同时,年龄的增长以及糖尿病、高血脂等基础疾病的存在,也可能会引起 KAM 的变化,增加 KOA 发生的概率或加快疾病的进程。

4 KAM 在 KOA 诊疗中的应用

KAM 作为评估膝关节内侧间室负荷的重要生物力学参数,与 KOA 的发生和发展密切相关。首先, KAM 可辅助医生判断 KOA 的严重程度及病因。通过测量 KAM 可以了解膝关节在行走或负重过程中的受力情况,从而评估下肢力线是否异常,以及膝关节应力分布是否失衡。同时,在 KOA 的物理治疗中,通过调整步态、使用矫形鞋垫或进行肌肉力量训练等方式,可以有效降低 KAM,减轻膝关节的负担,从而缓解疼痛和改善关节功能。而对于 KAM 异常严重的 KOA 患者,手术治疗如膝关节置换术或截骨术等,可以重新调整下肢力线,恢复膝关节的正常应力分布,进而降低 KAM,提高患者的生活质量。KAM 作为生物力学评价指标,具有量化程度高、客观性强等优点。在治疗过程中通过定期测量 KAM,可以客观评估治疗效果,为治疗方案的调整提供依据。在 KOA 患者的康复训练中, KAM

测量结果可以指导患者进行有针对性的训练,如加强股四头肌等下肢肌肉的力量训练以提高膝关节的稳定性,降低 KAM,预防 KOA 的复发。综上所述,KAM 在 KOA 的诊疗中具有重要的应用价值,它不仅可以帮助医生进行诊断与评估,还可以指导治疗与康复方案的制定与实施,为 KOA 患者的康复提供有力支持。

5 总结

KOA 是一种常见的退行性疾病,同时也是一种高度致残的疾病,疼痛、僵硬和活动能力下降是该疾病常见的临床表现。生物力学因素在 KOA 发生发展中的作用被广泛关注,尤其是 KAM 对 KOA 的影响一直是讨论热点。研究表明,KAM 的增加可直接导致膝关节内侧间室负荷的增加,一些学者认为 KAM 可作为诊断 KOA 以及评估 KOA 疾病发展程度的重要指标。同时,KAM 也被当作评价各种治疗 KOA 的标准之一。因此,了解影响 KAM 变化的因素,对于理解 KOA 发生发展以及探索治疗手段至关重要。影响 KAM 的因素主要包括膝关节及身体其他部位的变化、疾病的影响以及生活习惯。目前,对 KAM 影响因素的研究多为横断面研究,缺乏高质量的前瞻性或回顾性研究。因此,未来的研究在这些方面进行补充,以更加明确影响 KAM 变化的因素,同时解释 KAM 对 KOA 疾病进程的作用。

利益冲突声明: 无。

作者贡献声明: 杨洪源负责文献收集、初稿撰写;张延明、罗丁元、王安然负责论文设计、撰写和修改。

参考文献:

- [1] OBARA K, CARDOSO JR, REIS BM, *et al.* Quality of life in individuals with knee osteoarthritis versus asymptomatic individuals [J]. *Musculoskeletal Care*, 2023, 21 (4): 1364-1370.
- [2] LONG H, LIU Q, YIN H, *et al.* Prevalence trends of site-specific osteoarthritis from 1990 to 2019: Findings from the Global Burden of Disease Study 2019 [J]. *Arthritis Rheumatol*, 2022, 74(7): 1172-1183.
- [3] SHUMNALIEVA R, KOTOV G, MONOV S. Obesity-related knee osteoarthritis-current concepts [J]. *Life (Basel)*, 2023, 13(8): 1650.
- [4] D-SOUZA N, CHARLTON J, GRAYSON J, *et al.* Are biomechanics during gait associated with the structural disease onset and progression of lower limb osteoarthritis? A systematic review and meta-analysis [J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2022, 30(3): 381-394.
- [5] 徐祥钧,王超,张吉超,等. 轻度与重度骨关节炎膝关节的生物力学行为比较[J]. *医用生物力学*, 2023, 38(4): 749-755.
- [6] XU JX, WANG C, ZHANG JC, *et al.* Comparison of biomechanical behavior between mild and severe knee osteoarthritis [J]. *J Med Biomech*, 2023, 38(4): 749-755.
- [7] GAO L, PENG W, XUE H, *et al.* Spatial-temporal trends in global childhood overweight and obesity from 1975 to 2030: A weight mean center and projection analysis of 191 countries [J]. *Global Health*, 2023, 19(1): 53.
- [8] MEERT L, VERVULLENS S, HEUSDENS C, *et al.* Unravelling relationships between obesity, diabetes, and factors related to somatosensory functioning in knee osteoarthritis patients [J]. *Clin Rheumatol*, 2024, 43(8): 2637-2645.
- [9] GARCIA SA, VAKULA MN, HOLMES SC, *et al.* The influence of body mass index and sex on frontal and sagittal plane knee mechanics during walking in young adults [J]. *Gait Posture*, 2021(83): 217-222.
- [10] HUTCHISON L, GRAYSON J, HILLER C, *et al.* Relationship between knee biomechanics and pain in people with knee osteoarthritis: A systematic review and meta-analysis [J]. *Arthritis Care Res*, 2023, 75(6): 1351-1361.
- [11] CHEN L, ZHENG J, LI G, *et al.* Pathogenesis and clinical management of obesity-related knee osteoarthritis: Impact of mechanical loading [J]. *J Orthop Translat*, 2020(24): 66-75.
- [12] HEUTS E, DE JONG LD, HAZEBROEK EJ, *et al.* The influence of bariatric surgery on hip and knee joint pain: A systematic review [J]. *Surg Obes Relat Dis*, 2021, 17(9): 1637-1653.
- [13] OBREBSKA P, SKUBICH J, PISZCZATOWSKI S. Gender differences in the knee joint loadings during gait [J]. *Gait Posture*, 2020(79): 195-202.
- [14] PESHKOVA M, LYCHAGIN A, LIPINA M, *et al.* Gender-related aspects in osteoarthritis development and progression: A review [J]. *Int J Mol Sci*, 2022, 23(5): 2767.
- [15] YOON JR, LEE JK, RYU J, *et al.* Increased external rotation of the osteoarthritic knee joint according to the genu varum deformity [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2021, 29(4): 1098-1105.
- [16] BYRNES S K, HOLDER J, STIEF F, *et al.* Frontal plane knee moment in clinical gait analysis: A systematic review on the effect of kinematic gait changes [J]. *Gait Posture*, 2022(98): 39-48.
- [17] MCCLURE PK, HERZENBERG JE. The natural history of lower extremity malalignment [J]. *J Pediatr Orthop*, 2019,

- 39(6 Suppl 1): S14-S19.
- [17] VOINIER D, NEOGI T, STEFANIK JJ, *et al.* Using cumulative load to explain how body mass index and daily walking relate to worsening knee cartilage damage over two years: The MOST study [J]. *Arthritis Rheumatol*, 2020, 72(6): 957-965.
- [18] MADADI-SHAD M, JAFARNEZHADGERO A, ZAGO M, *et al.* Effects of varus knee alignment on gait biomechanics and lower limb muscle activity in boys: A cross sectional study [J]. *Gait Posture*, 2019(72): 69-75.
- [19] WU Q, XU Z, MA X, *et al.* Association of low muscle mass index and sarcopenic obesity with knee osteoarthritis: A systematic review and meta-analysis [J]. *J Int Soc Sports Nutr*, 2024, 21(1): 2352393.
- [20] FLAXMAN TE, ALKJAER T, SIMONSEN EB, *et al.* Predicting the functional roles of knee joint muscles from internal joint moments [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2017, 49(3): 527-537.
- [21] LI S, NG WH, ABUJABER S, *et al.* Effects of resistance training on gait velocity and knee adduction moment in knee osteoarthritis patients: A systematic review and meta-analysis [J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 16104.
- [22] JEONG J, CHOI DH, SHIN CS. Influence of individual quadriceps and hamstrings muscle architecture and quality on knee adduction and flexion moment in gait [J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 20683.
- [23] ZENG Z, SHAN J, ZHANG Y, *et al.* Asymmetries and relationships between muscle strength, proprioception, biomechanics, and postural stability in patients with unilateral knee osteoarthritis [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2022(10): 922832.
- [24] GUO X, ZHAO P, ZHOU X, *et al.* A recommended exercise program appropriate for patients with knee osteoarthritis: A systematic review and meta-analysis [J]. *Front Physiol*, 2022(13): 934511.
- [25] PEIXOTO LAG, OLIVEIRA MI, LARISSA ATM, *et al.* Hip abductor versus adductor strengthening for clinical outcomes in knee symptomatic osteoarthritis: A randomized controlled trial [J]. *Musculoskelet Sci Pract*, 2022(61): 102575.
- [26] STEIDLE-KLOC E, CULVENORA G, DORREBERG J, *et al.* Relationship between knee pain and infrapatellar fat pad morphology: A within- and between-person analysis from the osteoarthritis initiative [J]. *Arthritis Care Res*, 2018, 70(4): 550-557.
- [27] MATSUMURA M, USA H, OGAWA D, *et al.* Pelvis/lower extremity alignment and range of motion in knee osteoarthritis: A case-control study in elderly Japanese women [J]. *J Back Musculoskelet Rehabil*, 2020, 33(3): 515-521.
- [28] WANG J, HU Q, WU C, *et al.* Gait asymmetry variation in kinematics, kinetics, and muscle force along with the severity levels of knee osteoarthritis [J]. *Orthop Surg*, 2023, 15(5): 1384-1391.
- [29] PARK JH, LEE H, CHO JS, *et al.* Effects of knee osteoarthritis severity on inter-joint coordination and gait variability as measured by hip-knee cyclograms [J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 1789.
- [30] HISLOP AC, COLLINS NJ, TUCKER K, *et al.* Does adding hip exercises to quadriceps exercises result in superior outcomes in pain, function and quality of life for people with knee osteoarthritis? A systematic review and meta-analysis [J]. *Br J Sports Med*, 2020, 54(5): 263-271.
- [31] MONONEN ME, PAZ A, LIUKKONEN MK, *et al.* Atlas-based finite element analyses with simpler constitutive models predict personalized progression of knee osteoarthritis: Data from the osteoarthritis initiative [J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 8888.
- [32] ARDHianto P, SUBIAKTO R, LIN CY, *et al.* A deep learning method for foot progression angle detection in plantar pressure images [J]. *Sensors*, 2022, 22(7): 2786.
- [33] ZENG CY, ZHANG ZR, TANG ZM, *et al.* Benefits and mechanisms of exercise training for knee osteoarthritis [J]. *Front Physiol*, 2021(12): 794062.
- [34] YANG F, GELFOND J, MCGEARY D, *et al.* Optimal Tai Chi forms in knee osteoarthritis: An exploration from biomechanical rationale to pain reduction [J]. *Osteoarthr Cartil Open*, 2024, 6(3): 100480.
- [35] 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.* Tai Chi "the step lunge" movement foot progression angle research on the influence of knee joint load and strategy of coordinated muscle contraction [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(5): 718-724.
- [36] LIU W, KOVALESKI JE, KEPPLER TM, *et al.* Does Tai Chi gait reduce external knee adduction moment? [J]. *J Altern Complement Med*, 2016, 22(10): 818-823.
- [37] ZAFAR AQ, ZAMANI R, AKRAMI M. The effectiveness of foot orthoses in the treatment of medial knee osteoarthritis: A systematic review [J]. *Gait Posture*, 2020(76): 238-251.
- [38] YU L, WANG Y, YANG J, *et al.* Effects of orthopedic insoles on patients with knee osteoarthritis: A meta-analysis and systematic review [J]. *J Rehabil Med*, 2021, 53(5): jrm00191.
- [39] SHIMADA N, DEIE M, HIRATA K, *et al.* Courses of change in knee adduction moment and lateral thrust differ up to 1 year after TKA [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2016, 24(8): 2506-2511.