

基于生物力学的膝骨关节炎运动疗法 与疗效评价的研究进展

刘伟¹, 于功昌¹, 王从安¹, 师彬¹, 毛德伟²

(1. 山东第一医科大学附属颈肩腰腿痛医院, 山东 济南 250062;

2. 山东体育学院, 山东 济南 250102)

摘要 膝骨关节炎(knee osteoarthritis, KOA)是中老年人常见疾病之一,主要表现为膝关节肿胀、疼痛和功能障碍。目前 KOA 的具体发病机制尚未完全明确,但学界普遍认为 KOA 的发生是多因素综合作用的结果,其中膝关节生物力学改变对 KOA 的发生、发展具有较大的影响。随着生物力学研究的不断发展,以运动学、生物力学为基础的运动疗法逐渐成为 KOA 的重要治疗手段,但运动疗法种类繁多,缺乏系统的分类与总结。在 KOA 疗效评价方面,生物力学评价指标与方法日益受到学界的关注,但目前仍缺少基于生物力学的系统、量化的疗效评价体系。本文从 KOA 的生物力学机制、运动疗法、生物力学评价指标、生物力学评价方法 4 个方面,对基于生物力学的 KOA 运动疗法与疗效评价的研究进展进行了综述。

关键词 骨关节炎;膝;生物力学现象;运动疗法;治疗结果;综述

膝骨关节炎(knee osteoarthritis, KOA)在临床上以退行性病理改变为特征,主要临床表现为膝关节疼痛、肿胀、功能障碍等。据报道,全世界 65 岁以上老年人 KOA 患病率约为 16%,我国 40 岁以上的中老年人 KOA 患病率约为 17%^[1]。随着人口老龄化的加剧,KOA 患病人数呈逐年增长趋势。目前 KOA 的具体发病机制尚未完全明确,但学界普遍认为 KOA 的发生是多因素综合作用的结果,其中膝关节生物力学改变对 KOA 的发生、发展具有较大的影响。随着生物力学研究的不断发展,以运动学、生物力学为基础的运动疗法,因具有安全、有效的优点,逐渐成为 KOA 的重要治疗手段。同时,在 KOA 疗效评价方面,生物力学评价指标与方法日益受到学界的关注,其可作为评估 KOA 病程的重要指标。相比传统 KOA 疗效评价量表,生物力学评价指标的量化程度与客观程度更高,但目前仍缺少基于生物力学的系统、量化的疗效评价体系。本文就基于生物力学的 KOA 运动疗法与疗效评价的研究进展进行了综述,以期能为 KOA 的治疗与疗效评价提供一定的参考。

1 KOA 的生物力学机制

KOA 的具体发病机制目前尚未完全明确,但生

物力学改变对 KOA 的发生有重要影响这一观点得到学界的普遍认同。KOA 的产生是生物学和力学因素共同作用的结果^[2],其中生物学因素主要包括年龄、性别、遗传等,力学因素主要包括软骨损伤、下肢肌力降低以及长期负重等。KOA 的发病机制可能与关节应力平衡失调、蛋白酶升高、性激素水平下降、细胞因子及生长因子改变等有关。从生物力学的角度看,下肢力线异常和膝关节应力分布失衡是造成下肢力学失衡的重要因素^[3]。

1.1 下肢力线异常 在正常生理情况下,当人体处于正常站立位时,股骨头的中心、膝关节的中心及踝关节的中心应处于同一条直线,此直线为下肢的力学轴线,且此时经膝关节平面的水平轴应与地面平行^[4]。若下肢力线出现异常,正常的胫股角会发生变化,下肢的力线轴不能通过膝关节的中心,对膝关节软骨产生异常应力作用,关节的应力传导出现异常,软骨基质的拱形结构将遭到破坏,软骨细胞失去保护而受损,软骨胶原纤维断裂,最终改变关节的正常力学状态,这是 KOA 发生的重要力学机制^[5]。导致力线异常的因素较多,常见的因素主要有体重过重、长时间负重、不良姿势等。恢复和保护正常下肢力线可以使膝关节内外侧间室压力负荷分布均匀,因此临床上将其作为预防和治疗 KOA 的关键。

1.2 膝关节应力分布失衡 从生物力学特点看,膝部的肌肉、筋膜维持动力性稳定,膝部的骨、关节、韧带等维持静力性稳定,膝关节的正常运转就是通过动静力稳定来达到的,一旦出现力学失衡就会导致膝关

基金项目:山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2021SFGC0502);山东省中医药科技项目(2021M149);山东省中央引导地方科技发展资金项目(YDZX20203700002055);山东第一医科大学“学术提升计划”项目(2019QL003)

通讯作者:毛德伟 E-mail:601155269@qq.com

节不稳,从而引起膝关节应力分布失衡。膝关节正常功能的发挥依赖于关节周围软骨的结构和功能^[6]。正常的关节软骨受力来自人体体重和肌肉收缩,而正常的力学环境有利于维护关节的稳定性。但当关节受力超过正常限度,超负荷压力作用于关节软骨,就会引起软骨损伤、结构改变甚至断裂,此时膝关节生物力学发生紊乱,关节应力失衡,关节软骨功能异常且稳定性下降,关节骨赘形成以及关节面发生磨损,从而导致 KOA 的发生。下肢肌力改变也能影响膝关节应力分布,肌力减弱会加重关节负荷,加速关节软骨磨损,从而加重 KOA 病情^[7]。

KOA 的发病机制复杂,受到多种因素的影响,其中软骨损伤、下肢肌力降低以及负重过大都是引起 KOA 的重要生物力学因素,这些因素会导致下肢力线异常和膝关节应力分布失衡,造成下肢力学平衡被打破,加速 KOA 进程。KOA 生物力学发病机制的研究,可为 KOA 的临床诊治提供循证依据,同时也为 KOA 预防提供参考。但 KOA 的发生是多因素共同作用的结果,未来研究中应充分重视力学、生理因素、心理因素和生活环境等诸多因素的共同作用;还应该从群体角度出发,深入研究不同地区、种族、年龄、生活习惯的人群 KOA 发病的共性,从而为 KOA 预防和治疗提供可靠依据。

2 KOA 的运动疗法

运动疗法能够延缓软骨组织的退变、提高肌肉力量、恢复肌肉骨骼的正常功能^[8],还具有缓解疼痛、改善关节活动度、保护软组织等作用^[9]。2014 年国际骨关节炎研究协会(osteoarthritis research society international, OARSI)在《膝骨关节炎非手术治疗指南》中,将运动疗法推荐为干预 KOA 的疗法之一。目前国内防治 KOA 常用的运动疗法主要包括肌力训练、关节松动术和有氧运动等。

2.1 肌力训练 膝关节周围肌肉具有吸收关节作用压力及维持关节稳定等的作用。人正常行走足跟着地时对膝关节软骨的冲击力较大,膝关节肌肉收缩能有效对抗冲击力,从而减轻膝关节软骨压力,进而降低对软骨的损害。KOA 患者膝关节周围肌力不足,而肌力训练可以增强膝关节周围肌力。股四头肌具有伸膝、屈髋、保持人体直立、维持膝关节稳定的功能。有研究表明,股四头肌肌力训练可以有效缓解膝关节疼痛、改善膝关节功能障碍、增强关节稳定性^[10]。KOA 患者因为股四头肌力量薄弱而不能维持

膝关节的稳定性,常表现为步态支撑相延长,而股四头肌训练可增加膝关节步态的稳定性。股四头肌力量训练可以有效改善膝关节功能并增加患者的步行距离。

加强肌力训练有助于增强膝关节周围肌力、缓解膝关节疼痛以及改善膝关节功能,在 KOA 的治疗与康复中发挥重要作用,但是单一的肌力训练对缓解 KOA 急性期患者的疼痛效果不佳,同时对膝关节活动度改善也有限。因此,拟定具有针对性和整体性的综合运动疗法是目前 KOA 防治中亟待解决的问题。

2.2 关节松动术 关节松动术是现代康复治疗技术中的基本技术之一。该技术可以改善关节软骨和软骨盘无血管区的营养,抑制脊髓和脑干致痛物质的释放而提高痛阈^[11],从而达到缓解关节疼痛和延缓关节退变的作用。关节松动术可以增大关节间隙,改善 KOA 患者的关节活动范围。程岱松^[12]认为,采用关节松动术结合中医推拿治疗 KOA,能够松解膝关节周围粘连的软组织,有效减轻膝关节疼痛,提高膝关节功能。目前该手法在 KOA 治疗中的作用已经得到临床医生的认可。王树东等^[13]认为,采用针刺结合关节松动术治疗 KOA,能够缓解膝关节疼痛和僵硬、增加关节活动度;并认为针刺结合关节松动术是中西医结合治疗 KOA 的有效康复方案之一。林奕等^[14]采用动态关节松动术配合快速康复(治疗组)与单纯快速康复(对照组)治疗行后稳定型全膝关节置换术后的患者,结果显示治疗组在缓解关节疼痛、改善关节功能、增加关节活动度以及维持关节稳定方面优于对照组,说明动态关节松动术联合快速康复治疗有助于膝关节功能恢复。

虽然在缓解关节疼痛、增加关节活动度方面,关节松动术疗效明显,但 KOA 的发病机制复杂且临床症状较多,单纯运用关节松动术仅能解决部分问题,而且对膝关节周围肌力的改善也不明显,临床上应联合其他运动疗法治疗 KOA。

2.3 有氧运动 有氧运动是指以有氧代谢提供运动所需能量的运动方式。有研究表明,适当有氧运动能减轻膝关节疼痛和改善膝关节功能,在预防和治疗 KOA 方面发挥着重要作用^[15]。较低强度的有氧运动主要包括八段锦、太极拳、瑜伽等。美国风湿病学会联合关节炎基金会推荐太极拳和瑜伽作为干预 KOA 的运动疗法^[16]。Vaegter 等^[17]采用冷加压刺激和有氧运动治疗 KOA,可以降低 KOA 患者的疼痛敏感性。

王立冬等^[18]研究认为,太极拳练习能改善 KOA 患者肌肉功能、缓解关节僵硬、减轻关节疼痛及改善行走能力。Cheung 等^[19]比较了强化运动和瑜伽对治疗 KOA 的作用后发现,二者治疗 KOA 均有较好的疗效,但瑜伽在改善 KOA 的关节功能和症状方面效果更佳。杨西京^[20]的研究结果显示,有氧健身运动可以减轻 KOA 患者关节疼痛、增加关节活动度以及改善关节功能;并认为有氧运动可能是通过调节骨保护素/核因子- κ B 受体活化因子配体/核因子- κ B 受体活化因子系统来影响骨组织代谢,进而实现对骨骼的调节作用,减缓 KOA 的进程。

选择适度并符合患者病情的有氧运动方式对预防和治疗 KOA 也十分重要,可作为 KOA 的辅助治疗方式;但目前有氧运动种类繁多,缺乏具体规范的指导意见。医生在指导 KOA 患者进行有氧运动时需严格把握适应证,以免加重 KOA 患者的负重、关节软骨的磨损以及疼痛等。

3 KOA 的生物力学评价指标

临床上常用的 KOA 疗效评价指标有影像学指标、临床症状、生理生化指标等。随着生物力学研究的不断发展,KOA 生物力学评价指标逐渐被重视。生理状态下膝关节内侧间室软骨负重压力高于外侧间室,KOA 的发生以内侧间室最常见。KOA 通常是从内侧间室软组织和软骨退化开始,逐渐发展为外侧间室和髌股间室病变。测量膝关节内侧压力有助于掌握 KOA 病情,膝关节内收力矩 (external knee adduction moment, KAM)、膝关节屈曲力矩 (external knee flexion moment, KFM)、膝关节内收冲量 (knee adduction moment impulse, KAMI) 等参数能在一定程度上反映膝关节内侧负荷和 KOA 严重程度,可作为有效评价 KOA 病情的生物力学指标。

KAM 是衡量内侧间室负荷大小的良好指标之一。Birmingham 等^[21]的研究结果显示,KAM 峰值与 KOA 严重程度、膝关节疼痛以及疾病进展呈正相关,特别是患者的 KAM 第一峰值明显高于正常水平,且与膝关节骨和软骨改变有密切关系。因此,KAM 峰值常被作为评价 KOA 严重程度和疗效的生物力学指标。同时,KFM 也与 KOA 的病情进展密切相关。Manal 等^[22]在研究中发现,内侧负荷峰值与 KFM 峰值和 KAM 峰值均存在良好的相关性,相较于单独使用 KAM 峰值,KFM 峰值和 KAM 峰值联合使用在准确反映膝关节内负荷峰值方面效果更好。KAMI 是

KAM 在支撑相的时间积分值,代表支撑相在膝关节内侧间室累积的负荷集中情况^[23]。2013 年在 OARSI 年会上,学者们普遍认为 KAMI 可成为衡量 KOA 病情变化的另一黄金指标。KAMI 在一定程度上较 KAM 能更好预测 KOA 的病情变化。

进一步明确生物力学因素对 KOA 影响的内在机制^[24]以及探索膝关节受力与 KOA 发生、发展的关系,都有助于 KOA 生物力学疗法的运用和推广。但目前 KOA 生物力学指标获取相对复杂,不易在临床上广泛推广,寻找简便易行的生物力学评价方法和设备应受到足够重视。此外,研究者不仅需要关注 KOA 短期生物力学评价指标的变化,还应对患者的各项生物力学指标进行长期观察与监测。

4 KOA 的生物力学评价方法

目前评价 KOA 疗效多采用量表法,评价内容主要包括疼痛、生活质量及关节功能等,临床上应用较广的有视觉模拟量表、西安大略和麦克马斯特大学骨关节炎指数、KOA 严重性指数、Lysholm 膝关节评分标准、美国膝关节协会评分标准、国际膝关节文献委员会膝关节评估表、SF-36 健康调查简表等。单一量表无法对 KOA 患者的关节功能、肌力情况、生物力学等进行定量分析,而生物力学评价方法可有效对参数进行量化。对 KOA 疗效进行评价时若采用量表法结合生物力学评价方法,可得出较为综合客观的评价结论。KOA 生物力学评价方法主要包括步态分析、等速肌力测试及有限元分析等。

4.1 步态分析 KOA 患者膝关节内异常的力学环境会导致关节形态和功能发生相应改变,表现为膝关节疼痛、屈伸功能障碍等,而患者在步行周期中为缓解疼痛会用踝关节代偿,从而产生步态异常。目前,步态分析在 KOA 的疗效评价中得到了广泛应用。步态分析的生物力学参数包括运动学参数、动力学参数、肌电活动参数和能量参数,这些参数可评估 KOA 患者肌肉功能、平衡能力、行走能力等。现代步态分析多采用三维步态分析法,使用运动捕捉系统和三维测力台同步收集数据,可准确测量人体运动时关节运动学、动力学等参数,通过量化法对下肢运动和受力情况进行动态分析,测出步行时人体对地面的反作用力、关节力矩等数据。三维步态分析法可作为把握 KOA 患者病情发展情况及指导治疗方案的手段之一。杨晓露等^[25]用三维步态分析法观察中老年 KOA 患者步态中三维运动特征,发现患者膝关节呈现异常

的锁扣机制,在矢状面上的活动较为僵硬、在冠状面上的稳定性较差。钟慧敏等^[26]研究认为,采用 Vicon 运动捕捉系统对单侧膝关节置换术患者进行双侧膝关节生物力学评价,可以准确地判断手术疗效,预测膝关节手术的最佳时机。

通过计算步态分析所获取的动力学、运动学以及能量参数等,可得出 KOA 患者的 KAM、KFM、KAMI 等数据,这些数据可反映膝关节内侧压力和 KOA 严重程度。步态分析结合量表法可有效对 KOA 病情进行完整分析,将成为有效评估 KOA 病情及疗效的科学手段。但步态分析在测量时容易受患者依从性、心态和外部环境等因素的影响,而且所得结果是通过计算获得,多次测量的数值存在不统一的情况,如何提高测量的信度和效度也是今后研究的重点。

4.2 等速肌力测试 当 KOA 患者出现肌力下降、关节失稳等临床表现时,肌力训练可有效提高肌肉力量、延缓关节病变、改善关节失稳状态^[27]。在肌力评估中,常用的方法是徒手肌力测试,但是该方法是根据医生的临床经验和主观感受而进行评判的,缺乏量化分析且客观性较差。而等速肌力装置则能有效、可靠地对肌力变化进行动态观察。等速肌力测试可作为研究膝关节肌群肌力特征及变化规律的重要评估方法。郭凯锋等^[28]为观察体外冲击波联合等速肌力训练对 KOA 患者肌力的影响,采用等速肌力装置检测治疗前后患者膝关节屈、伸肌群峰力矩,结果显示体外冲击波联合等速肌力训练能进一步改善患者膝关节肌力及本体感觉功能,加速膝关节功能恢复。梁杰等^[29]采用等速肌力测试仪对 25 例 KOA 患者和 25 例健康者的膝关节稳度、肌肉功能进行比较分析,结果发现两者配合使用可以作为定量评估膝关节功能的重要手段;并认为采用等速肌力评定系统所获的人体股四头肌、腘绳肌峰值转矩和伸、屈膝峰值转矩角度等数据较为稳定、可靠。

通过等速肌力装置所获得的肌力数据可作为 KOA 临床康复评定和研究的客观指标,但等速肌力测试所获得的是膝关节周围肌群的肌力数据,而无法获得单一肌肉的准确数据。可见肌力测试仍存在一定的局限性。

4.3 有限元分析 有限元分析可利用有限数量模拟无限单元结构,将各形质构造数学化进行计算的过程,是矩阵结构在力学领域中的延伸。该分析法在 KOA 生物力学的研究中已得到广泛应用,有助于评

估 KOA 患者的康复情况。Halonen 等^[30]将肌肉骨骼模型与有限元分析相结合,提出了一种新的研究 KOA 患者步态调整的方法。鲁洋^[31]运用三维有限元技术构建出下肢全长标准立体模型以及不同程度的股骨内翻下肢全长立体模型,研究股骨内翻对膝关节生物力学的影响。刘冬青等^[32]建立 KOA 患者上下楼梯过程中膝关节的三维有限元模型,研究浅刺对上下楼梯运动中膝关节股骨、软骨、半月板等的应力分布改变,发现浅刺对治疗 KOA 有显著效果。

有限元分析是 KOA 患者康复疗效评价的重要方法,但是通过有限元分析获得的数据缺乏统一的标准,而且目前也缺乏 KOA 患者三维立体模型与正常人模型的对比研究。基于大量的实验研究并建立正常人膝关节立体模型与 KOA 患者立体模型的数据库有助于弥补当下研究的不足。

5 小 结

建立生物力学评价体系,获得精确量化的评估数据,在此基础上制定科学的运动方案,有利于拓展 KOA 的非手术治疗领域,把握 KOA 患者的病情、治疗过程和预后情况。相信随着生物力学研究的不断深入,未来在生物力学理论指导下的运动疗法在 KOA 的预防和治疗中将会有巨大的发展空间。

参考文献

- [1] ROBBINS S M, RAYMOND N, ABRAM F, et al. The effect of alignment on knee osteoarthritis initiation and progression differs based on anterior cruciate ligament status; data from the Osteoarthritis Initiative [J]. Clin Rheumatol, 2019, 38(12):3557-3566.
- [2] 寇龙威,郭珈宜,郭艳幸,等. 中医药防治膝骨关节炎生物力学机制的进展[J]. 中医药临床杂志, 2020, 32(11): 2186-2190.
- [3] 陈娴,王承祥,王金,等. 从下肢生物力学的角度治疗膝骨性关节炎的研究进展[J]. 当代医药论丛, 2016, 14(7):124-125.
- [4] 孙茂淋,何锐,张颖,等. 健康人群下肢力线测量在全膝关节置换术中的应用[J]. 中华骨与关节外科杂志, 2019, 12(8):584-588.
- [5] 艾健,王春林,董有康,等. 推拿对膝骨关节炎关节稳定性作用的生物力学机制探析[J]. 中华中医药杂志, 2021, 36(12):7436-7438.
- [6] 邵盛,龚利,孙武权,等. 基于经筋理论的膝骨性关节炎下肢生物力学研究进展[J]. 中华中医药杂志, 2021, 36(11):6589-6591.

- [7] 李虎,白田雨,孙健,等. 浮针从患肌论治膝关节炎思路探析[J]. 中国中医骨伤科杂志,2020,28(1):78-81.
- [8] 宋校能,胡玲慧,黄德胜,等. 运动防治膝关节炎的关键因素及注意事项[J]. 中国组织工程研究,2020,24(2):289-295.
- [9] HANSEN S,VAEGTER H B,PETERSEN K K. Pretreatment exercise-induced hypoalgesia is associated with change in pain and function after standardized exercise therapy in painful knee osteoarthritis[J]. Clin J Pain,2020,36(1):16-24.
- [10] KUS G,YELDAN I. Strengthening the quadriceps femoris muscle versus other knee training programs for the treatment of knee osteoarthritis[J]. Rheumatol int,2019,39(2):203-218.
- [11] OMURA C M,LÜDTKE D D,HOREWICZ V V,et al. Decrease of IL-1 β and TNF in the spinal cord mediates analgesia produced by ankle joint mobilization in complete Freund adjuvant-induced inflammation mice model[J]. Front Physiol,2022,12:816624.
- [12] 程岱松. 关节松动术结合中医推拿应用于膝关节骨关节炎患者治疗中的临床效果[J]. 临床医学研究与实践,2017,2(19):113-114.
- [13] 王树东,郭海清,王华伟. 针刺结合关节松动术治疗膝关节骨性关节炎的临床研究[J]. 中华中医药学刊,2021,39(8):179-182.
- [14] 林奕,冯杰荣,罗兴文. 后稳定型全膝关节置换后动态关节松动治疗有利于早期功能恢复[J]. 中国组织工程研究,2021,25(12):1842-1846.
- [15] BROSSEAU L,TAKI J,DESJARDINS B,et al. The Ottawa panel clinical practice guidelines for the management of knee osteoarthritis. Part two: strengthening exercise programs[J]. Clin Rehabil,2017,31(5):596-611.
- [16] KOLASINSKI S L,NEOGI T,HOCHBERG M C,et al. 2019 American College of Rheumatology Arthritis Foundation Guideline for the management of osteoarthritis of the hand,hip, and knee[J]. Arthritis Care Res,2020,72(2):149-162.
- [17] VAEGTER H B,HANDBERG G,EMMELUTH C,et al. Preoperative hypoalgesia after cold pressor test and aerobic exercise is associated with pain relief 6 months after total knee replacement[J]. Clin J Pain,2017,33(6):475-484.
- [18] 王立冬,谢迅,郭野,等. 太极拳练习对膝关节炎患者治疗效果的 Meta 分析[J]. 体育研究与教育,2022,37(1):89-96.
- [19] CHEUNG C,WYMAN J F, BRONAS U,et al. Managing knee osteoarthritis with yoga or aerobic strengthening exercise programs in older adults:a pilot randomized controlled trial[J]. Rheumatol Int,2017,37(3):389-398.
- [20] 杨西京. 不同强度有氧健身运动对膝关节炎的改善作用机制[J]. 世界最新医学信息文摘(电子版),2019,19(74):76.
- [21] BIRMINGHAM T B,MARRIOTT K A,LEITCH K M,et al. Association between knee load and pain within-patient, between-knees, case-control study in patients with knee osteoarthritis[J]. Arthritis Care Res,2019,71(5):647-650.
- [22] MANAL K,GARDINIER E,BUCHANAN T S,et al. A more informed evaluation of medial compartment loading:the combined use of the knee adduction and flexor moments[J]. Osteoarthritis Cartilage,2015,23(7):1107-1111.
- [23] CHANG A H,MOISIO K C,CHMIEL J S,et al. External knee adduction and flexion moments during gait and medial tibiofemoral disease progression in knee osteoarthritis[J]. Osteoarthritis Cartilage,2015,23(7):1099-1106.
- [24] 汤雨婷,安丙辰,郑洁皎. 膝关节炎生物力学参数的研究进展[J]. 中国康复理论与实践,2020,26(12):1417-1421.
- [25] 杨晓露,张津沁,胡小卫,等. 膝关节炎患者步态中膝关节三维运动特征[J]. 中国康复,2022,37(2):90-94.
- [26] 钟慧敏,李斌,陈博,等. Vicon 运动捕捉系统对单侧膝关节置换术后双侧膝关节生物力学的评价[J]. 国际骨科学杂志,2020,41(1):51-56.
- [27] LUN V,MARSH A,BRAY R,et al. Efficacy of hip strengthening exercises compared with leg strengthening exercises on knee pain,function, and quality of life in patients with knee osteoarthritis[J]. Clin J Sport Med,2015,25(6):509-517.
- [28] 郭凯锋,韩佩洁,黄臻. 体外冲击波联合等速肌力训练对膝关节炎患者肌力、本体感觉及关节功能的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志,2021,43(11):1010-1012.
- [29] 梁杰,卢惠苹,陈述荣,等. 表面肌电联合等速肌力测试仪在膝骨性关节炎患者功能评估中的应用[J]. 按摩与康复医学,2020,11(2):30-32.
- [30] HALONEN K S,DZIALO C M,MANNISI M,et al. Workflow assessing the effect of gait alterations on stresses in the medial tibial cartilage-combined musculoskeletal modelling and finite element analysis[J]. Sci Rep,2017,7(1):17396.
- [31] 鲁洋. 内侧间室型膝关节炎股骨形态学变化及其对截骨矫形手术决策与疗效影响的三维有限元分析[D]. 石家庄:河北医科大学,2020.
- [32] 刘冬青,赵改平,吴坤能,等. 浅刺治疗膝骨性关节炎患者登梯运动中生物力学效应的有限元分析[J]. 生物医学工程学进展,2021,42(3):125-129.

(收稿日期:2022-08-31 本文编辑:时红磊)