

·综述·

步态及影像学在膝骨性关节炎严重程度评估中的应用进展*

阮家诚^{1,2} 蒯声政^{1,2} 王大平^{2,3}

膝关节炎(knee osteoarthritis, KOA)是一种好发于中老年人群的常见慢性关节疾病,主要特征表现为膝关节软骨变形和丢失、关节缘和软骨下骨质增生。KOA发病率高,致残率高,对患者的生活自理能力和劳动能力损害大且无法治愈。因此,KOA又被称为不死的癌症。根据WHO的报道,KOA在女性患病率占第4位,男性占第8位。在我国,有症状的KOA整体患病率为8.1%^[1],发病率逐年上升,并且呈现出年轻化的趋势。KOA发病初期会引起膝关节轻度间断性隐痛,休息后好转,活动后加重,寒冷、潮湿等天气变化时加重;发展到中期会严重影响患者的步行能力和日常生活;发展到晚期出现持续性疼痛或夜间疼痛,甚至会导致严重畸形和功能障碍,进而增加心血管疾病的发生率及全因死亡率^[2-3]。在美国,近年来必须接受膝关节置换术的患者呈指数级增长^[4],不仅耗费了大量有限的医疗资源,也增加了社会和家庭的负担。因此,通过对KOA严重程度的全面综合评估,及时了解患者的KOA发展情况,有助于临床医生制定更加合理的阶梯治疗与康复方案,从而延缓疾病的发展。

本文将对经典影像学分析和现代步态分析在不同严重程度KOA评估中的应用及进展进行综述。

1 影像学评估

1.1 影像学方法评估

在不同严重程度KOA的影像学评估方法中,X线是目前最常见和首选的方法,是临床诊断KOA的“金标准”^[5]。X线能清楚显示膝关节骨性病变,常用于了解病变进展情况和疗效评估。KOA在X线下表现为:①关节间隙狭窄;②软骨下骨硬化;③骨质增生形成骨赘;④软骨下囊肿;⑤关节内游离骨;⑥关节对线不良及半脱位。根据不同严重程度KOA在X线下的表现不同,Kellgren和Lawrence在1957年提出Kellgren-Lawrence分级,得到了世界普遍认可,目前被广泛应用于KOA的分级评估。该分级标准包括4级:1级是无关节间隙狭窄,可能伴有边缘唇样骨质增生;2级是可能关节间隙狭窄,有明确的骨质增生;3级是有明确的骨质增生,

中度的关节间隙狭窄,有骨硬化或者骨端畸形;4级是严重的骨质增生,关节间隙明显变窄,并伴有软骨下骨硬化和确定的骨端畸形^[6]。然而,X线存在盲区,无法观察不同部位的软骨、骨赘等情况,而计算机断层扫描(computed tomography, CT)及磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)通过断层扫描的方式可以消除盲区,且对软骨、骨赘、软骨下囊肿及软骨下骨硬化程度有着更好的区分度,能深入了解KOA的病情程度,已成为重要的辅助检查手段。但是CT和MRI存在着自身的局限性,CT辐射量大,MRI耗费时间长、费用高。B超费用低廉、无放射性,利用高频探头能清晰显示KOA患者的关节软骨的厚度、表面的光滑程度、滑膜病变、骨赘以及积液情况,B超是评估KOA进展情况的一种较好的辅助诊断手段^[7]。

1.2 影像学特征评估

1.2.1 基于X线的关节间隙狭窄程度评估: 膝关节间隙主要是指股胫关节软骨的厚度。因此,股胫关节间隙大小能直观反映KOA患者软骨退变的程度。当患者发生KOA时,关节软骨变薄,X线片上表现为关节间隙变窄。在负重位平片上从股骨髁顶点分别向股骨髁切线和胫骨平台切线做垂线,两者的差值定义为关节间隙平均狭窄宽度^[8]。有研究报道,关节间隙平均狭窄宽度与KOA患者的症状和功能有很好的相关性,比KL评分和膝关节活动范围更为敏感^[8]。多国多中心的临床实验表明,该方法可重复性高,测量精准^[9]。国际膝关节评分委员会(IKDC分级)按照关节间隙狭窄程度将KOA依其严重程度分为4级:1级为没有关节间隙变窄;2级为关节间隙>4mm,小块的骨质增生,轻微的骨质硬化;3级为2mm≤关节间隙≤4mm;4级为关节间隙<2mm。IKDC分级与其他KOA分级方法相比,其分级结果与关节镜探查结果的一致性较高^[10]。此外,基于关节间隙狭窄程度评级的中重度患者与临床表现一致性也较高。有研究表明,内侧KOA在男性关节间隙≤3mm,女性关节间隙≤2mm会引起明显疼痛^[11]。但对轻中度患者,有学者认为采用常规X线下的单纯关节间隙狭窄程度来诊断早期KOA是一种不可靠的方

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2020.10.026

*基金项目:深圳市孔雀团队项目(KQTD20170331100838136);广东省医学科学技术研究基金项目(A2019070);新疆维吾尔自治区科技支撑项目计划(2016E02065)

1 深圳大学医学部,深圳,518060; 2 深圳市第二人民医院; 3 通讯作者

第一作者简介:阮家诚,男,主治医师; 收稿日期:2019-02-26

法^[12],因为最初的关节间隙狭窄通常是半月板挤压而不是关节软骨变薄^[13]。

1.2.2 基于X线的下肢力线评估:在KOA病因研究中,下肢力线不良是KOA发生发展的一个重要因素。在临床上,下肢力线检查已经成为膝关节置换术的常规检查,同时也是术前评估、手术方案制定、术后疗效评估的重要依据^[14]。下肢力线是指下肢全长片上股骨头中心到距骨顶中点的连线。若力学轴线偏移至膝关节中心内侧为膝内翻,偏移至膝关节中心外侧则为膝外翻。根据文献报道,KOA的发展与膝内翻畸形密切相关,膝内翻程度的增加不仅是KOA的表现,也是KOA病情加重的重要因素^[15-16]。通过胫骨高位截骨手术纠正KOA重度患者膝内翻的不良力线,能改变患者步行过程中的膝关节应力分布,进而能显著改善患者的临床症状^[17]。除膝内翻外,也有少量的患者出现膝外翻,但是与膝内翻患者相比,膝外翻患者的对线不良相对不明显,内收力矩较小,股四头肌肌力较好,对患者功能的影响相对较小^[18]。膝内翻和膝外翻畸形与KOA的发生发展密切相关,但是,膝内翻与膝外翻程度和不同严重程度KOA之间的关联性研究尚未发现文献报道。

1.2.3 基于CT的上胫腓关节面坡度评估:X线在二维平面上评估KOA患者的下肢力线,能大体明确膝关节内外翻程度,但对膝关节局部骨赘形成,关节畸形显示略显不足。因此,可通过三维CT显示关节畸形、测量各种径线和角度来评估KOA的严重程度并为治疗提供参考。其中,上胫腓关节面的坡度定义为上胫腓关节面的切线和水平面的夹角,主要通过三维CT进行测量。早在10年前,Özcan等^[19]发现重度KOA患者上胫腓关节面存在退变和骨赘形成。我国也有学者提出上胫腓关节面的坡度与KOA严重程度相关,坡度越大越容易发生KOA^[20]。目前上胫腓关节面坡度与KOA严重程度的相关研究较少,缺少多中心、大样本、随机对照试验的高质量研究。随着螺旋CT的普及,技术的改进,CT能清楚显示KOA的骨赘、游离体,相对于X线和MRI评估KOA严重程度有着无法取代优势,未来可能在严重KOA术前和术后评估、术中精确截骨方面发挥一定的作用。

1.2.4 基于MRI的软骨退变程度评估:关节软骨退变是KOA早期最主要的病理变化,无法通过X线显影。在评估KOA严重程度时,轻度KOA的实际病情可能比X线表现的更为严重。单纯依据X线作为评估手段,可能延误合适的治疗时机。MRI在评估KOA患者软骨退变中有着更高的敏感性,对不同严重程度的KOA有着更好的区分度。基于MRI的KOA的软骨退变程度分级通常包括5级(Recht分级):1级为关节软骨完整,厚度减少,表面光滑;2级为软骨分层消失,出现局部低信号,软骨表面仍光滑;3级为软骨表面轻度或中度不规则,关节软骨有缺损,但小于正常厚度的一半;4

级为软骨表面有重度缺损,软骨缺损超过正常厚度的一半;5级为软骨完全剥脱,严重缺损,软骨下骨裸露,可有软骨下骨质信号改变^[21]。Recht分级符合KOA患者软骨的形态改变,适用于KOA患者软骨退变情况的纵向观察和软骨修复的疗效评估。然而,基于MRI的分级与KOA的症状之间缺乏显著的相关性^[22],可能是由于轻度KOA就能在MRI表现细微的病理变化,如关节软骨缺损、软骨下骨髓水肿、骨赘等,而多数轻度的KOA患者不表现出明显的临床症状。但是,若不能及时发现早期的KOA患者,延误最佳治疗时间窗,会增大患者病情发展的风险。因此,MRI的评估可作为X线敏感性不足的补充,是早期诊断KOA和监测病情变化的一种较好方法。

1.2.5 基于超声的半月板突出程度评估:半月板突出是KOA的另一主要的病理变化。半月板突出是指半月板部分或者全部向关节外移位。由于内侧半月板与内侧关节囊相连,并且胫股关节内侧承载更大的载荷,因而KOA患者的半月板多数表现为向内侧突出。正常的几何形态和解剖位置是半月板发挥功能的前提条件,发生移位时胫骨和股骨的接触面积增大,关节面承受的载荷也会增大,从而容易加速KOA的进展。半月板功能异常多数与半月板后角撕裂有关^[23]。有研究表明,半月板突出会造成关节软骨缺损和关节间隙狭窄,从而加重KOA的进展^[24-25]。同时,KOA的结构改变,也会引起半月板支持结构松弛,从而加重半月板突出。因此,半月板突出与KOA的进展互为因果。

在临床上,半月板突出通常采用超声探查进行定量和半定量的评估,可靠性与MRI相当^[26]。依据Madan-Sharma标准,在高频超声图像上,突出半月板最外缘到胫股关节内侧缘连线的垂直距离与半月板厚度的比值定义为半月板突出值。半月板突出值小于1/3为轻度,大于1/3为重度,介于两者之间为中度^[27]。半月板突出的程度与KOA的严重程度密切相关,半月板突出值越大,KOA的病情越严重^[28]。因此,KOA严重程度评估也有以半月板突出为参照标准的分级方法如Madan-Sharma方法。利用高频超声评估KOA患者的严重程度,具有实时动态、量化精准、简易方便、价格低廉和无创无辐射等众多优点,具有广泛的应用前景。

2 步态特征评估

步态分析技术是利用红外线摄影机、测力平台和表面肌电仪等设备采集受试者的数据,经计算机软件处理后得到下肢的运动学、动力学以及肌群肌电信号变化的方法,具有无创、动态、客观等特点。KOA患者在病情发展的不同阶段,往往表现出不同的步态特征。量化不同严重程度KOA患者在步态过程中的时空参数、膝关节的活动范围、地面反作用力、关节载荷和肌群肌电信号等参数,能更好地了解KOA患

者在行走过程中的下肢功能状态,为KOA治疗方案的选择和疗效的评定提供客观的理论依据。

2.1 运动学特征评估

2.1.1 时空参数评估:常用的时空参数包括步行周期中的步速、步长、跨步长和步宽等。Al-Zahrani等^[29-30]对比分析不同严重程度KOA患者和健康人群的步态时空参数发现,严重KOA患者的步行速度明显降低,步幅更短,步态周期更长。KOA患者通过减少步速、步长、跨步长来减轻膝关节所承受的载荷和疼痛,出现“减痛步态”,同时增加步宽来增加行走过程中的稳定性^[31]。单足和双足支撑相在步态周期中所占的百分比也可以用来评估KOA的严重程度。研究表明,有症状性KOA患者单足支撑时间明显减少^[32-33],双足支撑时间明显增加^[34],反映了稳定性的下降。Rutherford等^[35]研究不同严重程度KOA对患者足前角的影响,发现无症状个体与中度KOA患者的足前角有15°的差异,该差异会造成神经肌肉的功能代偿。通过改善足前角不仅能改善肌肉功能代偿,也可减轻膝关节内侧间室的载荷,从而延缓KOA的进展^[36]。

2.1.2 三维空间的关节活动范围评估:KOA患者的行走活动不仅有时空参数上的变化,也表现为三维空间中的下肢关节活动范围的变化。研究表明,随着KOA严重程度的增加,膝关节矢状面上的活动范围逐渐缩小^[37-38]。Bytyqi等^[39]将矢状面上的评估扩展到冠状面和横断面上,记录内侧KOA患者的膝关节屈曲/伸直、外展/内收和内/外旋转角度,结果发现内侧KOA患者在矢状面和横断面上通过锁定机制减少膝关节的活动范围。Nagano等^[40]进一步探究不同严重程度的KOA对患者下肢在矢状面、冠状面和横断面上的关节活动的影响,发现轻度KOA患者胫骨轴向旋转角度减少,中度KOA患者膝关节屈曲角度下降,重度KOA患者膝关节内收角度增加。

2.2 动力学特征评估

2.2.1 地面反作用力评估:地面反作用力(ground reaction force)可反映KOA患者行走过程中的关节承重情况。正常GRF呈双峰型分布,足跟着地承重时出现第一峰值,支撑中期支撑足前进时出现第一谷值,足尖蹬地出现另一峰值。因而在力-时间曲线上呈“M”型。GRF的峰谷特性是下肢肌群协调运动的结果,KOA患者在病理状态下,后蹬肌肉无力,会不自觉使身体前倾进行代偿。随着病情的进展,造成部分肌群强于正常,部分肌群弱于正常,正常的运动分配规律被打破,进而表现出GRF的异常^[41]。因此,通过GRF的评估能够间接反应不同严重程度KOA患者的肌群运动协调的情况。KOA患者由于疼痛,足跟不敢着地,后蹬无力,支撑相中期不能很好缓冲,出现典型的单峰曲线或三峰曲线^[42]。GRF的大小与步行速度相关,步速越小,GRF越小^[43]。KOA

患者因为有不同的疼痛或者活动受限,导致步行速度减慢,GRF的峰值减小。Wiik等^[44]进一步证实异常的GRF导致KOA患者的速度下降,并且发现限制KOA患者步行速度的决定因素是下肢抬离时间减少和关节负荷过大。尽管GRF与KOA严重程度存在一定的相关性,但采用GRF评估KOA患者严重程度的准确性差于膝关节内收力矩^[45]。

2.2.2 关节载荷评估:膝关节周期性过载是关节软骨磨损、KOA发生发展的重要危险因素。人们在行走过程的膝关节载荷约为体重2—3倍,特别在爬楼梯等屈膝角度较大的活动中,膝关节承受的载荷可达体重的6倍^[46]。膝关节接触力(knee contact force, KCF)是反映膝关节的载荷的常用指标,可通过三维测力平台测量地面反作用力并通过构建下肢肌骨模型计算出KCF的大小。不同严重程度KOA患者的KCF也表现出一定的差异性。Richards等^[47]的研究表明:KCF的大小与KOA的严重程度具有较强的正相关。但是,Meireles等^[48]的研究表明:KOA早期患者的KCF与健康人群没有显著差异性;KOA中晚期患者的KCF相比健康人群有显著性的增加,该增加主要是由于膝关节退变导致应力分布异常而引起的。除KOA本身退变引起KCF的变化外,也有研究发现,KOA患者行走30min以后,KCF峰值会明显增加,因而增加了KOA的进展风险^[49]。

膝关节内收力矩(knee adduction moment, KAM)为GRF乘以膝关节中心与GRF向量的距离,受动力学和运动学参数的影响,是反映膝关节内侧载荷的一个有效评价指标。有文献报道KAM与KOA的严重程度密切相关^[50-51]。内侧KOA患者的内侧间室载荷较大且力臂较长,因而具有较大的加重风险。通过足外展步态、矫形鞋垫、外翻支具等临床干预可以缩短GRF力臂,从而减小KAM值^[52],降低膝关节内侧间室的载荷,可以有效的延缓KOA的进展^[53]。

2.2.3 肌群肌电评估:健康人群行走过程中下肢肌群肌电信号发生周期性、协调性变化。KOA患者受到疼痛等因素的影响,导致下肢肌群肌电活动的异常。通过量化KOA患者的下肢肌群肌电活动,可用来量化评估KOA的严重程度,且比传统影像学判断具有更高的敏感性^[54]。研究表明:有症状和无症状的KOA患者具有相同的影像学表现^[55],但在行走过程中,有症状KOA患者的股二头肌和股四头肌表现出更强的肌电活动^[54]。在上台阶过程中,有症状KOA患者的股外侧肌的肌电活动大于股内侧肌的肌电活动,并且随着严重程度的增加差异性也逐步增大;腓绳肌的肌电活动也随着严重程度增加而明显增强^[56]。KOA患者在具有挑战性的日常活动中,通过增强肌群之间的协同作用来维持膝关节的稳定^[57],同时也会表现出肌群之间更强的拮抗作用^[58],该变化是KOA患者的结构改变、肌肉力量减弱和本体感觉下降的一种代偿性反应^[57]。

2.3 下肢协调性评估

下肢运动协调主要包括髋关节、膝关节、踝关节和骨盆之间的运动协调。KOA早期患者步态的不平衡可通过肌群协同激活来代偿,若长期没有采取干预措施,则易导致膝关节屈伸肌群肌力失衡,进而加重KOA的进展^[59]。膝关节屈伸肌群肌力失衡可引起KOA患者着地模式的改变,如股四头肌无力膝关节稳定性差,需通过用手按压膝关节上方来使膝关节伸直^[60];胫前肌无力、三头肌紧张足趾先着地,需过度屈髋屈膝来代偿,表现出“跨阈步态”^[61]。

Messier等^[62]发现单侧KOA与双侧KOA患者在步态过程中的运动学和动力学参数均没有显著性差异,可能是由于KOA患者的生物力学改变是系统性的,而不应单一考虑患侧膝关节的生理特征。Mills等^[63]在单双侧KOA的基础上进一步引入了KOA严重程度进行综合分析,研究表明,单侧KOA患者在疾病发展过程中会保持较长时间的双下肢运动平衡,而双侧轻中度的KOA患者在行走过程中的下肢运动不对称更普遍。除结构性KOA对下肢对称性产生影响外,患者的疼痛症状也对下肢运动对称性产生较大的影响,然而目前没有一个单一的检查或参数能够很好区分疼痛侧和非疼痛侧^[64]。Creaby等^[65]发现,单侧或双侧均有结构性KOA的情况下,单侧表现出疼痛症状的患者更容易出现下肢运动的不对称,并据此建议KOA的治疗过程中需要综合考虑患者的疼痛症状与KOA结构上的病变。

3 小结

KOA影像学分级评估目前主要为基于X线的分级,具有直观、经济、简单等特点,但评估较为主观,不同观察者之间差异较大,且不同的分级方式具有不同的局限性。CT扫描速度快、能清楚显示局部三维信息,具有自己独特的优势。MRI和超声均能发现KOA早期病变,量化精准,但是MRI慢且贵,而超声方便且低廉,但需要观察者有丰富的经验和技能,数据处理相对繁杂,目前多用于KOA的鉴别诊断和临床研究。步态分析技术能量化KOA患者在日常活动中的下肢关节运动学与动力学特征,可对KOA患者的运动功能进行较为客观的评价,且部分评估指标相比影像学评估具有更好的敏感度。目前,针对不同严重程度KOA患者的步态研究仅发现少量的文献报道,研究较为零散不系统,应用还不成熟。

影像学 and 步态分别从结构和功能两个方面对KOA进行评估。若能结合静态影像学 and 动态步态分析技术,从结构(如关节间隙和力线)和功能(如关节活动和载荷)两方面对不同严重程度KOA患者进行综合评估,则可以详细全面地解释KOA的症状和体征,为临床医生选择治疗方案提供重要的依据。如早期采取控制体重,训练股四头肌;中期口服

或局部用药;晚期综合考虑影像结构改变和步态功能异常,选择胫骨高位截骨,单髁置换,全膝置换等手术方式,达到骨与软组织的平衡。因此,影像和步态的综合评估在KOA的预防和治疗中,具有巨大的研究潜力和社会价值。

参考文献

- [1] Tang X, Wang S, Zhan S, et al. The prevalence of symptomatic knee osteoarthritis in China: results from the China health and retirement longitudinal study[J]. *Arthritis Rheumatol*, 2016,68(3):648—653.
- [2] Hawker GA, Croxford R, Bierman AS, et al. All-cause mortality and serious cardiovascular events in people with hip and knee osteoarthritis: a population based cohort study[J]. *PLoS One*, 2014,9(3):e91286.
- [3] Xing D, Xu Y, Liu Q, et al. Osteoarthritis and all-cause mortality in worldwide populations: grading the evidence from a meta-analysis[J]. *Sci Rep*, 2016,6:24393.
- [4] Kohn MD, Sassoon AA, Fernando ND. Classifications in brief: Kellgren-lawrence classification of osteoarthritis[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2016,474(8):1886—1893.
- [5] 中华医学会骨科学分会关节外科学组. 骨关节炎诊疗指南(2018年版)[J]. *中华骨科杂志*, 2018,(12):705—715.
- [6] Kellgren JH, Lawrence JS. Radiological assessment of osteoarthritis[J]. *Ann Rheum Dis*, 1957,16(4):494—502.
- [7] 张栋,王庆甫,石鑫超,等. 膝关节关节炎肌骨超声与X线片表现的比较与分析[J]. *中国骨伤*, 2016,(5):429—433.
- [8] An BC, Fang K, Wang Y, et al. New variables for measuring joint space width to evaluate knee osteoarthritis[J]. *Chin Med J (Engl)*, 2011,124(23):3886—3890.
- [9] Buckland-Wright JC, Bird CF, Ritter-Hrnčirik CA, et al. X-ray technologists' reproducibility from automated measurements of the medial tibiofemoral joint space width in knee osteoarthritis for a multicenter, multinational clinical trial[J]. *J Rheumatol*, 2003,30(2):329—338.
- [10] Hefti F, Müller W, Jakob RP, et al. Evaluation of knee ligament injuries with the IKDC form[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 1993,1(3—4):226—234.
- [11] Muraki S, Akune T, En-Yo Y, et al. Joint space narrowing, body mass index, and knee pain: the ROAD study (OAC1839R1)[J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2015,23(6):874—881.
- [12] Adams JG, McAlindon T, Dimasi M, et al. Contribution of meniscal extrusion and cartilage loss to joint space narrowing in osteoarthritis[J]. *Clin Radiol*, 1999,54(8):502—506.
- [13] Okada K, Yamaguchi S, Sato Y, et al. Comparison of meniscal extrusion and osteophyte formation at the intercondylar notch as a predictive biomarker for incidence of

- knee osteoarthritis-Data from the Osteoarthritis Initiative[J]. J Orthop Sci, 2019,24(1):121—127.
- [14] Marx RG, Grimm P, Lillemo KA, et al. Reliability of lower extremity alignment measurement using radiographs and PACS[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2011,19(10):1693—1698.
- [15] Sharma L, Song J, Felson DT, et al. The role of knee alignment in disease progression and functional decline in knee osteoarthritis[J]. JAMA, 2001,286(2):188—195.
- [16] Brouwer GM, van Tol AW, Bergink AP, et al. Association between valgus and varus alignment and the development and progression of radiographic osteoarthritis of the knee [J]. Arthritis Rheum, 2007,56(4):1204—1211.
- [17] Birmingham TB, Moyer R, Leitch K, et al. Changes in biomechanical risk factors for knee osteoarthritis and their association with 5-year clinically important improvement after limb realignment surgery[J]. Osteoarthritis Cartilage, 2017,25(12):1999—2006.
- [18] Sosdian L, Hinman RS, Wrigley TV, et al. Quantifying varus and valgus thrust in individuals with severe knee osteoarthritis[J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2016,39:44—51.
- [19] Özcan O, Boya H, Oztekin HH. Clinical evaluation of the proximal tibiofibular joint in knees with severe tibiofemoral primary osteoarthritis[J]. Knee, 2009,16(4):248—250.
- [20] 郭利刚, 郭庆功, 王胜利, 等. 上胫腓关节面坡度与原发性膝关节炎相关性研究[J]. 中华解剖与临床杂志, 2018, (5):384—387.
- [21] 曾小龙, 张余. 膝关节骨关节炎影像学诊断与步态评估进展[J]. 中华关节外科杂志(电子版), 2016,10(6):670—674.
- [22] Phan CM, Link TM, Blumenkrantz G, et al. MR imaging findings in the follow-up of patients with different stages of knee osteoarthritis and the correlation with clinical symptoms[J]. Eur Radiol, 2006,16(3):608—618.
- [23] Furumatsu T, Kamatsuki Y, Fujii M, et al. Medial meniscus extrusion correlates with disease duration of the sudden symptomatic medial meniscus posterior root tear[J]. Orthop Traumatol Surg Res, 2017,103(8):1179—1182.
- [24] Papalia R, Papalia G, Russo F, et al. Meniscal extrusion as booster of osteoarthritis[J]. J Biol Regul Homeost Agents, 2017,31(4 Suppl 2):33—44.
- [25] Gale DR, Chaisson CE, Totterman SM, et al. Meniscal subluxation; association with osteoarthritis and joint space narrowing[J]. Osteoarthritis Cartilage, 1999,7(6):526—532.
- [26] Nogueira-Barbosa MH, Gregio-Junior E, Lorenzato MM, et al. Ultrasound assessment of medial meniscal extrusion: a validation study using MRI as reference standard[J]. Am J Roentgenol, 2015,204(3):584—588.
- [27] Madan-Sharma R, Kloppenburg M, Kornaat PR, et al. Do MRI features at baseline predict radiographic joint space narrowing in the medial compartment of the osteoarthritic knee 2 years later?[J]. Skeletal Radiol, 2008,37(9): 805—811.
- [28] 杨琳琳, 陈世荣, 向醒, 等. 高频超声评价膝关节骨性关节炎与内侧半月板突出的关系[J]. 临床超声医学杂志, 2016,(5): 297—300.
- [29] Al-Zahrani KS, Bakheit AM. A study of the gait characteristics of patients with chronic osteoarthritis of the knee[J]. Disabil Rehabil, 2002,24(5):275—280.
- [30] Kiss RM. Effect of severity of knee osteoarthritis on the variability of gait parameters[J]. J Electromyogr Kinesiol, 2011,21(5):695—703.
- [31] 陈菁华, 王芎斌, 林颖, 等. 膝骨性关节炎患者平地行走的下肢生物力学分析[J]. 按摩与康复医学, 2015,(10):16—18.
- [32] Elbaz A, Mor A, Segal O, et al. Can single limb support objectively assess the functional severity of knee osteoarthritis?[J]. Knee, 2012,19(1):32—35.
- [33] Debi R, Mor A, Segal G, et al. Correlation between single limb support phase and self-evaluation questionnaires in knee osteoarthritis populations[J]. Disabil Rehabil, 2011,33(13—14):1103—1109.
- [34] Chen CP, Chen MJ, Pei YC, et al. Sagittal plane loading response during gait in different age groups and in people with knee osteoarthritis[J]. Am J Phys Med Rehabil, 2003, 82(4):307—312.
- [35] Rutherford DJ, Hubley-Kozey CL, Stanish WD. The neuromuscular demands of altering foot progression angle during gait in asymptomatic individuals and those with knee osteoarthritis[J]. Osteoarthritis Cartilage, 2010,18(5):654—661.
- [36] Guo M, Axe MJ, Manal K. The influence of foot progression angle on the knee adduction moment during walking and stair climbing in pain free individuals with knee osteoarthritis[J]. Gait Posture, 2007,26(3):436—441.
- [37] Ersoz M, Ergun S. Relationship between knee range of motion and Kellgren-Lawrence radiographic scores in knee osteoarthritis[J]. Am J Phys Med Rehabil, 2003,82(2): 110—115.
- [38] Zeng X, Ma L, Lin Z, et al. Relationship between Kellgren-Lawrence score and 3D kinematic gait analysis of patients with medial knee osteoarthritis using a new gait system[J]. Sci Rep, 2017,7(1):4080.
- [39] Bytyqi D, Shabani B, Lustig S, et al. Gait knee kinematic alterations in medial osteoarthritis: three dimensional assessment[J]. Int Orthop, 2014,38(6):1191—1198.
- [40] Nagano Y, Naito K, Saho Y, et al. Association between in vivo knee kinematics during gait and the severity of knee osteoarthritis[J]. Knee, 2012,19(5):628—632.

- [41] Turcot K, Armand S, Fritschy D, et al. Sit-to-stand alterations in advanced knee osteoarthritis[J]. *Gait Posture*, 2012, 36(1):68—72.
- [42] 李峰, 王常海, 张蓉, 等. 膝骨性关节炎功能评价步态指标研究——足底压力各阶段时间分布及地面垂直反力[J]. *中国康复理论与实践*, 2007,(12):1165—1167+1224.
- [43] Zeni JA Jr, Higginson JS. Differences in gait parameters between healthy subjects and persons with moderate and severe knee osteoarthritis: a result of altered walking speed? [J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2009,24(4):372—378.
- [44] Wiik AV, Aqil A, Brevadt M, et al. Abnormal ground reaction forces lead to a general decline in gait speed in knee osteoarthritis patients[J]. *World J Orthop*, 2017,8(4): 322—328.
- [45] Hunt MA, Birmingham TB, Giffin JR, et al. Associations among knee adduction moment, frontal plane ground reaction force, and lever arm during walking in patients with knee osteoarthritis[J]. *J Biomech*, 2006,39(12):2213—2220.
- [46] Alshawabka AZ, Liu A, Tyson SF, et al. The use of a lateral wedge insole to reduce knee loading when ascending and descending stairs in medial knee osteoarthritis patients [J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2014,29(6):650—656.
- [47] Richards C, Higginson JS. Knee contact force in subjects with symmetrical OA grades: differences between OA severities[J]. *J Biomech*, 2010,43(13):2595—2600.
- [48] Meireles S, De Groote F, Reeves ND, et al. Knee contact forces are not altered in early knee osteoarthritis[J]. *Gait Posture*, 2016,45:115—120.
- [49] Gustafson JA, Anderton W, Sowa GA, et al. Dynamic knee joint stiffness and contralateral knee joint loading during prolonged walking in patients with unilateral knee osteoarthritis[J]. *Gait Posture*, 2019,68:44—49.
- [50] Sharma L, Hurwitz DE, Thonar EJ, et al. Knee adduction moment, serum hyaluronan level, and disease severity in medial tibiofemoral osteoarthritis[J]. *Arthritis Rheum*, 1998, 41(7):1233—1240.
- [51] Baliunas AJ, Hurwitz DE, Ryals AB, et al. Increased knee joint loads during walking are present in subjects with knee osteoarthritis[J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2002,10(7): 573—579.
- [52] Solomonow-Avnon D, Herman A, Wolf A. Mechanism of reducing knee adduction moment by shortening of the knee lever arm via medio-lateral manipulation of foot center of pressure: A pilot study[J]. *J Biomech*, 2019,83:143—149.
- [53] Chang AH, Moisio KC, Chmiel JS, 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.
- [54] Astephen Wilson JL, Stanish WD, Hubley-Kozey CL. Asymptomatic and symptomatic individuals with the same radiographic evidence of knee osteoarthritis walk with different knee moments and muscle activity[J]. *J Orthop Res*, 2017,35(8):1661—1670.
- [55] Lawrence JS, Bremner JM, Bier F. Osteoarthrosis. Prevalence in the population and relationship between symptoms and x-ray changes[J]. *Ann Rheum Dis*, 1966,25(1):1—24.
- [56] 韩新祚, 刘克敏. 骨关节炎患者膝关节周围肌肉协调性的临床电生理研究[C]. 第18届中国康复肢残康复学术年会论文选集, 2009.
- [57] 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 (Hoboken)*, 2019,71(5):651—660.
- [58] Zeni JA, Rudolph K, Higginson JS. Alterations in quadriceps and hamstrings coordination in persons with medial compartment knee osteoarthritis[J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2010,20(1):148—154.
- [59] Hubley-Kozey CL, Hill NA, Rutherford DJ, et al. Co-activation differences in lower limb muscles between asymptomatic controls and those with varying degrees of knee osteoarthritis during walking[J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2009,24(5):407—414.
- [60] Øiestad BE, Juhl CB, Eitzen I, et al. Knee extensor muscle weakness is a risk factor for development of knee osteoarthritis. A systematic review and meta-analysis[J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2015,23(2):171—177.
- [61] Don R, Serrao M, Vinci P, et al. Foot drop and plantar flexion failure determine different gait strategies in Charcot-Marie-Tooth patients[J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2007, 22(8):905—916.
- [62] Messier SP, Beavers DP, Herman C, et al. Are unilateral and bilateral knee osteoarthritis patients unique subsets of knee osteoarthritis? A biomechanical perspective[J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2016,24(5):807—813.
- [63] Mills K, Hettinga BA, Pohl MB, et al. Between-limb kinematic asymmetry during gait in unilateral and bilateral mild to moderate knee osteoarthritis[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2013,94(11):2241—2247.
- [64] Javaid MK, Kiran A, Guermazi A, et al. Individual magnetic resonance imaging and radiographic features of knee osteoarthritis in subjects with unilateral knee pain: the health, aging, and body composition study[J]. *Arthritis Rheum*, 2012,64(10):3246—3255.
- [65] Creaby MW, Bennell KL, Hunt MA. Gait differs between unilateral and bilateral knee osteoarthritis[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2012,93(5):822—827.