

· 综述 ·

从生物力学角度探讨髌股关节炎的病因

宋娜 蒋金金 马琪 胡文清

河北医科大学第三医院康复医学科, 石家庄 050051

通信作者: 胡文清, Email: 13313012905@163.com

【摘要】 髌股关节炎是膝骨关节炎的一种类型, 是造成膝前疼痛的重要原因之一。了解髌股关节炎的病因及发病机制对于预防、治疗髌股关节炎, 防止其进展为膝骨关节炎具有重要意义。本文查阅了中外相关文献, 旨在阐述髌股关节解剖结构与运动生理学特点, 从髌骨位置、股骨滑车、Q 角、髂胥束、内侧髌股韧带等静力结构异常和肌肉力量与协调性、膝周肌肉协同收缩率等动力结构异常方面进行综述, 以期对髌股关节炎的康复治疗提供理论依据。

【关键词】 髌股关节炎; 生物力学; 病因

基金项目: 河北省教育厅重点项目 (ZH2011229)

Funding: Hebei Education Department Key Project (ZH2011229)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2020.05.024

骨关节炎是全球公认的致残原因^[1], 国外流行病学显示在 56~84 岁的人群中, 有 25.4% 的人患有膝骨关节炎^[2]。国内患病率约为 18%, 其中女性发病率高于男性, 分别为 19% 和 11%^[3]。在膝骨关节炎中, 髌股关节通常是最常累及, 也是最早出现症状的关节^[4], 是造成膝前疼痛的重要因素之一。60 岁以上的人群中, 有 32% 的男性患有髌股关节炎, 女性患病率为 36%^[5]。目前, 髌股关节炎的发病机制仍未完全研究清楚, 本文现将从生物力学角度对髌股关节炎病因的研究综述如下。

髌股关节解剖结构及运动生理学

髌股关节位于膝关节前方, 由髌骨、股骨滑车以及周围的关节囊、肌肉、韧带等组织构成。关节软骨厚度分布不均, 中央处最厚处约 7 mm^[6], 在正常髌骨位置和步态下, 髌股关节大部分的接触区域也位于此处^[7]。髌骨是人体最大的籽骨, 包裹于股四头肌肌腱内, 可以减少股四头肌和股骨髁之间的摩擦^[8], 通过延长股四头肌力臂增加伸膝力量。股骨滑车与髌骨后面相适应, 滑车外侧面的最高点位于股骨外侧髁的前面, 并向股骨远端后方逐渐下降。在屈膝早期, 这种结构对髌骨的稳定作用要大于股内侧肌^[9]。

髌股关节的稳定性是由髌骨内外侧支持带等软组织结构及髌骨、股骨滑车等骨结构和股四头肌的动态平衡来维持的^[10]。髌骨内侧支持带包括内侧髌股韧带、内侧髌胫韧带以及内侧髌半月板韧带, 髌骨外侧支持带包括外侧横韧带、外侧髌胫韧带以及上髌髁韧带, 其中, 内侧髌股韧带在屈膝早期防止髌骨半脱位中提供 53%~80% 的限制作用^[11]。

屈膝早期, 髌骨会从股骨髁上窝起始处向下滑行并伴随髌骨向内侧移动和倾斜^[12]。屈曲超过 30° 后, 髌骨开始进入股骨滑车, 并逐渐向滑车沟的后方下沉, 此时髌骨运动方向改变, 转向外侧移动和倾斜; 同时向外旋转, 即髌骨下极转向腓骨头一侧, 平均外旋角为 12°^[13]。当屈膝达 90° 时, 髌骨滑移至股骨端, 随后改变滑行方向, 与股骨干垂直, 滑行进入平台期; 与此同时, 髌骨外移到达峰值 5 mm, 随后外移与外倾程度均缓慢减

小^[14-15]。屈膝 120° 时, 髌骨外旋达到峰值 (9.5°), 随后开始内旋^[15]。在髌股关节运动中, 髌骨也存在沿冠状轴旋转的现象, 但与膝关节屈曲并非同步发生, 即当屈膝 45° 时, 髌骨旋转滞后 20°; 屈膝 90° 时, 髌骨旋转滞后 30°; 屈膝至 120° 时, 髌骨旋转滞后 45°^[13]。

站立时, 髌骨固定于外移和前移的位置。步行过程中, 髌骨的位置会随肌肉的收缩和膝关节的屈曲而变化, 足跟着地前, 髌骨在股四头肌的拉力下快速上移, 并在支撑相中期上移至峰值, 随后开始下移并伴随髌骨向外侧移动、倾斜和旋转, 摆动相早期, 髌骨屈曲和下移均达到峰值, 然后开始减小^[16]。维持髌股关节稳定的任一因素异常均可导致髌骨运动轨迹改变, 造成髌骨不稳, 增加关节压力。正常的关节会通过增加高应力区域的软骨厚度对负荷做出适应性反应^[17], 但局部负荷的大小和频率一旦超过个体软骨和软骨下骨对负荷的承受阈值, 过度集中的应力就会导致软骨基质内蛋白多糖的丢失和胶原纤维变性, 最终引起软骨退变^[18]。随着软骨吸收应力以及缓冲作用的减弱, 软骨下骨承受应力也随之增大, 此刻, 周围骨质即逐渐开始出现病理性改变, 加速髌股关节炎的进程^[19]。

静力结构异常

一、髌骨位置异常

髌骨高度通常用 Install-Salvati 指数来测定, 即髌腱长度与髌骨最长对角线的长度之比, 正常范围为 0.8~1.2, 高于 1.2 为高位髌骨, 低于 0.8 为低位髌骨^[20]。高位髌骨是导致髌骨不稳的危险因素之一^[21], 与正常髌骨相比, 高位髌骨在伸膝位时的髌骨外移与髌骨外倾更加明显, 并且在整个屈膝过程中, 高位髌骨的接触面积均少于正常髌骨^[22]。Lu 等^[23]的研究认为, 异常的髌骨高度与髌骨软骨病变具有显著相关性, 可作为潜在的诊断指标。当髌骨从正常位置变为低位时, 髌股关节接触区域上移^[7], 关节面应力负荷不均, 高应力一侧造成软骨基质的破坏, 而另一侧应力不足, 软骨不能有效获得营养, 加速髌骨软骨的磨损。与之前的研究一致, Luyckx^[24]等对不同高度的髌骨

进行比较后发现,高位髌骨产生的髌股关节最大接触力最高,正常髌骨次之,低位髌骨最低;虽然最大髌股接触面积也随髌骨高度的增加而增大,但在膝关节屈曲过程中正常髌骨的平均接触应力最低。

二、股骨滑车发育不良

股骨滑车沟角是髌骨的一个主要约束结构^[25]。屈膝 30° 时,髌骨开始与股骨滑车接触,此时股骨滑车外侧关节面是限制髌骨外移最重要的因素^[26]。正常的股骨滑车沟角为 (138±6)°,当其超过 145° 时为发育异常^[27],发育异常的股骨滑车外侧关节面较正常平坦,膝关节屈曲时丧失对髌骨的约束作用,髌骨过度外移,髌股关节外侧应力分布改变。多个研究指出,滑车发育不良是髌骨不稳定的重要的危险因素,可使髌股关节接触面积减少,接触压力增加,诱发髌骨软骨早期退变^[28-30]。

三、Q 角异常

Q 角是髌前上棘至髌骨中点连线与髌骨中点至胫骨结节连线之间的夹角,反映股四头肌的合力方向。Cavazzuti 等^[31]的研究指出,Q 角的变化会造成股外侧肌与股内侧肌失衡,髌骨外移从而导致下肢力线异常。一项膝关节体外模拟研究同样发现,Q 角增大可显著增加髌骨外移,并使髌骨向内侧倾斜和旋转的程度增加;Q 角减小可使髌骨内倾减少,增加胫骨外旋,但对髌骨横向移位并无显著影响^[32]。Huberti 等^[33]的研究结果表明,Q 角增大 10°,在膝关节屈曲 20° 时髌股关节应力会增加 45%;当 Q 角减少 10° 时,髌股关节应力也会增加 53%。

四、髂胫束紧张

髂胫束上方起自髂嵴外唇,前部纤维为阔筋膜张肌的腱膜,后部纤维为臀大肌肌腱的延续部分,下方与髌骨外侧支持带相连,止于胫骨外侧结节,再经胫骨外侧结节向下后方抵于腓骨头。因此,髂胫束紧张会使髌骨产生外侧移动、倾斜,造成膝关节屈曲时髌骨与股骨滑车接触面积向外侧平移^[34],导致髌股关节外侧压力增高。由于特殊的解剖结构,髂胫束紧张还会增加屈膝时的胫骨外旋,进而增加了髌腱作用于髌骨的横向力^[35]。同时,胫骨外旋在屈膝初始阶段会增加髌骨倾斜及外侧移位的程度,这种影响随着屈曲角度的增大逐渐减少,而对减少髌骨内旋的影响会随屈膝角度的增加而变大^[36],从而导致膝关节外侧疼痛。

五、内侧髌股韧带缺失

内侧髌股韧带是膝关节屈曲早期防止髌骨外脱位的主要内侧软组织结构^[37]。在内侧髌股韧带存在的情况下,股骨前倾增加 20° 时会增加髌骨外移的程度;如果内侧髌股韧带缺失,股骨前倾增加 10° 即可造成髌骨外移^[38]。Zaffagnini 等^[39]对 6 个新鲜冷冻标本的运动学和解剖学数据进行了采集,结果发现,内侧髌股韧带切除后,髌骨移位和倾斜的运动曲线与内侧髌股韧带存在相似,但屈膝初期髌骨内侧移位现象消失,并在整体屈膝过程中,均表现为轻微外移,使得髌股关节外侧间隙压力高于正常。Philippot 等^[12]的研究也指出,伸膝位时,内侧髌股韧带缺失导致髌骨外移程度由 0 mm 增加至 4.81 mm,外旋角由 0° 增加至 1.48°,外倾角大于正常;随膝关节屈曲至 25°,髌骨外移与内倾角逐渐与正常值接近,但外旋角始终高于正常值。

动力结构异常

一、股四头肌失衡

内侧和外侧稳定性的平衡是维持髌股关节生物力学的重要因素。已有研究证明,髌股关节炎患者在上下楼梯过程中股外侧肌的激活时间早于股内侧肌^[40]。Lorenz 等^[41]采用专门设计的膝关节模拟器模拟负重膝关节的屈曲过程发现,股内侧肌力量不足会加大髌骨倾斜和髌骨内旋的程度,从而导致压力分布的改变,但对髌骨移位无显著影响。而 Sakai 等^[42]的研究则发现,在膝关节屈曲 0° 和 15° 时,股内侧肌薄弱会导致髌骨外侧移位,随屈曲角度的增大,影响逐渐减小。

二、肌肉无力

下肢肌肉无力在髌股关节炎的发生发展中起重要作用。有力的股四头肌可以防止髌股关节外侧间隙软骨的丢失,可有效改善疼痛和膝关节功能^[43]。在 Hoglund 等^[44]的研究发现,髌股关节炎患者的髌外展肌、髌后伸肌、髌外旋肌以及股四头肌的等长肌力较健康组低,分别下降了 41%、28%、13% 和 32%。髌外展肌力量的下降造成髌内收增加,从而导致膝关节外翻,该研究指出,胫骨外展角与髌外展肌肌力成反比,肌力下降造成胫股力线不齐,是导致髌股关节炎发生与发展的潜在因素。另一横断面研究同样发现,外侧间隙狭窄的髌股关节炎患者存在股四头肌无力的情况,这种现象首先改变了股四头肌收缩的平衡,导致髌骨产生过度的横向负荷;随之可促使膝关节进入关节稳定性下降和本体感觉改变的恶性循环^[45]。以上研究均为横断面设计,无法确定肌肉无力是髌股关节炎产生的病因,亦或是疼痛症状造成的肌肉无力。

三、协同收缩率增加

协同收缩是指主动肌与拮抗肌在特定时间段内同时活动,反映主动肌与拮抗肌之间的肌肉协调性^[46]。Sanchez-Ramirez 等^[47]将髌股关节炎和膝关节炎患者与正常人的肌肉活动模式进行对比后发现,下台阶过程中,髌股关节炎患者股外侧肌与半腱肌的协同收缩率大于正常人,且膝关节炎患者的协同收缩率相较于前两者来说更大。腓绳肌协同收缩增加会使胫骨外旋,增加髌骨向外侧移动、倾斜和旋转的程度,从而增大髌股关节外侧间隙的压力^[48-49]。目前的研究尚不能确定肌肉协同收缩率的增加是髌股关节炎发病病因,但可以证明其是加剧髌股关节炎的诱因。

四、其他

下肢力线的对齐除膝关节外,与髋关节和踝关节也密不可分。髌内收内旋的增加也被认为是髌骨不稳的原因之一^[50]。有研究将髌股关节炎患者与同年年龄段的正常人进行比较后发现,髌股关节炎患者足背屈范围减少,从无负重体位变化至负重体位时,足中段高度和宽度的变化幅度以及足部整体移动幅度都高于正常人^[51]。但是足中段灵活性与髌股关节负荷之间的关系还有待研究。

小结和展望

综上所述,静力结构因素(髌骨、股骨滑车、Q 角、髂胫束、内侧髌股韧带等)与动力结构因素(股四头肌的力量和协调性、相邻关节的肌肉力量和活动度、膝周肌肉的协同收缩率等),任一因素的异常均可造成髌股关节应力改变,加剧关节软骨的磨损,导致髌股关节炎发生发展。近期的研究表明,膝周肌肉协同收缩率的增加会增加膝关节表面负荷,使膝关节压力全方位升高^[52],但下肢不同肌肉间协同收缩率的增加对髌股关节影响

的研究仍不完善,因此未来可以通过膝关节体外研究来探讨膝周不同肌肉协同收缩率的增加对髌股关节的影响。牵伸和肌力训练在增强肌肉力量的基础上改善膝周肌肉协调性及生物力学结构,可为髌股关节炎治疗、延缓进展提供帮助。

参 考 文 献

- [1] Cross M, Smith E, Hoy D, et al. The global burden of hip and knee osteoarthritis: estimates from the global burden of disease 2010 study [J]. *Ann Rheum Dis*, 2014, 73 (7) : 1323-1330. DOI: 10.1136/annrheumdis-2013-204763.
- [2] Allen KD, Golightly YM. Epidemiology of osteoarthritis: state of the evidence [J]. *Curr Opin Rheumatol*, 2015, 27 (3) : 276. DOI: 10.1097/BOR.0000000000000161.
- [3] 王斌,邢丹,董圣杰,等.中国膝关节炎流行病学和疾病负担的系统评价[J].中国循证医学杂志,2018,18(2):134-142. DOI: 10.7507/1672-2531.201712031.
- [4] Hart HF, Stefanik JJ, Wyndow N, et al. The prevalence of radiographic and MRI-defined patellofemoral osteoarthritis and structural pathology: a systematic review and meta-analysis [J]. *Br J Sports Med*, 2017, 51 (16) : 1195-1208. DOI: 10.1136/bjsports-2017-097515.
- [5] Choudhury A, Lambkin R, Auvinet E, et al. P 004-Patellofemoral arthroplasty improves gait in isolated patellofemoral arthritis, a prospective cohort gait analysis study [J]. *Gait Posture*, 2018, 65: 241-242. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2018.06.150.
- [6] Grelsamer RP, Klein JR. The biomechanics of the patellofemoral joint [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 1998, 28(5): 286-298. DOI: 10.2519/jospt.1998.28.5.286.
- [7] Brandon SCE, Thelen DG, Smith CR, et al. The coupled effects of crouch gait and patella alta on tibiofemoral and patellofemoral cartilage loading in children [J]. *Gait Posture*, 2018, 60: 181-187. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2017.12.005.
- [8] Steinkamp LA, Dillingham MF, Markel MD, et al. Biomechanical considerations in patellofemoral joint rehabilitation [J]. *Am J Sports Med*, 1993, 21(3): 438-444. DOI: 10.1177/036354659302100319.
- [9] Senavongse W, Amis AA. The effects of articular, retinacular, or muscular deficiencies on patellofemoral joint stability: a biomechanical study in vitro [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 2005, 87(4): 577-582. DOI: 10.1302/0301-620X.87B4.14768.
- [10] Watson NA, Duchman KR, Grosland NM, et al. Finite element analysis of patella alta: a patellofemoral instability model [J]. *Iowa Orthop J*, 2017, 37: 101.
- [11] 张辉,洪雷,耿向苏,等.内侧髌股韧带重建治疗复发性髌骨脱位[J].中国修复重建外科杂志,2011,25(8):925-930.
- [12] Philippot R, Boyer B, Testa R, et al. Study of patellar kinematics after reconstruction of the medial patellofemoral ligament [J]. *Clin Biomech*, 2012, 27(1): 22-26. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2011.08.001.
- [13] 陈世益.人类髌股关节三维运动规律的研究[J].中国运动医学杂志,1997,16(2):107-113.
- [14] 张峻,候筱魁.髌骨的生物力学研究进展[J].医用生物力学,2004,19(2):120-125.
- [15] Nha KW, Papannagari R, Gill TJ, et al. In vivo patellar tracking: clinical motions and patellofemoral indices [J]. *J Orthop Res*, 2008, 26 (8) : 1067-1074. DOI: 10.1002/jor.20554.
- [16] Gray HA, Guan S, Thomeer LT, et al. Three-dimensional motion of the knee-joint complex during normal walking revealed by mobile biplane x-ray imaging [J]. *J Orthop Res*, 2019, 37(3): 615-630. DOI: 10.1002/jor.24226.
- [17] Andriacchi TP, Koo S, Scanlan SF. Gait mechanics influence healthy cartilage morphology and osteoarthritis of the knee [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2009, 91 (Suppl 1) : 95. DOI: 10.2106/JBJS.H.01408.
- [18] 李香云,邹琳,张长杰.力学因素对骨关节炎软骨的影响[J].中华物理医学与康复杂志,2006,28(5):357-359. DOI: 10.3760/j.issn:0254-1424.2006.05.022.
- [19] 单鹏程,曹永平.软骨下骨在骨关节炎发病机制中的作用[J].中国矫形外科杂志,2009(23):1792-1795.
- [20] Insall J, Salvati E. Patella position in the normal knee joint [J]. *Radiology*, 1971, 101(1): 101-104.
- [21] Yue RA, Arendt EA, Tompkins MA. Patellar height measurements on radiograph and magnetic resonance imaging in patellar instability and control patients [J]. *J Knee Surg*, 2017, 30 (09) : 943-950. DOI: 10.1055/s-0037-1599249.
- [22] Ward SR, Terk MR, Powers CM. Patella alta: association with patellofemoral alignment and changes in contact area during weight-bearing [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2007, 89(8): 1749-1755. DOI: 10.2106/JBJS.F.00508.
- [23] Lu W, Yang J, Chen S, et al. Abnormal patella height based on insall-salvati ratio and its correlation with patellar cartilage lesions: an extremity-dedicated low-field magnetic resonance imaging analysis of 1703 Chinese cases [J]. *Scand J Surg*, 2016, 105(3): 197-203. DOI: 10.1177/1457496915607409.
- [24] Luyckx T, Didden K, Vandenuecker H, et al. Is there a biomechanical explanation for anterior knee pain in patients with patella alta? Influence of patellar height on patellofemoral contact force, contact area and contact pressure [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 2009, 91(3): 344-350. DOI: 10.1302/0301-620X.91B3.21592.
- [25] Balcarek P, Radebold T, Schulz X, et al. Geometry of torsional malalignment syndrome: trochlear dysplasia but not torsion predicts lateral patellar instability [J]. *Orthop J Sports Med*, 2019, 7(3): 2325967119829790. DOI: 10.1177/2325967119829790.
- [26] Alaia MJ, Cohn RM, Strauss EJ. Patellar instability [J]. *Bull NYU Hosp Jt Dis*, 2014, 72(1): 6.
- [27] Dejour H, Walch G, Nove-Josserand L, et al. Factors of patellar instability: an anatomic radiographic study [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 1994, 2(1): 19-26.
- [28] Chen SR, An YY, Zhan Y, et al. Quantitative evaluation of the relationship between femoral trochlear dysplasia and the degeneration of the patellofemoral cartilage by using T2mapping [J]. *Zhonghua Yi Xue Za Zhi*, 2019, 99(21): 1651-1655. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2019.21.012.
- [29] Hiemstra LA, Kerslake S, Loewen M, et al. Effect of trochlear dysplasia on outcomes after isolated soft tissue stabilization for patellar instability [J]. *Am J Sports Med*, 2016, 44(6): 1515-1523. DOI: 10.1177/0363546516635626.
- [30] Van Haver A, De Roo K, De Beule M, et al. The effect of trochlear dysplasia on patellofemoral biomechanics: a cadaveric study with simulated trochlear deformities [J]. *Am J Sports Med*, 2015, 43(6): 1354-1361. DOI: 10.1177/0363546515572143.
- [31] Cavazzuti L, Merlo A, Orlandi F, et al. Delayed onset of electromyographic activity of vastus medialis obliquus relative to vastus lateralis in

- subjects with patellofemoral pain syndrome[J]. *Gait Posture*, 2010, 32(3):290-295. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2010.06.025.
- [32] Mizuno Y, Kumagai M, Mattessich SM, et al. Q-angle influences tibiofemoral and patellofemoral kinematics[J]. *J Orthop Res*, 2001, 19(5):834-840. DOI: 10.1016/S0736-0266(01)00008-0.
- [33] Huberti HH, Hayes WC. Patellofemoral contact pressures. The influence of q-angle and tendofemoral contact[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1984, 66(5):715-724.
- [34] Kwak SD, Ahmad CS, Gardner TR, et al. Hamstrings and iliotibial band forces affect knee kinematics and contact pattern[J]. *J Orthop Res*, 2000, 18(1):101-108. DOI: 10.1002/jor.1100180115.
- [35] Merican AM, Amis AA. Iliotibial band tension affects patellofemoral and tibiofemoral kinematics[J]. *J Biomech*, 2009, 42(10):1539-1546. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2009.03.041.
- [36] Van Kampen A, Huijskes R. The three-dimensional tracking pattern of the human patella[J]. *J Orthop Res*, 1990, 8(3):372-382.
- [37] Aframian A, Smith TO, Tennent TD, et al. Origin and insertion of the medial patellofemoral ligament; a systematic review of anatomy[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2017, 25(12):3755-3772. DOI: 10.1007/s00167-016-4272-1.
- [38] Kaiser P, Schmoelz W, Schoettle P, et al. Increased internal femoral torsion can be regarded as a risk factor for patellar instability—a biomechanical study[J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2017, 47:103-109. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2017.06.007.
- [39] Zaffagnini S, Colle F, Lopomo N, et al. The influence of medial patellofemoral ligament on patellofemoral joint kinematics and patellar stability[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2013, 21(9):2164-2171. DOI: 10.1007/s00167-012-2307-9.
- [40] Wyndow N, Crossley KM, Stafford R, et al. Neuromotor control during stair ambulation in individuals with patellofemoral osteoarthritis compared to asymptomatic controls[J]. *Gait Posture*, 2019, 71:92-97. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2019.03.029.
- [41] Lorenz A, Müller O, Kohler P, et al. The influence of asymmetric quadriceps loading on patellar tracking—an in vitro study[J]. *Knee*, 2012, 19(6):818-822. DOI: 10.1016/j.knee.2012.04.011.
- [42] Sakai N, Luo ZP, Rand JA, et al. The influence of weakness in the vastus medialis oblique muscle on the patellofemoral joint: an in vitro biomechanical study[J]. *Clin Biomech*, 2000, 15(5):335-339. DOI: 10.1016/S0268-0033(99)00089-3.
- [43] Amin S, Baker K, Niu J, et al. Quadriceps strength and the risk of cartilage loss and symptom progression in knee osteoarthritis[J]. *Arthritis Rheum*, 2009, 60(1):189-198. DOI: 10.1002/art.24182.
- [44] Hoglund LT, Hillstrom HJ, Barr-Gillespie AE, et al. Frontal plane knee and hip kinematics during sit-to-stand and proximal lower extremity strength in persons with patellofemoral osteoarthritis: a pilot study[J]. *J Appl Biomech*, 2014, 30(1):82-94. DOI: 10.1123/jab.2012-0244.
- [45] Baker KR, Xu L, Zhang Y, et al. Quadriceps weakness and its relationship to tibiofemoral and patellofemoral knee osteoarthritis in Chinese: the Beijing osteoarthritis study[J]. *Arthritis Rheum*, 2004, 50(6):1815-1821.
- [46] 魏勇, 刘宇. 肌肉共同收缩研究进展[J]. *中国体育科技*, 2009(5):54-59. DOI: 10.16470/j.csst.2009.05.020.
- [47] Sanchez-Ramirez DC, Malfait B, Baert I, et al. Biomechanical and neuromuscular adaptations during the landing phase of a stepping-down task in patients with early or established knee osteoarthritis[J]. *Knee*, 2016, 23(3):367-375. DOI: 10.1016/j.knee.2016.02.002.
- [48] Elias JJ, Kirkpatrick MS, Saranathan A, et al. Hamstrings loading contributes to lateral patellofemoral malalignment and elevated cartilage pressures: an in vitro study[J]. *Clin Biomech*, 2011, 26(8):841-846. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2011.03.016.
- [49] Kwak SD, Ahmad CS, Gardner TR, et al. Hamstrings and iliotibial band forces affect knee kinematics and contact pattern[J]. *J Orthop Res*, 2000, 18(1):101-108.
- [50] Pappas E, Wong-Tom WM. Prospective predictors of patellofemoral pain syndrome: a systematic review with meta-analysis[J]. *Sports Health*, 2012, 4(2):115-120. DOI: 10.1177/1941738111432097.
- [51] Wyndow N, Collins NJ, Vicenzino B, et al. Foot and ankle characteristics and dynamic knee valgus in individuals with patellofemoral osteoarthritis[J]. *J Foot Ankle Res*, 2018, 11(1):65. DOI: 10.1186/s13047-018-0310-1.
- [52] Childs JD, Sparto PJ, Fitzgerald GK, et al. Alterations in lower extremity movement and muscle activation patterns in individuals with knee osteoarthritis[J]. *Clin Biomech*, 2004, 19(1):44-49. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2003.08.007.

(修回日期:2020-04-23)

(本文编辑:阮仕衡)