

- Medicine, 2001, 35(1): 60—64.
- [36] Bahr R, Fossan B, Løken S, et al. Surgical Treatment Compared with Eccentric Training for Patellar Tendinopathy (Jumper's Knee) A Randomized, Controlled Trial[J]. The Journal of Bone & Joint Surgery, 2006, 88(8): 1689—1698.
- [37] Purdam CR, Jonsson P, Alfredson H, et al. A pilot study of the eccentric decline squat in the management of painful chronic patellar tendinopathy[J]. British Journal of Sports Medicine, 2004, 38(4): 395—397.
- [38] Kongsgaard M, Aagaard P, Roikjaer S, et al. Decline eccentric squats increases patellar tendon loading compared to standard eccentric squats[J]. Clinical Biomechanics, 2006, 21(7): 748—754.
- [39] Malliaras P, Barton CJ, Reeves ND, et al. Achilles and patellar tendinopathy loading programmes[J]. Sports Medicine, 2013, 43(4): 267—286.
- [40] Peterson M, Butler S, Eriksson M, et al. A randomized controlled trial of eccentric vs. concentric graded exercise in chronic tennis elbow (lateral elbow tendinopathy) [J]. Clin Rehabil, 2014, 28(9): 862—872.
- [41] Söderberg J, Grooten WJ, Äng BO. Effects of eccentric training on hand strength in subjects with lateral epicondylalgia: a randomized-controlled trial[J]. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 2012, 22(6): 797—803.
- [42] Tyler TF, Thomas GC, Nicholas SJ, et al. Addition of isolated wrist extensor eccentric exercise to standard treatment for chronic lateral epicondylitis: a prospective randomized trial[J]. Journal of Shoulder and Elbow Surgery, 2010, 19(6): 917—922.
- [43] Raman J, MacDermid JC, Grewal R. Effectiveness of different methods of resistance exercises in lateral epicondylitis—a systematic review[J]. Journal of Hand Therapy, 2012, 25(1): 5—26.
- [44] Greenstein JS, Bishop BN, Edward JS, et al. The effects of a closed-chain, eccentric training program on hamstring injuries of a professional football cheerleading team[J]. Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics, 2011, 34(3): 195—200.
- [45] Salci Y, Yildirim A, Celik O, et al. The effects of eccentric hamstring training on lower extremity strength and landing kinetics in recreational female athletes[J]. Isokinetics and Exercise Science, 2013, 21(1): 11—18.
- [46] Hibbert O, Cheong K, Grant A, et al. A systematic review of the effectiveness of in the prevention of hamstring muscle strains in otherwise healthy individuals[J]. N Am J Sports Phys Ther, 2008, 3(2): 67—81.
- [47] Gabbe BJ, Branson R, Bennell KL. A pilot randomised controlled trial of eccentric exercise to prevent hamstring injuries in community-level Australian Football[J]. Journal of Science and Medicine in Sport, 2006, 9(1): 103—109.

· 综述 ·

前交叉韧带重建术后的生物力学研究现状

刘丽娟¹ 敖丽娟^{2,3}

膝关节前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)损伤是临床上常见的运动损伤。近年来,用生物力学方法评价手术治疗对前交叉韧带重建术后的疗效是运动医学及康复医学领域的研究热点。通过对韧带重建术后的生物力学进行研究后发现尽管重建手术能够在一定程度上恢复膝关节的正常功能,但重建侧膝关节仍然存在运动学、动力学以及肌肉活动特征等的异常。因此,对重建侧膝关节进行全面的生物力学评价有利于了解外科手术的疗效和制定有针对性的康复治疗方

ACL起自股骨外侧髁内侧面后部,远端呈扇形张开附着于胫骨平台髁间棘内侧部。ACL的长度为22—44mm(平均32mm),宽度为7—12mm^[1]。在功能上,ACL分为两部分,即前内侧束(anteromedial bundle, AMB)和后外侧束(postero-lateral bundle, PLB)。AMB起自股骨附着点的近前方,止于胫骨附着点的前内侧,而PLB起自股骨附着点的远后方,止于胫骨附着点的后外侧。AMB最主要的功能是限制胫骨相对于股骨的前移^[2],在慢性ACL缺失患者的膝关节中,出现胫骨前移是正常膝关节的4倍^[3]。PLB的主要功能是限制胫骨内旋,尤其是在膝关节接近完全伸直时这种作用更加明显;另外,ACL还有小部分限制胫骨外旋和内外翻运动的作用^[4]。对ACL解剖和功能的正确认识,为重建后通过生物力学方法评价膝关节的功能提供了重要的理论依据。

1 膝关节前交叉韧带的解剖和功能

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2015.06.026

1 昆明医科大学,昆明,650001; 2 昆明医科大学第二附属医院康复科; 3 通讯作者

作者简介:刘丽娟,女,硕士研究生; 收稿日期:2014-03-23

2 膝关节前交叉韧带重建后下肢的生物力学特征

ACL损伤后破坏了其正常的解剖结构,导致伤侧下肢正常的运动学、动力学以及肌肉活动发生改变^[5],从而引起膝关节严重不稳。此外,ACL损伤还会进一步引起半月板的撕裂和关节软骨的退行性改变^[6],最终发生创伤后膝关节骨性关节炎(knee osteoarthritis, KOA),因此需要对ACL损伤进行手术重建。近年研究表明,无论采取何种术式和移植术重建膝关节功能的恢复也是有限的,仍会存在下肢的生物力学异常^[7-8]。

2.1 膝关节前交叉韧带重建后下肢的运动学特征

ACL重建术后的患者,三个平面上仍然存在下肢异常的运动学特征。Knoll Z等^[9]对25例ACL重建者在术后12个月在平地步行时通过三维步态分析发现,在步态周期的摆动期这些患者出现明显的膝关节屈曲角度的减少。正常步态中,从足跟离地即将进入摆动初期之前膝关节开始屈曲,到达大约35°的屈曲角度时,脚趾离地(步态周期的60%)。最大的膝关节屈曲角度大约为60°,是发生在摆动中期开始时(步态周期的73%)。摆动终末期,膝关节几乎处于完全的伸直位,为下次足跟着地做准备。行走时在摆动阶段缺乏充分的膝关节屈曲会影响脚趾离地,为了代偿这种情况,髌关节必须过度屈曲^[10]。Xergia SA等^[7]对22例ACL重建的男性运动员在单腿跳跃活动中进行三维步态分析后发现与健康对照组相比,在起跳阶段所有受试者出现膝关节屈曲和踝关节背屈角度的减少,在落地阶段,受试者出现膝关节屈曲角度的减少。在起跳阶段膝关节屈曲和踝关节背屈角度的减少会降低跳跃运动的“推动力”,这样会影响跳跃的距离,而落地阶段膝关节屈曲角度的减少可能是想通过使膝关节“僵硬”以维持落地时的平衡,但也可能因此而增加膝关节的负荷,成为产生KOA的潜在危险因素^[11]。Webster KE等^[12]研究了16例ACL重建的患者分别在术后10个月和3年的随访期中平地步行时下肢的运动学参数,发现与术后10个月相比较,术后3年这些患者在步态周期的终末支撑期中膝关节屈曲角度减少,说明患者可以完成更多的膝关节伸展运动,步态得到明显改善。所以,尽管重建后不能完全恢复下肢的生物力学,但某种程度上也使得膝关节的功能得到改善。

正常情况下,由于关节的形态学及强有力的内外侧副韧带的作用,膝关节在冠状面上有很小范围的运动发生,但很难去定量^[10]。有多项研究表明,ACL重建后通过三维步态分析可以观察到膝关节在冠状面上有明显的内收外展运动,这样就会使得膝关节冠状面上正常的对位对线关系发生改变,从而使股胫关节压力增加,导致KOA的发生^[11,13]。在横断面上,当膝关节屈曲一定角度的时候,可以产生内外旋运动。在足跟触地时,胫骨相对于股骨大约处于2°—3°的外旋位,在整个支撑期中,膝关节逐渐内旋^[10]。然而,Deneweth JM

等^[14]在对9例ACL重建的患者进行单腿跳跃测试中通过三维步态分析发现,在首次足跟触地时9例患者均呈现出胫骨过度的外旋运动,另有研究结果也与其类似^[15],表明在整个步态周期的支撑期中ACL重建侧膝关节的内旋运动明显减少;但Georgoulis AD等^[16]却发现对ACL重建的患者进行水平步行测试时与健侧膝关节比较,在整个支撑期中双侧膝关节的内外旋运动并未表现出显著性差异。

因此,膝关节内旋—外旋运动学的改变更有可能出现在对肢体功能要求较高的功能性活动,如单腿跳跃或下肢的旋转运动中。如果膝关节内外旋运动的异常也是导致膝关节易发生退行性改变的因素,那么重建后长期进行这种功能性活动可能加剧关节退行性改变的发生。

2.2 膝关节前交叉韧带重建后下肢的动力学特征

ACL重建后下肢动力学特征的改变主要体现在地面反作用力、关节的力矩和能量的吸收上。Orishimo KF等^[17]研究了在单腿跳跃活动中ACL重建者下肢的动力学特征,发现在起跳阶段前方地面反作用力和垂直地面反作用力,以及下肢总的伸肌力矩两侧下肢相比未有明显差异,但重建侧下肢膝关节伸肌力矩明显低于健侧下肢,髌、踝关节伸肌力矩高于健侧下肢,与健侧下肢相比,重建侧下肢膝关节能量的产生明显低于健侧下肢,髌、踝关节能量的产生均高于健侧下肢,尤其是髌关节更加明显;在落地阶段,后方地面反作用力和垂直地面反作用力,以及下肢总的伸肌力矩两侧下肢相比也未有明显差异,仍然是髌、踝伸肌力矩高于健侧下肢,但在能量的吸收上,重建侧下肢髌、膝关节均低于健侧下肢,而踝关节明显高于健侧下肢。重建侧下肢通过邻近的髌关节和踝关节代偿模式的这种适应性改变实际上对于伤侧膝关节来说是一种保护性策略,主要是为了避免对伤侧膝关节产生过多的前方剪切力。另研究报道,在单腿跳跃活动的落地阶段,重建侧下肢垂直地面反作用力下降的同时还伴有髌、膝关节屈曲角度的增加,重建侧下肢倾向于采取这种“软着地”的策略,这种适应性改变也是为了减少对伤侧膝关节的冲击负荷,从而避免再次损伤^[18]。

从逆向动力学的角度来看,地面反作用力是计算膝关节动力学的决定性成分。以往研究发现,ACL损伤后双侧膝关节存在动力学的非对称性,同时地面反作用力也表现出非对称性^[17,19],但这种情况更多见于单腿跳跃的功能性活动中。因为进行单腿跳跃活动时,重建侧膝关节在活动中出现的非对称性表现主要是通过同侧邻近的关节来进行代偿。如果患者参与双腿跳跃的活动时,重建侧膝关节功能的缺失则主要会通过同侧膝关节来代偿,这种反常的肢体间的代偿策略可能会使对侧膝关节负荷增加,从而增加对侧ACL损伤的发生率^[20]。在功能性活动中重建侧膝关节活动的减少必然会通过其他形式进行代偿,所以,外科手术仍未使ACL损伤

的膝关节恢复至能够参与功能活动的正常水平。如果意识不到这一点,便会误导患者重新回到不恰当的活动参与中,这可能会导致重建侧ACL再发损伤,甚至发生对侧ACL的损伤。

3 膝关节前交叉韧带重建后肌肉活动的特征

ACL移植重建最常用的是选择自体腘绳肌腱或骨-髌腱-骨移植重建,这样会导致肌肉正常的解剖形态受到影响,随之而来的可能会使肌肉功能发生改变,导致术后的肌肉力量和运动中神经肌肉的活动等出现异常。有人分别将接受两种移植植物重建后下肢的肌肉力量与正常受试者进行对比后发现,无论是哪种移植植物重建,通过等速肌力测试患者更多的是表现出膝关节伸肌力量的缺失,而屈肌力量的缺失不明显,即便是在术后多年,这种情况依然存在^[21-22]。在ACL损伤后可立即发生股四头肌力量下降^[23],但是关于膝关节伸肌力量缺失的根本原因,目前仍未有确切的机制来解释。由于股四头肌的收缩可使胫骨前移,这样就会增加重建的ACL的张力,股四头肌力量的下降也是一种保护性机制^[21]。但是,膝关节屈伸肌力量的不平衡会导致关节面内负荷的不均衡分布,长此以往会发生膝关节退行性改变^[24]。

ACL损伤和重建术后的患者,损伤侧下肢的神经肌肉功能在活动中也会发生适应性改变。Patras K等^[25]报道了14例男性运动员在低、中、高强度三个不同级别的跑步活动中重建侧下肢的表面肌电活动情况,结果发现在低、中强度的活动中这些男性运动员重建侧下肢股外侧肌的肌电振幅值明显高于股二头肌的肌电振幅值,而在高强度活动中重建侧下肢的股二头肌的肌电活动较股外侧肌的肌电活动明显增加。Tsai LC等^[26]发现在功能性活动中除了腘绳肌的肌电活动较股四头肌增加外,同时股四头肌和腘绳肌的协同收缩活动也明显增加。由于腘绳肌附着于胫骨近端,肌肉收缩时可以产生一个向后的力^[27],因此肌肉募集策略的这种改变,主要是想通过募集更多的腘绳肌活动提供一个向后的剪切应力来减少对膝关节前方的剪切负荷^[28]。这种从以“股四头肌为主导”向以“腘绳肌为主导”的策略模式的转换,理论上讲对于重建侧的膝关节来说是一种积极的适应性改变,具有保护意义。股四头肌和腘绳肌协同收缩活动增加可以增强膝关节“僵硬性”,使关节能够很好地对抗外旋负荷^[29]。但是重建侧下肢这种增加肌肉协同收缩的策略模式同样会使胫股关节压力增加^[30]。另外,ACL重建侧下肢还表现出其他的神经肌肉代偿策略,在单腿跳跃活动中股外侧肌的肌电活动减少,而臀大肌和腓肠肌的肌电活动增加,这种通过邻近关节来代偿的策略对于伤侧膝关节是一种保护机制,都是为了减少膝关节的负荷。

ACL重建的患者,由于不能完全恢复正常的神经肌肉功

能,同时也是为了保护伤侧的膝关节,重建侧下肢会发生神经肌肉的适应性改变以代偿这种功能的缺失。

4 小结

ACL损伤后进行重建术尽管能在一定程度上恢复膝关节的功能,但仍然存在下肢运动学、动力学和肌肉活动等的异常。要想使膝关节的功能获得更大的恢复,甚至接近正常,就需要通过对ACL重建后进行全面的生物力学评估,找出仍然存在的异常生物力学特征,同时制定有针对性的康复训练方案,尤其是针对神经肌肉功能进行训练,从而使患者重返运动场。因此,未来生物力学的研究方向可着眼在不同的康复训练方案对ACL重建后下肢功能的改善上。

参考文献

- [1] Amis AA, Dawkins GP. Functional anatomy of the anterior cruciate ligament. Fibre bundle actions related to ligament replacements and injuries[J]. J Bone Joint Surg Br, 1991, 73(2):260—267.
- [2] Butler DL, Noyes FR, Grood ES. Ligamentous restraints to anterior-posterior drawer in the human knee. A biomechanical study[J]. The Journal of bone and joint surgery American volume, 1980, 62(2):259—270.
- [3] Beynnon BD, Fleming BC, Labovitch R, et al. Chronic anterior cruciate ligament deficiency is associated with increased anterior translation of the tibia during the transition from non-weightbearing to weightbearing[J]. J Orthop Res, 2002, 20(2):332—337.
- [4] Matsumoto H, Suda Y, Otani T, et al. Roles of the anterior cruciate ligament and the medial collateral ligament in preventing valgus instability[J]. J Orthop Sci, 2001, 6(1):28—32.
- [5] Hurd WJ, Snyder-Mackler L. Knee instability after acute ACL rupture affects movement patterns during the mid-stance phase of gait[J]. J Orthop Res, 2007, 25(10):1369—1377.
- [6] Papageorgiou CD, Gil JE, Kanamori A, et al. The biomechanical interdependence between the anterior cruciate ligament replacement graft and the medial meniscus[J]. The American journal of sports medicine, 2001, 29(2):226—231.
- [7] Xergia SA, Pappas E, Zampeli F, et al. Asymmetries in functional hop tests, lower extremity kinematics, and isokinetic strength persist 6 to 9 months following anterior cruciate ligament reconstruction[J]. The Journal of orthopaedic and sports physical therapy, 2013, 43(3):154—162.
- [8] Järvelä T, Järvelä S. Double-bundle versus single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction[J]. Clinics in sports medicine, 2013, 32(1):81—91.
- [9] Knoll Z, Kocsis L, Kiss RM. Gait patterns before and after anterior cruciate ligament reconstruction[J]. Knee surgery,

- sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA, 2004, 12(1):7—14.
- [10] Lafortune MA, Cavanagh PR, Sommer HJ 3rd, et al. Three-dimensional kinematics of the human knee during walking [J]. *Journal of biomechanics*, 1992, 25(4):347—357.
- [11] Butler RJ, Minick KI, Ferber R, et al. Gait mechanics after ACL reconstruction: implications for the early onset of knee osteoarthritis[J]. *British journal of sports medicine*, 2009, 43(5):366—370.
- [12] Webster KE, Feller JA, Wittwer JE. Longitudinal changes in knee joint biomechanics during level walking following anterior cruciate ligament reconstruction surgery[J]. *Gait & posture*, 2012, 36(2):167—171.
- [13] Sanford BA, Zucker-Levin AR, Williams JL, et al. Principal component analysis of knee kinematics and kinetics after anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *Gait & posture*, 2012, 36(3):609—613.
- [14] Deneweth JM, Bey MJ, McLean SG, et al. Tibiofemoral joint kinematics of the anterior cruciate ligament-reconstructed knee during a single-legged hop landing[J]. *The American journal of sports medicine*, 2010, 38(9):1820—1828.
- [15] Webster KE, Feller JA. Alterations in joint kinematics during walking following hamstring and patellar tendon anterior cruciate ligament reconstruction surgery[J]. *Clinical biomechanics*, 2011, 26(2):175—180.
- [16] Georgoulis AD, Papadonikolakis A, Papageorgiou CD, et al. Three-dimensional tibiofemoral kinematics of the anterior cruciate ligament-deficient and reconstructed knee during walking[J]. *The American journal of sports medicine*, 2003, 31(1):75—79.
- [17] Orishimo KF, Kremenik IJ, Mullaney MJ, et al. Adaptations in single-leg hop biomechanics following anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA*, 2010, 18(11):1587—1593.
- [18] Vairo GL, Myers JB, Sell TC, et al. Neuromuscular and biomechanical landing performance subsequent to ipsilateral semitendinosus and gracilis autograft anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA*, 2008, 16(1):2—14.
- [19] Decker MJ, Torry MR, Noonan TJ, et al. Landing adaptations after ACL reconstruction[J]. *Medicine and science in sports and exercise*, 2002, 34(9):1408—1413.
- [20] Dai B, Butler RJ, Garrett WE, et al. Using ground reaction force to predict knee kinetic asymmetry following anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 2013, doi: 10.1111/sms.12118.
- [21] Leiter JR, Gourlay R, McRae S, et al. Long-term follow-up of ACL reconstruction with hamstring autograft[J]. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA*, 2014, 22(5):1061—1069.
- [22] Leys T, Salmon L, Waller A, et al. Clinical results and risk factors for reinjury 15 years after anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective study of hamstring and patellar tendon grafts[J]. *The American journal of sports medicine*, 2012, 40(3):595—605.
- [23] Eitzen I, Holm I, Risberg MA. Preoperative quadriceps strength is a significant predictor of knee function two years after anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *British journal of sports medicine*, 2009, 43(5):371—376.
- [24] Keays SL, Newcombe PA, Bullock-Saxton JE, et al. Factors involved in the development of osteoarthritis after anterior cruciate ligament surgery[J]. *The American journal of sports medicine*, 2010, 38(3):455—463.
- [25] Patras K, Zampeli F, Ristanis S, et al. Hamstring-dominant strategy of the bone-patellar tendon-bone graft anterior cruciate ligament-reconstructed leg versus quadriceps-dominant strategy of the contralateral intact leg during high-intensity exercise in male athletes[J]. *Arthroscopy*, 2012, 28(9):1262—1270.
- [26] Tsai LC, McLean S, Colletti PM, et al. Greater muscle co-contraction results in increased tibiofemoral compressive forces in females who have undergone anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *J Orthop Res*, 2012, 30(12):2007—2014.
- [27] Renström P, Arms SW, Stanwyck TS, et al. Strain within the anterior cruciate ligament during hamstring and quadriceps activity[J]. *The American journal of sports medicine*, 1986, 14(1):83—87.
- [28] Ortiz A, Olson S, Libby CL, et al. Landing mechanics between noninjured women and women with anterior cruciate ligament reconstruction during 2 jump tasks[J]. *The American journal of sports medicine*, 2008, 36(1):149—157.
- [29] Teixeira da Fonseca S, Silva PL, Ocarino JM, et al. Analyses of dynamic co-contraction level in individuals with anterior cruciate ligament injury[J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2004, 14(2):239—247.
- [30] Lewek M, Rudolph K, Axe M, et al. The effect of insufficient quadriceps strength on gait after anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *Clinical biomechanics*, 2002, 17(1):56—63.