

· 综述 ·

膝前交叉韧带重建术后康复治疗中开链与闭链运动的应用

梁炳寅 王惠芳 王予彬

随着全民健身与竞技体育运动的广泛开展,运动损伤的发生率亦有所升高。前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)作为维持膝关节静力性稳定的结构,其主要作用是限制胫骨前移^[1]。ACL 损伤较为多见,相关的治疗越来越受到人们的重视^[2]。

ACL 重建术后最佳的康复计划,在过去 20 年发生了很大的变化^[3]。使患者早期达到正常的关节活动度与负荷量以及尽早恢复正常运动,已经成为公认的标准。目前的康复计划还缺乏足够的临床随机对照研究的考证,多数只是依靠回顾性的病例研究,故其效用很难确定。而开链与闭链运动的应用恰恰也是争论的焦点之一,本文将介绍部分最新的相关研究结果,以供讨论。

膝关节前交叉韧带功能解剖与生物力学

ACL 起点位于股骨外髁间凹面的后内侧部分,止点位于胫骨髁间隆突之间以及其前侧面、内侧与外侧半月板前角之间^[4]。ACL 平均长度为 31~38 mm,中间部分平均宽度为 10~12 mm,横截面近似卵圆形,女性和男性平均面积分别为 36 mm² 和 44 mm²^[5]。

膝关节屈伸运动时,ACL 内不同部位纤维的张力不同,很多学者据此将 ACL 进行了分束研究。Palmer^[6] 首先将 ACL 分为前内束(anteromedial band, AMB)与后外束(posterolateral band, PLB)。Brantigan 和 Voshell^[7] 与 Girgis 等^[8] 对这种分束方法做了进一步的研究与阐述,现在已经被广泛接受,并且成为研究 ACL 功能的解剖学基础。

认识 AMB 和 PLB 应力变化规律各异的特点,对 ACL 功能重建有重要意义。单束重建能较好地恢复 ACL 前后向稳定,但在旋转稳定上改善不大^[9]。进一步研究更接近功能解剖的双束重建,在恢复 ACL 复杂功能上有重要意义。为实现解剖功能重建,人们已进行了双束或多束重建的初步研究和实践^[10-11]。结果表明,双束重建在提高前后向稳定性、恢复抗旋转外力方面的效果较单束重建更好,更接近正常 ACL 的功能^[12]。

膝关节前交叉韧带重建术

与关节外韧带相反,作为关节内韧带的 ACL 不发生自发性修复,临床上中度 ACL 撕裂伤常不能愈合,并会继发半月板损伤和关节不稳。Murray 等^[13] 描述了人 ACL 韧带断裂后经历 4 个组织学变化阶段:①0~3 周为炎性细胞渗透阶段;②4~8 周为外围韧带组织(epiligamentous tissue)修复和再滑膜化阶段;③9~20 周为重新血管化和细胞增殖阶段;④20 周后开始残基的重塑阶段。关节镜下重建 ACL 具有损伤小、恢复快等优点,已

成为国内外治疗 ACL 损伤的微创外科手段。ACL 重建需要考虑移植材料的选择、移植物的置入过程、移植物的张力和移植物的固定等多种因素。随着微创技术的发展,各种关节镜下 ACL 重建术应运而生^[14]。手术方法的改变主要在两个方面:胫骨端隧道和不同材料的韧带制作。

对单隧道和双隧道技术现在仍存有异议。主张单隧道重建者认为,此技术已能满足膝关节的力学要求,方法简便,手术损伤小^[15]。而主张双隧道重建者认为,单束重建时,韧带在伸、屈膝位的约束状态低于或高于正常。而双隧道重建在任何活动范围几乎都有正常的约束,且双束重建可以降低骨性关节炎的发生率^[16],因此更符合 ACL 的功能解剖和生物力学特性^[17]。

Simon 和 Lonnie^[18] 提出等距概念以来,等距(isometric)特性的变化对 ACL 重建疗效的影响以及如何选择最佳重建位置等一直是临床和基础研究的热点。等距是指膝关节在伸屈活动范围内 ACL 的最大长度变化 ≤ 1 mm。现在比较一致的意见是无绝对等距位置(isometric point),因而提出生理等距的概念,即膝关节伸屈活动时 ACL 的最大长度变化 ≤ 3 mm。从“生理等距”到“等距重建”,许多学者提出多种 ACL 的股骨重建位置,如 ACL 股骨附着区的中心^[19]、后部^[19]、后上部^[20] 以及前内侧束附着区等。Furia 等^[19] 认为,膝关节的运动精细而复杂,以单股韧带重建不可能恢复膝关节复杂的运动学功能,至多只能部分恢复等距。同时无负荷条件下测得的等距位点在韧带重建承受负荷后又会发生变化。ACL 的 AMB 和 PLB 的中心部分纤维的主要走向是两束韧带功能的主要代表。在承受重力的情况下,ACL 的内外两束韧带所起的作用是不同的,无法通过 1 束的重建来得到另 1 束的运动学性能。因此,以 1 束韧带的重建来代替 2 束韧带可能带来膝关节的解剖和运动学改变,是容易再损伤的原因。

Yagi 等^[21] 模拟各种手术方法,对膝关节的前后和旋转稳定度做了比较,认为两束解剖学重建后的膝关节运动更符合完整膝关节的运动状态,从而可能缓解膝关节内其他组织的退变情况。

膝关节前交叉韧带重建术后康复中的开链与闭链运动

开链运动(open kinetic chain exercise, OKC)和闭链运动(close kinetic chain exercise, CKC)是 1956 年由 Steindler 在《运动机能学》一书中首先提出,在关节康复治疗中具有重要的运动学与生物力学意义。OKC 与 CKC 对同一肌肉所产生的作用不同。

OKC 指运动时肢体近段固定而远端关节活动的典型不负重的单关节的运动,如直腿抬高、坐位伸膝训练、步行时的摆动相。CKC 指运动时肢体远端固定而近端关节活动的典型负重的多关节参与的运动,如下蹲、上下台阶、骑固定功率车、步行时的支撑相等。Mikkelsen 等^[22] 提出,CKC 训练可以增强和提高人体正常功能的本体感觉反馈能力,其研究表明,CKC 训练相

对于 OKC 训练,在很大程度上减少了关节运动时的剪切力,并增强了神经肌肉的协同收缩能力。在他们的生物力学分析中,提出 CKC 可以增强肌群的综合能力、协调能力及正常功能所需要的本体感觉。

ACL 重建后,移植强度经历了一个由强急剧减弱,再逐渐增强的过程,这与 Goradia 等^[23-24]的实验结果相一致。因为 ACL 重建后,移植需要经历坏死、重新血管化、胶原纤维爬行替代、塑形等过程,最后成为类似于 ACL 生物特性的替代韧带^[23,25-26]。因此术后康复计划的制定要以重建韧带的转归过程为指导。

Toutoungi 等^[27]报道,在下蹲时,ACL 上应力的峰值出现在膝关节屈曲 35~40°时,负荷增加到大约为体重的 0.55 倍多,随着屈曲角度的增大,应力减小,超过 50°后负荷就很少。因而提出,ACL 损伤患者进行下蹲运动是比较安全的。这实际提示 CKC 训练对新韧带的安全性较高。Lutz 等^[28]认为,闭链的收缩同开链比较而言,由于运动方式不同,故其肌肉的募集情况和关节的活动均是不同的,对闭链而言,要完成膝关节的屈伸动作,需同时收缩屈肌和伸肌,即闭链的一个特征就是同时收缩的存在。Augustsson 等^[29]认为,由于闭链实际上是将开链的旋转运动转换成线性运动,因此运动时不增加关节的剪切力,可以增加保护作用,更接近于功能性康复,对 ACL 重建或松弛的关节,更可以提供早期、安全、有效的康复手段。而 Fleming 等^[30]应用 2 种训练方式,测定受试者的 ACL 的应力,结果表明,2 种训练方式所产生的应力无差异。因此认为,CKC 较 OKC 安全性大的结论缺乏依据。Hungerford 等^[31]的研究结果证明,髌股关节的应力大小取决于训练中膝关节的运动范围。为避免髌股关节产生过度的应力,OKC 训练需限制膝关节由 90°至 45°的活动度;CKC 训练需限制膝关节由完全伸直位至大约 45°屈曲位。提示 CKC 与 OKC 皆可应用于 ACL 重建的早期康复中。

有研究发现,在膝关节高度屈曲位受模拟重力时,ACL 两束韧带的长度将出现明显的增长,并随着屈曲程度的加大而增加。Penner 等^[32]认为,ACL 的拉伸超过大约 2 mm 时就存在永久变形的危险。目前的重建手术仍不可避免地出现一定程度的松弛^[33]。重建术后早期,自体移植材料的强度在移植术后 3~5 周可下降到初始强度的 10%~15%。所以,在重建术后早期应当适当保护,避免在高度屈膝的情况下负重^[34]。另有研究者指出,在康复的后期,患者应避免下坡跑,因为 7.0~8.0 km/h 的速度跑 45°的下坡时引起的 ACL 延长为平地跑的 2 倍;还要避免全范围的 OKC,因为它也能引起 ACL 的显著延长^[35]。

等速测试中到达峰值矩的时间(time to peak torque,TPT)是指屈、伸膝肌达到最大力量的时间,是肌肉爆发力的指标,由于闭链收缩时取决于主动肌和拮抗肌的同时协调收缩,使得闭链时 TPT 明显长于开链时,这提示爆发力的训练应首选 OKC^[36]。有观点认为,股四头肌是与 ACL 相拮抗的^[34,37],而 Bodor^[38]的研究表明,这只是在 OKC 中的情况,如游泳、踢球、摔跤等运动,而在跑、跳、站、走等 CKC 中股四头肌有使股骨向前的矢量,对 ACL 起保护作用,强有力的股四头肌对于防止 ACL 损伤和损伤的 ACL 康复都是有好处的。因此,ACL 的康复过程应注重股四头肌肌力的训练^[39]。在我们的运动员 ACL 重建的康复治疗结果中,术后 8 周术肢腓绳肌的肌力仅为股四头肌肌力的 50%,提示术后同样需要重视腓绳肌肌力的训练。

关于 CKC 比 OKC 能较快恢复股四头肌肌力的问题,研究资料显示,OKC 训练方式结合高强度电流刺激可大幅度提高股四头肌扭矩。ACL 重建术后的康复中,临床医师并未完全摒弃传统的 OKC 练习,OKC 也未被 CKC 所取代。OKC 和 CKC 方式经过改良,可将 ACL 移植肌腱和髌股关节的应力的危险减少到最低程度。2 种训练方式均适合于模拟功能性活动。将 2 种训练方式结合起来,或许是股四头肌肌力恢复的最佳选择。当股四头肌肌力恢复后,增强功能是康复治疗的目标。康复治疗师应将 2 种训练方式最佳地结合起来以达到理想的治疗效果^[40]。

综上所述,CKC 由于同时收缩的存在,加上是线性运动代替了旋转运动,使得其屈、伸膝肌的力负荷较开链时减小,对膝关节 ACL 的切力也减小,因此 CKC 对 ACL 的损伤或重建后的康复,是一种安全、可靠的康复训练方法。对于 OKC,则可在通过限制运动的角度来减小髌股关节的应力的前提下加以应用,尤其在康复的后期,两者应结合起来,以达到关节功能的最大恢复。

参 考 文 献

- [1] Serpas F, Yanagawa T, Pandy M. Forward-dynamics simulation of anterior cruciate ligament forces developed during isokinetic dynamometry. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2002, 5: 33-34.
- [2] Goldstein J, Bosco JA 3rd. The ACL-deficient knee: natural history and treatment options. *Bull Hosp Jt Dis*, 2001-2002, 60: 173-178.
- [3] Grodski M, Marks R. Exercises following anterior cruciate ligament reconstructive surgery: biomechanical considerations and efficacy of current approaches. *Res Sports Med*, 2008, 16: 75-96.
- [4] Clark JM, Sidles JA. The interrelation of fiber bundles in the anterior cruciate ligament. *J Orthop Res*, 1990, 8: 180-188.
- [5] Anderson AF, Dome DC, Gautam S. Correlation of anthropometric measurements, strength, anterior cruciate ligament size and intercondylar notch characteristics to sex differences in anterior cruciate ligament tears. *Am J Sports Med*, 2001, 29: 58-63.
- [6] Palmer I. On the injuries to the ligaments of the knee joint: a clinical study. *Acta Chir Scand*, 1938, 91: 1-282.
- [7] Brantigan OC, Voshell AF. The mechanics of the ligaments and menisci of the knee joint. *J Bone Joint Surg*, 1941, 23: 44-66.
- [8] Girgis FG, Marshall JL, Monajem A. The cruciate ligaments of the knee joint. Anatomical, functional and experimental analysis. *Clin Orthop Relat Res*, 1975, 22: 216-231.
- [9] Nikolaou VS, Efsthopoulos N, Sourlas I, et al. Anatomic double-bundle versus single-bundle ACL reconstruction: a comparative biomechanical study in rabbits. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2009, 17: 895-906.
- [10] Trojani C, Sané JC, Coste JS, et al. Four-strand hamstring tendon autograft for ACL reconstruction in patients aged 50 years or older. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2009, 95: 22-27.
- [11] Salzmann GM, Spang JT, Imhoff AB. Double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction in a skeletally immature adolescent athlete. *Arthroscopy*, 2009, 25: 321-324.
- [12] Shihai A, Franceschi JP, Christel P, et al. Anterior cruciate ligament reconstruction: biomechanical comparison on cadaver specimens using a single or double hamstring technique. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot*, 2004, 90: 643-650.

- [13] Murray MM, Martin SD, Martin TL, et al. Histological changes in the human anterior cruciate ligament after rupture. *J Bone Joint Surg Am*, 2000, 82-A:1387-1397.
- [14] Nurmi JT, Kannus P, Sievanen H, et al. Interference screw fixation of soft tissue grafts in anterior cruciate ligament reconstruction: part 2: effect of preconditioning on graft tension during and after screw insertion. *Am J Sports Med*, 2004, 32:418-424.
- [15] Yanagawa T, Shelburne K, Serpas F, et al. Effect of hamstrings muscle action on stability of the ACL-deficient knee in isokinetic extension exercise. *Clin Biomech (Bristol Avon)*, 2002, 17:705-712.
- [16] Morimoto Y, Ferretti M, Ekdahl M, et al. Tibiofemoral joint contact area and pressure after single- and double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy*, 2009, 25:62-69.
- [17] Odensten M, Gillquist J. A modified technique for anterior cruciate ligament (ACL) surgery using a new drill guide for isometric positioning of the ACL. *Clin Orthop Relat Res*, 1986, 12:154-158.
- [18] Simon F, Lonnie P. The history of posterior cruciate ligament injury and reconstruction. *Tech Orthop*, 2001, 16:105-108.
- [19] Furia JP, Lintner DM, Saiz P, et al. Isometry measurements in the knee with the anterior cruciate ligament intact, sectioned, and reconstructed. *Am J Sports Med*, 1997, 25:346-352.
- [20] Markolf KL, Hame S, Hunter DM, et al. Effects of femoral tunnel placement on knee laxity and forces in an anterior cruciate ligament graft. *J Orthop Res*, 2002, 20:1016-1024.
- [21] Yagi M, Wong EK, Kanamori A, et al. Biomechanical analysis of an anatomic anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med*, 2002, 30: 660-666.
- [22] Mikkelsen C, Werner S, Eriksson E. Closed kinetic chain alone compared to combined open and closed kinetic chain exercises for quadriceps strengthening after anterior cruciate ligament reconstruction with respect to return to sports: a prospective matched follow-up study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2000, 8:337-342.
- [23] Goradia VK, Rochat MC, Grana WA, et al. Tendon-to-bone healing of a semitendinosus tendon autograft used for ACL reconstruction in a sheep model. *Am J Knee Surg*, 2000, 13:143-151.
- [24] Weiler A, Peine R, Pashmineh-Azar A, et al. Tendon healing in a bone tunnel. Part I: Biomechanical results after biodegradable interference fit fixation in a model of anterior cruciate ligament reconstruction in sheep. *Arthroscopy*, 2002, 18: 113-123.
- [25] Weiler A, Hoffmann RF, Bail HJ, et al. Tendon healing in a bone tunnel. Part II: Histologic analysis after biodegradable interference fit fixation in a model of anterior cruciate ligament reconstruction in sheep. *Arthroscopy*, 2002, 18:124-135.
- [26] Yamakado K, Kitaoka K, Yamada H, et al. The influence of mechanical stress on graft healing in a bone tunnel. *Arthroscopy*, 2002, 18:82-90.
- [27] Toutoungi DE, Lu TW, Leardini A, et al. Cruciate ligament forces in the human knee during rehabilitation exercise. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2000, 15:176-187.
- [28] Lutz GE, Palmitier RA, An KN, et al. Comparison of tibiofemoral joint forces during open-kinetic-chain and closed-kinetic-chain exercises. *J Bone Joint Surg Am*, 1993, 75: 732-739.
- [29] Augustsson J, Esko A, Thomee R, et al. Weight training of the thigh muscles using closed vs. Open kinetic chain exercise: a comparison of performance enhancement. *J Orthop Sports Phys Ther*, 1998, 27: 3-8.
- [30] Beynnon BD, Johnson RJ, Fleming BC, et al. The strain behavior of the anterior cruciate ligament during squatting and active flexion-extension. A comparison of an open and a closed kinetic chain exercise. *Am J Sports Med*, 1997, 25:823-882.
- [31] Hungerford DS, Lennox DW. Rehabilitation of the knee in disorders of the patellofemoral joint: relevant biomechanics. *Orthop Clin North Am*, 1983, 14:397-402.
- [32] Penner DA, Daniel DM, Wood P, et al. An in vitro study of anterior cruciate ligament graft placement and isometry. *Am J Sports Med*, 1988, 16: 238-243.
- [33] Beynnon BD, Johnson RJ, Fleming BC, et al. Anterior cruciate ligament replacement: comparison of bone-patellar tendon-bone grafts with two-strand hamstring grafts. A prospective, randomized study. *J Bone Joint Surg Am*, 2002, 84-A: 1503-1513.
- [34] Mesfar W, Shirazi-Adl A. Knee joint biomechanics in open-kinetic-chain flexion exercises. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2008, 23:477-482.
- [35] Kwak SD, Ahmad CS, Gardner TR, et al. Hamstrings and iliotibial band forces affect knee kinematics and contact pattern. *J Orthop Res*, 2000, 18:101-108.
- [36] 郑光新, 邹毅, 周贤丽. 屈、伸膝肌向心性等速肌力测试的正常值研究. *中国康复医学杂志*, 1998, 13: 201.
- [37] MacWilliams BA, Wilson DR, DesJardins JD, et al. Hamstrings co-contraction reduces internal rotation, anterior translation, and anterior cruciate ligament load in weight-bearing flexion. *J Orthop Res*, 1999, 17: 817-822.
- [38] Bodor M. Quadriceps protects the anterior cruciate ligament. *J Orthop Res*, 2001, 19:629-633.
- [39] Laboute E, Savalli L, Lefevre T, et al. Interest of an iterative specialized rehabilitation after an anterior cruciate ligament reconstruction in high level sport athletes. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot*, 2008, 94:533-540.
- [40] Fitzgerald GK. Open versus closed kinetic chain exercise: issues in rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstructive surgery. *Phys Ther*, 1997, 77:1747-1754.

(修回日期:2009-12-25)

(本文编辑:松 明)

欢迎订阅《中华物理医学与康复杂志》