

•综述•

下肢力线不良解剖危险因素与非接触性前交叉韧带损伤

奥其 高晓宇 白志钢 新苏雅拉图

摘要 前交叉韧带 (ACL) 是维持人体活动的重要组织之一, 下肢力线不良会导致运动中非接触性 ACL 损伤。导致下肢力线不良的解剖因素包括骨性因素与非骨性因素, 骨性因素主要包括胫骨因素、股骨髁因素、股骨近端及髌骨与足踝因素等, 非骨性因素主要包括神经型因素、股骨机械轴周围因素、胫骨机械轴周围因素等。运动导致的非接触性 ACL 损伤大多由于下肢生物力线不良而影响膝关节正常负重, 造成 ACL 力学环境异常, 而 ACL 损伤修复或重建术后移植物失效的病例中也存在下肢力线不良的情况。因此, 在临床中准确评估并纠正下肢力线不良, 对于预防非接触性 ACL 损伤和 ACL 重建术后移植物失效有着重要意义。

关键词 下肢力线不良; 前交叉韧带; 非接触性损伤; 解剖因素

DOI: 10.3969/j. issn. 1673-7083. 2024. 04. 005

下肢力线也叫下肢机械轴, 分为股骨机械轴 (股骨头中心到膝关节中心连线) 和胫骨机械轴 (膝关节中心到踝关节中心连线) 两部分, 两连线的交点位于胫骨平台与股骨髁之间, 冠状面上两连线的内侧夹角称为髌-膝-踝角, 一般为 180° 或略小于 180° , 膝内翻患者的髌-膝-踝角小于 180° , 膝外翻患者的髌-膝-踝角大于 180° ; 矢状面上两连线夹角则可以判断膝关节是否过伸^[1-2]。下肢机械轴异常与神经肌肉异常导致的下肢力线不良是造成前交叉韧带 (ACL) 非接触性损伤重要的危险因素之一^[3], 在日常生活与运动过程中下肢力线不良通常会造成膝关节异常负重, 从而导致 ACL 处于异常的力学环境中, 增加非接触性损伤的风险。

ACL 起自胫骨髁间嵴之间前方较大区域, 止于股骨外侧髁后内侧半圆形区域, 分为前内侧束和后外侧束。当膝关节伸展时, ACL 的平均长度为 32 mm, 宽度为 7~12 mm^[4]。ACL 主要控制胫骨过度前移、内旋以及膝关节过伸、过度外翻, 是维持膝关节稳定的重要结构^[5]。在膝关节屈曲 $0^\circ\sim 30^\circ$ 时, ACL 提供 70%~87% 的胫骨前移阻力, 而在屈曲角度达到 $60^\circ\sim 90^\circ$ 时, 这种阻力值略减小, 提供 62%~85% 的胫骨前移阻力^[6], ACL 损伤发病率在

临床中约占 0.046%^[7], 占膝关节运动损伤的 20%。而患有偏瘫、脊髓损伤、股骨头坏死、髌臼发育不良、膝关节骨关节炎等疾病的患者可出现下肢生物力学异常, 从而出现不同程度的生活质量下降, 基本运动需求也会下降, 治疗这类疾病本身的重要性大于 ACL 损伤风险性的评估。

1 骨性因素

1.1 胫骨平台因素

胫骨后倾角会导致股骨与胫骨接触点后移, 受力点转移至胫骨平台后方, 这可能会导致膝关节过伸。有研究证实了存在膝关节过伸导致 ACL 重建术后移植物失效的病例^[8]。因此, 临床上需要医生准确评估膝关节过伸是否存在解剖学异常。另有研究表明, 胫骨髁间窝宽度指数、胫骨髁间隆起宽度与髁间窝宽度比等较小可导致 ACL 损伤^[9]。但尚未有研究证实这些数值异常会导致解剖学形态的下肢力线不良。

胫骨后倾角代表胫骨倾斜角度, 是膝关节矢状位评估下肢力线的重要依据, 其角度越大, ACL 损伤的风险越大^[10-11]。胫骨后倾角增大时对膝关节施加纵向压力, 会增加前向剪切力, 致胫骨相对股骨向前移位, 增加 ACL 受力, 尤其是外侧胫骨后倾角与 ACL 损伤的相关性更显著。Brandon 等^[12]对 100 例 ACL 断裂患者进行 X 线检查, 结果表明 ACL 断裂患者的胫骨后倾角数值明显大于对照组。Duerr 等^[13]也对 411 例 ACL 断裂患者进行基于 X

基金项目: 内蒙古自治区卫生健康科技计划项目 (202201591)、鄂尔多斯市科技计划项目 (2022YY001)

作者单位: 017000, 内蒙古医科大学鄂尔多斯临床医学院

通信作者: 新苏雅拉图 E-mail: syltu@163.com

线和MRI图像的胫骨后倾角测量,证明了ACL损伤与胫骨后倾角增大显著相关,胫骨后倾角增大患者在初次ACL重建后移植失败的发生风险增加。也有研究表明,胫骨后倾角增加在导致ACL损伤的同时,后外侧与后内侧半月板损伤的风险也增加^[14]。

1.2 股骨髁因素

股骨髁由外侧髁、内侧髁及髁间窝组成。研究表明,股骨外侧髁形状对膝关节旋转稳定性的影响机制是股骨外侧髁深度增加,这会影响股骨相对于胫骨的运动,并导致膝关节负重生物力学改变、韧带松弛和胫骨轴向移位,进一步损伤ACL^[15]。Rougereau等^[16]研究发现,在标准体格检查中,冠状面股骨远端外翻可能主要归因于股骨外侧髁明显发育不全,导致下肢力线异常。股骨外侧髁突比^[17]也是ACL损伤的危险因素之一。多项研究表明,股骨外侧髁突比增加会导致非接触性ACL损伤,存在ACL重建术后移植物失效的风险,股骨外侧髁高度显著降低也会导致股骨外侧髁突比增大,且女性较男性多见,这也是临床中女性轻度膝外翻较多的原因^[17-21]。

Riemer等^[22]研究表明,股骨内侧髁延伸面半径增加会造成下肢生物力学异常,进而导致ACL再损伤。Fabricant等^[23]对平均12.7岁的患儿进行ACL重建,并通过在股骨内侧髁进行骨骺阻滞钢板植入来纠正膝外翻,术后评估结果显示膝外翻矫正后,ACL移植物失效的可能性降低。Ellsworth等^[24]研究表明,骨骺阻滞钢板植入是在股骨远端放置植入物并用张力带固定的半骨骺融合技术,可矫正骨骼发育不成熟导致的双下肢冠状面力线不良,该技术纠正下肢发育畸形的效果较好,降低了ACL、半月板损伤及剥脱性骨软骨炎等的发生率,但存在取出移植物后外翻畸形再次复发的情况。

股骨髁间窝因素也是导致ACL损伤的因素之一。多项研究表明,股骨髁间切迹体积与股骨髁间凹宽度指数等较小可导致ACL损伤风险增加,切迹体积数值在1.5 cm³以下,可能会导致轻度的下肢力线不良,损伤机制可能是ACL与狭窄的髁间窝撞击,导致韧带负荷增加^[25-28]。

1.3 股骨近端及髌骨与足踝因素

股骨前倾角是股骨颈与股骨干之间在矢状面上的角度,较大的股骨前倾角会导致髌关节伸展力矩略短,髌关节外展肌的屈曲力矩增加,引起

股骨内旋,使ACL损伤风险增加^[29]。Machado等^[30]研究发现,髌关节被动屈曲会导致髌骨移动甚至脱位,影响膝关节稳定性。髌骨解剖不稳定会影响膝关节周围韧带,导致膝关节不稳,影响下肢力线,进而增加非接触性ACL损伤的风险。

Burssens等^[31]研究发现,在正常踝关节的基础上,后足外翻畸形表现为膝关节外翻,后足内翻畸形时则表现为膝关节内翻,影响下肢力线。先天性或后天性扁平足常表现为后足外翻,踇外展肌、腓肠肌内侧头、胫骨前肌和股内侧肌活动下降,这会导致胫骨内旋,运动时影响正常步态和平衡,同时增加ACL损伤风险^[32]。准确发现并评估该类患者下肢力线异常,对于预防非接触性ACL损伤具有重要意义。

2 非骨性因素

2.1 神经性因素

神经控制肌肉完成下肢运动,这是相互协调的过程^[33]。神经受损导致本体感觉下降甚至缺失,影响膝关节内的机械感受器,这不仅影响膝关节稳定性,还会影响对神经中枢的反馈,进而导致运动中下肢生物力学改变。研究表明,膝关节感觉传入可以进行肌群之间的调节,膝关节感觉传入损伤可能会使肌肉协调性改变,也可能造成持续的关节内部压力增高,进而导致ACL等结构在运动中因下肢受力不均而引发损伤^[34]。

2.2 股骨机械轴周围因素

下肢肌群是保护膝关节及其周围韧带的重要因素。尸体研究显示,增加股四头肌力可导致ACL断裂的压缩轴向力减少45%^[35]。Boden等^[36]研究表明,充足的股四头肌收缩会减小运动中胫骨上的压力和胫骨前移的剪切力,进而降低导致ACL损伤的冲击力。但另有研究表明,股四头肌紧张产生过大的牵拉力,会增加胫骨前移的剪切力,导致膝关节过伸;在膝关节屈曲20°时,4 500 N的股四头肌力可能导致ACL损伤^[37]。因此,需要准确评估患者股四头肌的紧张度和肌力,避免下肢力线异常。

有研究表明,腘绳肌、股内侧肌、股外侧肌等核心肌群肌力弱,会导致负重运动期间膝关节外翻运动过度,增加非接触性ACL损伤的风险,而经10周核心力量训练后,肌力强化会降低膝关节外翻和髌关节内收角度^[38]。

髂胫束是起自臀大肌、臀中肌和阔筋膜张肌

的纤维组织,止于膝关节股骨外侧髁与胫骨 Gerdy 结节,主要抵抗髌关节内收和膝关节内旋,是下肢重要的稳定器。Ceyssens 等^[39]研究表明,髌胫束综合征患者在跑步时膝关节内旋角度较大,且随着内旋程度增加,髌胫束张力增加,导致髌胫束对股骨外上髁的压力增大。髌胫束可抵抗胫骨相对于股骨的前外侧移位,膝关节屈曲超过 30°时,髌胫束能减少 ACL 损伤膝关节中的胫骨前移,而髌胫束紧张可诱发髌骨外侧移位和胫骨外旋,影响下肢运动^[40]。

2.3 胫骨机械轴周围因素

内侧副韧带复合体损伤不仅会导致膝关节外翻,而且会导致旋转松弛过度,使 ACL 出现损伤或损伤加重,甚至导致 ACL 重建术失败^[41-42],因此须对内侧副韧带复合体损伤做出准确诊断,并进行治疗。腓肌损伤主要影响运动人群,会导致膝关节过伸及胫骨外旋增加等,并导致严重的活动受限,影响下肢力线,增加非接触性 ACL 损伤风险^[43]。

慢性踝关节不稳主要是由于踝关节急性扭伤后未认识到该损伤的严重性而未给予及时治疗,导致踝关节周围韧带及软组织损伤加重,直至踝关节稳定性难以正常维持^[44]。有研究证实,慢性踝关节不稳患者踝内翻的倾向性较大,病理基础为距腓前韧带、跟腓韧带损伤后愈合不良,若增加股四头肌与腓绳肌的激活比率,激活腓侧肌群,则可以减少落地时膝关节异常负荷。Jeon 等^[45]研究认为,慢性踝关节不稳患者在运动中与地面反作用力的改变和异常的肌肉激活与 ACL 损伤可能存在关联。

3 结语

下肢力线异常是非接触性 ACL 损伤重要的危险因素之一。ACL 损伤后,修复与重建 ACL 是主要的治疗方式,但忽视下肢力线评估,不仅会导致 ACL 初次损伤,而且存在 ACL 修复或重建术失败的风险。随着医学的发展与医疗的进步,临床中逐渐加强了对下肢力线评估的重视程度。下肢生物力线评估与恢复在下肢损伤中的明确作用将是未来研究的重点。

参考文献

[1] Kamath AF, Israelite C, Horneff J, et al. Editorial: what is varus or valgus knee alignment?: a call for a uniform radiographic

classification[J]. Clin Orthop Relat Res, 2010, 468(6): 1702-1704.

[2] 唐承杰, 贾军锋, 张挥武. 基于 CT 数据的三维重建技术测量膝关节炎症患者下肢力线及 3D 打印导板技术在膝关节置换中的应用研究[J]. 中华骨与关节外科杂志, 2022, 15(12): 932-938.

[3] Ahrend MD, Baumgartner H, Ihle C, et al. Influence of axial limb rotation on radiographic lower limb alignment: a systematic review[J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2022, 142(11): 3349-3366.

[4] Duthon VB, Barea C, Abrassart S, et al. Anatomy of the anterior cruciate ligament[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2006, 14(3): 204-213.

[5] Buoncristiani AM, Tjoumakaris FP, Starman JS, et al. Anatomic double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction[J]. Arthroscopy, 2006, 22(9): 1000-1006.

[6] Ball S, Stephen JM, El-Daou H, et al. The medial ligaments and the ACL restrain anteromedial laxity of the knee[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2020, 28(12): 3700-3708.

[7] Kohn L, Rembeck E, Rauch A. Anterior cruciate ligament injury in adults : diagnostics and treatment[J]. Orthopade, 2020, 49(11): 1013-1028.

[8] Benner RW, Shelbourne KD, Gray T. The degree of knee extension does not affect postoperative stability or subsequent graft tear rate after anterior cruciate ligament reconstruction with patellar tendon autograft[J]. Am J Sports Med, 2016, 44(4): 844-849.

[9] Chang R, Chen A, Li X, et al. K-space data reconstruction algorithm-based MRI diagnosis and influencing factors of knee anterior cruciate ligament injury[J]. Contrast Media Mol Imaging, 2022, 2022: 1711456.

[10] Ikawa MH, Yamada AF, da Rocha Corrêa Fernandes A, et al. Relationship between anterior cruciate ligament rupture and the posterior tibial and meniscal slopes in professional soccer athletes[J]. Skeletal Radiol, 2021, 50(10): 2041-2047.

[11] Hohmann E, Tetsworth K, Glatt V, et al. Increased posterior slope of the medial and lateral meniscus posterior horn is associated with anterior cruciate ligament injuries[J]. Arthroscopy, 2022, 38(1): 109-118.

[12] Brandon ML, Haynes PT, Bonamo JR, et al. The association between posterior-inferior tibial slope and anterior cruciate ligament insufficiency[J]. Arthroscopy, 2006, 22(8): 894-899.

[13] Duerr R, Ormseth B, Adelstein J, et al. Elevated posterior tibial slope is associated with anterior cruciate ligament reconstruction failures: a systematic review and meta-analysis[J]. Arthroscopy, 2023, 39(5): 1299-1309.

[14] Bernholt D, DePhillipo NN, Aman ZS, et al. Increased posterior tibial slope results in increased incidence of posterior lateral meniscal root tears in ACL reconstruction patients[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2021, 29(11): 3883-3891.

[15] Pfeiffer TR, Burnham JM, Kanakamedala AC, et al. Distal femur morphology affects rotatory knee instability in patients with anterior cruciate ligament ruptures[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2019, 27(5): 1514-1519.

[16] Rougureau G, Pujol N, Langlais T, et al. Is lateral femoral condyle hypoplasia a feature of genu valgum? A morphological computed tomography study of 200 knees[J]. Orthop Traumatol Surg Res, 2023,

- 109(4): 103582.
- [17] He M, Li J. Increased lateral femoral condyle ratio measured by MRI is associated with higher risk of noncontact anterior cruciate ligament injury[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2022, 23(1): 190.
- [18] Fernandes MS, Pereira R, Andrade R, et al. Is the femoral lateral condyle's bone morphology the trochlea of the ACL?[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2017, 25(1): 207-214.
- [19] Li K, Zheng X, Li J, et al. Increased lateral femoral condyle ratio is associated with greater risk of ALC injury in non-contact anterior cruciate ligament injury[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2021, 29(9): 3077-3084.
- [20] Jeon N, Choi NH, Hwangbo BH, et al. An increased lateral femoral condyle ratio in addition to increased posterior tibial slope and narrower notch index is a risk factor for female anterior cruciate ligament injury[J]. Arthroscopy, 2022, 38(5): 1597-1604.
- [21] Choi NH, Lee DM, Shin HJ, et al. Combined anterolateral ligament and anterior cruciate ligament injury is associated with increased lateral femoral condyle ratio[J]. Arthroscopy, 2023, 39(5): 1235-1241.
- [22] Riemer L, Dargel J, Schäferhoff P, et al. Femoral condyle configuration and its impact on anterior cruciate ligament reconstruction[J]. Technol Health Care, 2023, 31(5): 1607-1617.
- [23] Fabricant PD, Chipman DE, Pascual-Leone N, et al. Simultaneous anterior cruciate ligament reconstruction and implant-mediated guided growth to correct genu valgum in skeletally immature patients[J]. J ISAKOS, 2023, 8(3): 184-188.
- [24] Ellsworth BK, Aitchison AH, Fabricant PD, et al. Use of implant-mediated guided growth with tension band plate in skeletally immature patients with knee pathology: a retrospective review[J]. HSS J, 2022, 18(3): 399-407.
- [25] Barnum MS, Boyd ED, Vacek P, et al. Association of geometric characteristics of knee anatomy (alpha angle and intercondylar notch type) with noncontact ACL injury[J]. Am J Sports Med, 2021, 49(10): 2624-2630.
- [26] Iriuchishima T, Goto B, Fu FH. Truncated-pyramid shape simulation for the measurement of femoral intercondylar notch volume can detect the volume difference between ACL-injured and intact subjects[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2021, 29(6): 1709-1713.
- [27] Jha V, Azam MQ, Jain P, et al. Does femoral intercondylar notch volume differ in anterior cruciate ligament-injured adult patients compared to the uninjured?: a meta-analysis[J]. Clin Orthop Surg, 2022, 14(1): 76-89.
- [28] Rollet ME, Knafo Y, Granger B, et al. Femoral intercondylar notch: accuracy of a novel MRI measurement protocol[J]. Orthop Traumatol Surg Res, 2022, 108(3): 103238.
- [29] Scorcelletti M, Reeves ND, Rittweger J, et al. Femoral anteversion: significance and measurement[J]. J Anat, 2020, 237(5): 811-826.
- [30] Machado EM, Rapello F, Ocarino JM, et al. Influence of lower limb torque, range of motion, and foot alignment in patellar rotation (Arno angle) in athletes[J]. Braz J Phys Ther, 2022, 26(3): 100414.
- [31] Burssens ABM, Buedts K, Barg A, et al. Is lower-limb alignment associated with hindfoot deformity in the coronal plane? A weightbearing CT analysis[J]. Clin Orthop Relat Res, 2020, 478(1): 154-168.
- [32] Kodithuwakku Arachchige SNK, Chander H, Knight A. Flatfeet: biomechanical implications, assessment and management[J]. Foot (Edinb), 2019, 38: 81-85.
- [33] Ippersiel P, Robbins SM, Dixon PC. Lower-limb coordination and variability during gait: the effects of age and walking surface[J]. Gait Posture, 2021, 85: 251-257.
- [34] Alessandro C, Prashara A, Tentler DP, et al. Inhibition of knee joint sensory afferents alters covariation across strides between quadriceps muscles during locomotion[J]. J Appl Physiol(1985), 2023, 134(4): 957-968.
- [35] Wall SJ, Rose DM, Sutter EG, et al. The role of axial compressive and quadriceps forces in noncontact anterior cruciate ligament injury: a cadaveric study[J]. Am J Sports Med, 2012, 40(3): 568-573.
- [36] Boden BP, Sheehan FT. Mechanism of non-contact ACL injury: OREF Clinical Research Award 2021[J]. J Orthop Res, 2022, 40(3): 531-540.
- [37] Yu B, Garrett WE. Mechanisms of non-contact ACL injuries[J]. Br J Sports Med, 2007, 41 Suppl 1(Suppl 1): i47-i51.
- [38] Jeong J, Choi DH, Shin CS. Core strength training can alter neuromuscular and biomechanical risk factors for anterior cruciate ligament injury[J]. Am J Sports Med, 2021, 49(1): 183-192.
- [39] Ceyssens L, Vanelderen R, Barton C, et al. Biomechanical risk factors associated with running-related injuries: a systematic review[J]. Sports Med, 2019, 49(7): 1095-1115.
- [40] Hutchinson LA, Lichtwark GA, Willy RW, et al. The iliotibial band: a complex structure with versatile functions[J]. Sports Med, 2022, 52(5): 995-1008.
- [41] Willinger L, Balendra G, Pai V, et al. High incidence of superficial and deep medial collateral ligament injuries in 'isolated' anterior cruciate ligament ruptures: a long overlooked injury[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2022, 30(1): 167-175.
- [42] Miyaji N, Holthof SR, Ball SV, et al. Medial collateral ligament reconstruction for anteromedial instability of the knee: a biomechanical study in vitro[J]. Am J Sports Med, 2022, 50(7): 1823-1831.
- [43] Zabrzýński J, Huri G, Yataganbaba A, et al. Current concepts on the morphology of popliteus tendon and its clinical implications[J]. Folia Morphol (Warsz), 2021, 80(3): 505-513.
- [44] Miklovic TM, Donovan L, Protzuk OA, et al. Acute lateral ankle sprain to chronic ankle instability: a pathway of dysfunction[J]. Phys Sportsmed, 2018, 46(1): 116-122.
- [45] Jeon HG, Lee SY, Park SE, et al. Ankle instability patients exhibit altered muscle activation of lower extremity and ground reaction force during landing: a systematic review and meta-analysis[J]. J Sports Sci Med, 2021, 20(2): 373-390.

(收稿日期 : 2023-11-13)

(本文编辑 : 卢千语)