

半月板形态学与前交叉韧带损伤相关性的研究进展

朱宇睿*, 刘 阳, 秦海龙, 孙学斌#

新疆医科大学第一附属医院运动医学科, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2024年2月14日; 录用日期: 2024年3月9日; 发布日期: 2024年3月18日

摘 要

综述半月板形态学参数对非接触性前交叉韧带损伤的影响和研究进展, 回顾近年有关半月板形态学对前交叉韧带损伤影响的研究文献, 从半月板的生物力学特征、各形态学参数对ACL损伤影响、半月板形态学影响ACL损伤的可能机制等方面进行总结。半月板形态可以矫正胫骨平台后倾角, 减小ATT, 对非接触性ACL损伤及ACLR术后移植物失效存在影响, 并具有较高的预测价值。半月板形态学参数有助于识别前交叉韧带损伤的高危人群, 帮助制定手术策略, 但目前对前交叉韧带损伤的影响机制仍缺乏确切的临床证据, 未来需要进一步研究。

关键词

前交叉韧带损伤, 半月板, 半月板斜率, 半月板后角高度, 半月板骨角, 胫骨平台后倾角 - 半月板骨角比值

Research Progress on the Correlation between Meniscal Morphology and Anterior Cruciate Ligament Injury

Yurui Zhu*, Yang Liu, Hailong Qin, Xuebin Sun#

Department of Sports Medicine, The First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi Xinjiang

Received: Feb. 14th, 2024; accepted: Mar. 9th, 2024; published: Mar. 18th, 2024

*第一作者。
#通讯作者。

文章引用: 朱宇睿, 刘阳, 秦海龙, 孙学斌. 半月板形态学与前交叉韧带损伤相关性的研究进展[J]. 临床医学进展, 2024, 14(3): 492-498. DOI: 10.12677/acm.2024.143729

Abstract

Review the impact and research progress of meniscal morphological parameters on non-contact anterior cruciate ligament injury, review the research literature on the impact of meniscal morphology on anterior cruciate ligament injury in recent years, from the biomechanical characteristics of meniscus, various morphology The impact of scientific parameters on ACL injury and the possible mechanisms by which meniscal morphology affects ACL injury were summarized. Meniscal morphology can correct the posterior inclination of the tibial plateau, reduce ATT, has an impact on non-contact ACL injury and graft failure after ACLR, and has a high predictive value. Meniscal morphological parameters can help identify high-risk groups for anterior cruciate ligament injury and help formulate surgical strategies. However, there is still a lack of definite clinical evidence on the influencing mechanism of anterior cruciate ligament injury, and further research is needed in the future.

Keywords

Anterior Cruciate Ligament Injury, Meniscus, Meniscal Slope, Meniscal Posterior Angle Height, Meniscal Bone Angle, Lateral Tibial Plateau Slope-Meniscal Bone Angle Ratio

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

非接触性前交叉韧带损伤是膝关节最常见的运动损伤之一, 研究表明膝关节解剖变异是前交叉韧带损伤的主要危险因素。先前的研究大多将骨性结构的解剖如股骨和胫骨作为研究重点, 如胫骨平台后倾角与 ACL 损伤的关系已得到验证。目前有认为半月板形态学参数同样对前交叉韧带损伤存在影响。本文就半月板形态学参数对非接触性前交叉韧带损伤及前交叉韧带重建术后移植物的影响进行综述。

前交叉韧带(ACL)损伤是膝关节损伤中最常见的韧带损伤, 在健康的运动人群中, 原发性前交叉韧带损伤的发生率约为每年 1.5%至 1.7%, 其中 70%以上是非接触性损伤[1] [2] [3]。了解膝关节生物力学对预防和治疗前交叉韧带损伤并防止前交叉韧带翻修起到至关重要的作用。除了神经肌肉控制和其他生理因素, 膝关节的几何形状, 例如胫骨平台后倾角和半月板形态学已被证明为前交叉韧带损伤的影响因素[4] [5]。目前胫骨平台后倾角对前交叉韧带损伤的研究已经比较深入, 但半月板形态学对前交叉韧带损伤的影响尚不明确, 且各项研究采用的半月板形态学参数及测量方式存在差异, 各项形态学参数对 ACL 损伤的影响缺少比较, 同时国内半月板形态学与 ACL 损伤的相关性的研究报道较少。本综述总结了目前国内关于半月板形态学参数与 ACL 损伤的相关性研究成果及各参数特点, 旨在明确半月板形态学对于 ACL 损伤的影响, 为有效预防 ACL 损伤及翻修提供依据。

2. 半月板形态学的生物力学特征及临床意义

半月板作为股骨髁和胫骨平台之间的半月状的楔形结构[6]。被认为是对膝关节前后平移和旋转稳定性上起到重要作用的约束装置, 内侧半月板切除会导致胫骨前后平移增加, 而外侧半月板切除会导致 ACL 缺陷的膝关节旋转不稳定[7] [8] [9]。

目前的研究已证明, 胫骨平台后倾角(Posterior Tibial Slope, PTS)增大是 ACL 损伤的危险因素, 机制

表现为在负重情况下, 胫骨平台后倾角的增大会导致胫骨前移(ATT)增大, 从而导致 ACL 受力和变形增大[10] [11] [12]。进一步的研究证明了外侧间室胫骨平台后倾角对内侧间室的影响, 及如何促进胫骨内旋时股骨的相对外旋, 从而进一步增大 ACL 的受力与变形[13]。有研究认为在这种机制中, 由于半月板完成了减震、负载分配和被动稳定等重要任务, 因此在评估胫骨平台后倾角对 ACL 的影响时应将其考虑在内[14]。且在 MRI 上测量时, 半月板产生的倾斜度比骨性胫骨倾斜度更水平[15]。因此, 半月板坡度的评估受到了极大的关注, 有研究认为它可以更准确地反映股骨髁和胫骨表面之间的关系[16]。

半月板的楔形结构增加了胫骨平台的深度, 并在负重和运动状态中维持圆形股骨关节面与平坦的胫骨关节面的关系[17]。两个半月板的后角比前角更厚[14]。这种形态学特征被认为有助于对抗胫骨平台后倾[15]。半月板的后角可以起到类似于“门楔子”或者“减速带”作用, 阻挡胫骨前移, 减少 ATT, 且外侧半月板在膝关节旋转稳定性中起着重要作用, 阻碍胫骨上股骨外侧髁的后平移运动, 减少相对旋转, 会极大地影响 ACL 损伤机制[1] [4] [18]。半月板的主要功能是在胫骨和股骨之间分配和传递压力[19]。研究观察到内侧半月板后角的在 ACL 损伤情况下所受压力和环张力明显增加, 而前角没有变化, 这被考虑为内侧半月板的后角提供了限制 ATT 的物理屏障[20]。在一项尸体研究中, 切除内侧半月板三分之一、三分之二或整个后角后, ATT 增加了 0.1 毫米, 轻微切除增加了 0.1 毫米, 大部分切除增加了 0.5 毫米, 全切除增加了 1.1 毫米[21]。对于外侧半月板后角, 研究证明撕裂增加了膝关节前向不稳定[22] [23]。因此任何减少半月板后角“门楔子”效应的因素都可以被考虑为 ACL 损伤的潜在危险因素。

3. 半月板形态学参数及其影响

3.1. 半月板斜率(Meniscal Slope, MS)

半月板斜率(MS)被定义为矢状面 MRI 上关节内半月板前角顶点和半月板后角顶部切点与胫骨近端解剖轴垂线的夹角, 用于描述半月板前-后角顶点平面的倾斜度[24]。在文献中也常被称为软组织倾斜角或者软组织斜率(Soft Tissue Slope, STS) [25] [26]。半月板斜率在 MRI 上根据测量平面可分为外侧半月板斜率(Lateral Meniscal Slope, LMS)和内侧半月板斜率(Medial Meniscal Slope, MMS)。多数研究表明半月板后角比前角厚, 半月板斜率几乎垂直于胫骨近端解剖轴, 可以抵消 PTS 的后倾, 半月板斜率被认为能比胫骨平台后倾角更好地反应膝关节的运动及稳定性[27]。

多数研究显示病例组与对照组 MS 存在显著差异, 病例组 MS 显著大于对照组, 并认为 MS 增大是 ACL 损伤的危险因素[17] [24] [25] [26] [27]。但 Hudek 等人[24]的研究表明未见内侧半月板斜率(MMS)增加与 ACL 损伤风险增大相关。有研究发现外侧胫骨平台后倾角(Lateral Tibial Slope, LTS)显著高于内侧, 而 MMS 却高于外侧半月板斜率(LMS), 这被认为 MS 有将 PTS 向水平方向矫正的作用, 即抵消 PTS 后倾, 在半月板后角损伤时作用失效[17] [26]。

Freitas 等人[27]在 605 名骨骼未发育成熟患者中研究发现 ACL 损伤患者及 ACL 重建失败患者的 LMS、MMS 均显著高于 ACL 未损伤患者, 但并未确定半月板斜率与 ACL 重建失败的关系。

3.2. 半月板后角高度

半月板软骨高度(Meniscus-Cartilage Height, MCH)被定义为 MRI 矢状面上关节内半月板后角上表面最高点到下表面关节软骨表面的垂直距离[28]。也有文献将其定义为半月板后角高度(meniscus posterior horn height) [29]。MCH 的测量同样区分内外侧。有研究表明半月板后角高度降低是非接触性 ACL 损伤的危险因素[28] [29]。内、外侧半月板高度对不同性别 ACL 损伤的影响存在争议。Sturnick 等人[28]的研究发现外侧半月板与内侧半月板后角高度均为女性非接触性 ACL 损伤的保护因素, 对损伤组与对照组进行单变量及纳入 MRI 检查时股骨相对胫骨位置、体重和 BMI 的多变量 logistic 回归分析后的研究结论为:

MCH 与女性非接触性 ACL 损伤独立相关, 半月板后角高度每降低 1 mm, ACL 损伤风险增加 144%, 而在男性中未发现 MCH 与 ACL 损伤的关联。而 Unal 等人[29]研究则显示内侧半月板后角高度降低(外侧半月板宽度增加)是男性 ACL 损伤的独立危险因素。Sturnick 等人[4]的另一项研究发现将男性与女性作为联合组进行分析时, 外侧间室中部软骨斜率、外侧半月板软骨高度与前交叉韧带出口平面股骨髁间窝宽度与前交叉韧带损伤风险共同相关。

研究证明半月板后角高度降低是 ACL 重建术后移植物失效的危险因素[30] [31]。Tamimi 等[30]的研究结论是: 外侧半月板高度和外侧胫骨平台前后距离对 ACL 重建术后移植物失效具有最佳预测价值, 优于半月板斜率及胫骨平台后倾角; 与外侧半月板高度高于 6.0 毫米的患者相比, 外侧半月板高度低于 6.0 毫米的患者发生 ACL 重建失败的风险是其 5.1 倍。一项为期 5.5 年的以美国高中和大学生运动员为研究对象前瞻性病例对照研究的结果显示, 内侧半月板后角高度降低是女性患者 ACL 重建术后移植物损伤的危险因素, 且为女性患者首次 ACL 损伤的共同危险因素, 内侧半月板后角高度每增加 1 mm, ACL 移植物断裂风险下降 91% [31]。

3.3. 半月板骨角

半月板骨角(Menisacal Bone Angle, MBA) [4]定义为半月板后角上表面切线与对应胫骨平台软骨下骨表面切线的夹角, 可分为内侧半月板骨角(Medialmeniscus Bone Angle, LMBA)和外侧半月板骨角(Lateral Meniscus Bone Angle, LMBA)。在一项研究对象为美国高中和大学运动员的前瞻性队列研究中, 发现 LMBA 与男性 ACL 损伤风险独立相关, LMBA 每减少 1°, 男性 ACL 损伤风险增加 23%, LMBA 与女性 ACL 损伤的关系则不具备统计学意义[4]。而在他们的另一项研究中发现外侧半月板后角减小与女性非接触性 ACL 损伤风险升高相关[28]。Hohmann 等人分别测量内外侧胫骨平台 25%、50%、75%共 6 个层面的 MBA、胫骨平台后倾角(Posterior Tibial Slope, PTS)及胫骨 - 半月板后角界面斜率(MBA + PTS)并进行研究, 内、外侧 MBA 降低与男、女性的 ACL 损伤风险升高均相关, 且在 6 个测量平面上, ACL 损伤患者 MBA + PTS 显著较低。Teixeira 等人[32]的研究证实 MBA 是 ACL 损伤的保护因素, MBA < 22°考虑与 ACL 损伤风险增大相关, 且 MBA 是 ACL 损伤的最强预测指标, 优于胫骨平台后倾角及 LTPS/MBA。关于 MBA 对于 ACL 重建术后移植物的影响, 一项随访时间为至少 4 年的前瞻性队列研究发现 MBA 每降低 1°, ACLR 移植物失效风险上升 22.3%, 且与 ACLR 移植物所采用的隧道定位技术无关(经胫骨定位股骨隧道或经股骨定位股骨隧道) [18]。

3.4. 多重危险因素组合对 ACL 损伤的影响

有研究认为胫骨平台后倾角增大同时合并外侧半月板骨角减小对 ACL 损伤的影响比单独的外侧半月板减小更大, 即 LPTS-MBA 比值, 外侧半月板骨角与外侧胫骨平台后倾角的比值[33]。在文献中也称作 LTS:LMBA。一项研究对象为 17 岁以下儿科非接触性 ACL 损伤患者的回顾性病例对照研究中发现, 发现 LMBA 在病例组与对照组间未见显著差异, 而 LTS:LMBA 比值显著均高于 ACLI 患者(0.46:0.26), 且对前交叉韧带损伤的预测价值最为显著, 高于 LTS、LMBA 及 LTS-MTS (横向胫骨平台斜率差) [33]。在一项前瞻性队列研究中发现 LTPS-MBA 比值有助于预测 ACLR 术后移植物失效风险, LTPS-MBA 比值低于 0.27 时, ACL 重建失败的风险为 28%, 高于 0.42 时, ACL 重建失败的风险为 82%, LPTS-MBA 比值可以比 LPTS 更准确地帮助预测 ACL 重建后移植物失效的风险[18]。

4. 半月板形态学参数影响非接触性 ACL 损伤的可能机制

Freitas 等人[27]推测 PTS 的运动学效应可能会受到半月板的影响, 由于半月板后角比前角厚, 半月

板斜率几乎垂直于胫骨纵轴,可以抵消 PTS 的后倾,因此认为半月板斜率可以比 PTS 更好地反映解剖变量变化时的膝关节运动学和前外侧稳定性变化。Hudek 等人[24]认为 MS 减少可能代表胫骨前外侧平移受到限制,而 MS 增加可能会增加 ACL 受伤风险。

而 Sturnick 等人[28]则进一步认为半月板后角的几何形态可能在半月板斜率与 ACL 损伤的关系中起主要作用。其基本原理是半月板后角在膝关节屈曲过程中传递更高的压力[34]。外侧半月板后骨角的减小可能与作用于胫骨的前向剪切力的阻力减小相关,从而使胫骨的相对前移增加,ACL 所受拉伸负荷增大[4]。半月板几何形状是 ACL 损伤的更强的独立预测因子,而不仅仅是底层软骨下骨平面角度的反应[28]。

由于 LTPS 与 LMBA 均可能显著影响 ACL 及 ACLR 术后移植物所受拉伸负荷,且二者之间为见显著相关性,并且能在同一张 MRI 上获得高可靠性的测量结果,因此 Sauer S.等人[18]提出 LTPS-MBA 比值可能比实际角度值更具有价值。Edwards 等人[33]当汽车(外侧股骨髁)从山坡(外侧胫骨平台后倾角)上滑下经过减速带(外侧半月板后骨角)时,陡峭的山坡(高 LTPS)与平浅的减速带(低 MBA)组合是汽车最容易通过减速带的情况,即高 LTPS-MBA 比值高度预测 ACL 撕裂,尽管研究中未发现 MBA 存在显著的组间差异,这一机制可能由单独的 LTPS 差异驱动,但 LTPS-MBA 比值的预测价值显著高于 LTPS,这可能表明情况并非如此。

5. 半月板形态学的临床应用与展望

半月板形态学参数可作为 ACL 损伤或 ACLR 移植物失效高危人群识别的筛查指标,被确定有高危因素的个体,尤其是高运动水平人群,可以通过减少损伤暴露,如减少比赛时间、改变休赛期训练计划(强调技能训练而非比赛参与)、针对性适用神经肌肉训练计划或者适用有助于减少膝关节负荷的运动辅助设备,来减少 ACL 损伤的风险。同时有高危因素的 ACL 已损伤人群在接受 ACL 重建手术前将会被告知有更高移植物失效的风险,这将有助于术后康复计划和重返运动协议的制定,保护术后移植物。

半月板形态学参数的变化可以帮助制定并完善手术术式,如胫骨平台后倾角过大的患者可以通过胫骨高位截骨术(High Tibial Osteotomy, HTO)来进行干预,当半月板后角失去功能时,行类似手术进行干预,建立新的术中切除、保留或重建半月板的标准。且由于半月板形态被认为可以纠正胫骨平台后倾,目前临床上行 HTO 联合 ACL 重建的阈值及 HTO 矫正度数的多少是否过激,需将半月板形态学纳入研究后进一步确认。半月板形态学对 ACL 术后残留旋转不稳定的影响同样需要进一步研究,识别患者是否需要进一步前外侧关节囊重建。

多种半月板形态学参数已被证明与 ACL 损伤相关,其与 ACL 损伤的因果关系及膝关节动态状态下半月板形态学对 ACL 的影响仍需进一步研究。目前研究对 ACL 损伤的预防、治疗及术后康复具有重要价值,以此为基础将给临床治疗与预防提供更完善的方案。

参考文献

- [1] Getgood, A.M., Lording, T., Corbo, G., *et al.* (2016) The Synergistic Role of the Lateral Meniscus Posterior Root and the ALL in Providing Anterolateral Rotational Stability of the Knee. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, **4**. <https://doi.org/10.1177/2325967116S00144>
- [2] Griffin, L.Y., Agel, J., Albohm, M.J., *et al.* (2000) Noncontact Anterior Cruciate Ligament Injuries: Risk Factors and Prevention Strategies. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, **8**, 141-150. <https://doi.org/10.5435/00124635-200005000-00001>
- [3] Wetters, N., Weber, E.A., Wuerz, H.T., *et al.* (2016) Mechanism of Injury and Risk Factors for Anterior Cruciate Ligament Injury. *Operative Techniques in Sports Medicine*, **24**, 2-6. <https://doi.org/10.1053/j.otsm.2015.09.001>
- [4] Sturnick, D.R., Vacek, P.M., Desarno, M.J., *et al.* (2015) Combined Anatomic Factors Predicting Risk of Anterior Cruciate Ligament Injury for Males and Females. *The American Journal of Sports Medicine*, **43**, 839-847. <https://doi.org/10.1177/0363546514563277>

- [5] Hudek, R., Schmutz, S., Regenfelder, F., *et al.* (2009) Novel Measurement Technique of the Tibial Slope on Conventional MRI. *Clinical Orthopaedics & Related Research*, **467**, 2066-2072. <https://doi.org/10.1007/s11999-009-0711-3>
- [6] Makris, E.A., Hadidi, P. and Athanasiou, K.A. (2011) The Knee Meniscus: Structure-Function, Pathophysiology, Current Repair Techniques, and Prospects for Regeneration. *Biomaterials*, **32**, 7411-7431. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2011.06.037>
- [7] Levy, I.M., Torzilli, P.A., Gould, J.D. and Warren, R.F. (1989) The Effect of Lateral Meniscectomy on Motion of the Knee. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, **71**, 401-406. <https://doi.org/10.2106/00004623-198971030-00014>
- [8] Levy, I.M., Torzilli, P.A. and Warren, R.F. (1982) The Effect of Medial Meniscectomy on Anterior-Posterior Motion of the Knee. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, **64**, 883-888. <https://doi.org/10.2106/00004623-198264060-00011>
- [9] Musahl, V., Citak, M., O'Loughlin, P.F., Choi, D., Bedi, A. and Pearle, A.D. (2010) The Effect of Medial versus Lateral Meniscectomy on the Stability of the Anterior Cruciate Ligament Deficient Knee. *The American Journal of Sports Medicine*, **38**, 1591-1597. <https://doi.org/10.1177/0363546510364402>
- [10] Bernhardson, A.S., Aman, Z.S., Dornan, G.J., *et al.* (2019) Tibial Slope and Its Effect on Force in Anterior Cruciate Ligament Grafts: Anterior Cruciate Ligament Force Increases Linearly as Posterior Tibial Slope Increases. *The American Journal of Sports Medicine*, **47**, 296-302. <https://doi.org/10.1177/0363546518820302>
- [11] Bates, N.A., Mejia Jaramillo, M.C., Vargas, M., *et al.* (2019) External Loads Associated with Anterior Cruciate Ligament Injuries Increase the Correlation between Tibial Slope and Ligament Strain during *in Vitro* Simulations of *in Vivo* Landings. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, **61**, 84-94. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2018.11.010>
- [12] Shelburne, K.B., Kim, H.J., Sterett, W.I. and Pandy, M.G. (2011) Effect of Posterior Tibial Slope on Knee Biomechanics during Functional Activity. *Journal of Orthopaedic Research*, **29**, 223-231. <https://doi.org/10.1002/jor.21242>
- [13] Simon, R.A., Everhart, J.S., Nagaraja, H.N. and Chaudhari, A.M. (2010) A Case-Control Study of Anterior Cruciate Ligament Volume, Tibial Plateau Slopes and Intercondylar Notch Dimensions in ACL-Injured Knees. *Journal of Biomechanics*, **43**, 1702-1707. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.02.033>
- [14] Cinotti, G., Sessa, P., Ragusa, G., *et al.* (2013) Influence of Cartilage and Menisci on the Sagittal Slope of the Tibial Plateaus. *Clinical Anatomy*, **26**, 883-892. <https://doi.org/10.1002/ca.22118>
- [15] Lustig, S., Scholes, C.J., Balestro, J.C. and Parker, D.A. (2013) *In Vivo* Assessment of Weight-Bearing Knee Flexion Reveals Compartment-Specific Alterations in Meniscal Slope. *Arthroscopy*, **29**, 1653-1660. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2013.07.260>
- [16] Lustig, S., Scholes, C.J., Leo, S.P., Coolican, M. and Parker, D.A. (2013) Influence of Soft Tissues on the Proximal Bony Tibial Slope Measured with Twodimensional MRI. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, **21**, 372-379. <https://doi.org/10.1007/s00167-012-1990-x>
- [17] Elmansori, A., Lording, T., Dumas, R., Elmajri, K., Neyret, P. and Lustig, S. (2017) Proximal Tibial Bone and Meniscal Slopes Are Higher in ACL Injured Subjects than Controls: A Comparative MRI Study. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, **25**, 1598-1605. <https://doi.org/10.1007/s00167-017-4447-4>
- [18] Sauer, S., English, R. and Clatworthy, M. (2018) The Ratio of Tibial Slope and Meniscal Bone Angle for the Prediction of ACL Reconstruction Failure Risk. *The Surgery Journal (NY)*, **4**, E152-E159. <https://doi.org/10.1055/s-0038-1668111>
- [19] Mow, V.C., Gu, W.Y. and Chen, F.H. (2005) Structure and Function of Articular Cartilage and Meniscus. In: Mow, V.C. and Huiskes, R., Eds., *Basic Orthopaedic Biomechanics and Mechano-Biology*, 3rd Edition, Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 181-258.
- [20] Guess, T.M. and Razu, S. (2017) Loading of the Medial Meniscus in the ACL-Deficient Knee: A Multibody Computational Study. *Medical Engineering & Physics*, **41**, 26-34. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2016.12.006>
- [21] Watanabe, Y., Van Scyoc, A., Tsuda, E., Debski, R.E. and Woo, S.L.Y. (2004) Biomechanical Function of the Posterior Horn of the Medial Meniscus: A Human Cadaveric Study. *Journal of Orthopaedic Science*, **9**, 280-284. <https://doi.org/10.1007/s00776-004-0781-8>
- [22] Tang, X., Marshall, B., Wang, J.H., Zhu, J., Li, J., Smolinski, P. and Fu, F.H. (2019) Lateral Meniscal Posterior Root Repair with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Better Restores Knee Stability. *The American Journal of Sports Medicine*, **47**, 59-65. <https://doi.org/10.1177/0363546518808004>
- [23] Forkel, P., Von Deimling, C., Lacheta, L., *et al.* (2018) Repair of the Lateral Posterior Meniscal Root Improves Stability in an ACL-Deficient Knee. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, **26**, 2302-2309. <https://doi.org/10.1007/s00167-018-4949-8>
- [24] Hudek, R., Fuchs, B., Regenfelder, F. and Koch, P.P. (2011) Is Noncontact ACL Injury Associated with the Posterior Tibial and Meniscal Slope? *Clinical Orthopaedics and Related Research*, **469**, 2377-2384. <https://doi.org/10.1007/s11999-011-1802-5>

- [25] 贺忱, 李方祥. 胫骨平台倾斜角与非接触性前交叉韧带损伤相关性研究[J]. 中国运动医学杂志, 2014, 33(9): 847-854.
- [26] Jenny, J.Y., Rapp, E. and Kehr, P. (1997) Proximal Tibial Meniscal Slope: A Comparison with the Bone Slope. *Revue de Chirurgie Orthopedique et Reparatrice de l'Appareil Moteur*, **84**, 435-438. (In French)
- [27] Freitas, E.V., Perez, M.K., Jimenez, A.E., *et al.* (2021) Higher Meniscal Slope Is a Risk Factor for Anterior Cruciate Ligament Injury in Skeletally Immature Patients. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, **37**, 2582-2588. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2021.03.030>
- [28] Sturnick, D.R., Van Gorder, R., Vacek, P.M., *et al.* (2014) Tibial Articular Cartilage and Meniscus Geometries Combine to Influence Female Risk of Anterior Cruciate Ligament Injury: Articular Geometry and ACL Injury. *Journal of Orthopaedic Research*, **32**, 1487-1494. <https://doi.org/10.1002/jor.22702>
- [29] Unal, M., Kose, O., Aktan, C., Gumussuyu, G., May, H. and Kati, Y.A. (2021) Is There a Role of Meniscal Morphology in the Risk of Noncontact Anterior Cruciate Ligament Rupture? A Case-Control Study. *The Journal of Knee Surgery*, **34**, 570-580. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1713814>
- [30] Tamimi, I., Enrique, D.B., Alaqueel, M., *et al.* (2022) Lateral Meniscus Height and ACL Reconstruction Failure: A Nested Case-Control Study. *The Journal of Knee Surgery*, **35**, 1138-1146. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1722323>
- [31] Levins, J.G., Sturnick, D.R., Argentieri, E.C., *et al.* (2016) Geometric Risk Factors Associated with Noncontact Anterior Cruciate Ligament Graft Rupture. *The American Journal of Sports Medicine*, **44**, 2537-2545. <https://doi.org/10.1177/0363546516657525>
- [32] Teixeira Gonçalves Alves, L.F., Pinto Alves, T.D., Barros, A.S., Lopes Ferreira, F.A. and Pereira Gutierrez, M.A. (2022) Meniscal Bone Angle Is a Strong Predictor of Anterior Cruciate Ligament Injury. *Arthroscopy, Sports Medicine, and Rehabilitation*, **4**, e1993-e2003. <https://doi.org/10.1016/j.asmr.2022.08.008>
- [33] Edwards, T.C., Naqvi, A.Z., Dela Cruz, N., *et al.* (2021) Predictors of Pediatric Anterior Cruciate Ligament Injury: The Influence of Steep Lateral Posterior Tibial Slope and Its Relationship to the Lateral Meniscus. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, **37**, 1599-1609. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2020.12.235>
- [34] Walker, P.S. and Erkman, M.J. (1975) The Role of the Menisci in Force Transmission across the Knee. *Clinical Orthopaedics and Related Research*®, **109**, 184-192. <https://doi.org/10.1097/00003086-197506000-00027>