

单一与综合训练对 ACL 损伤相关膝生物力学指标 Meta 分析

孟文康,刘培阳,郝 莹

(西北师范大学 体育学院,甘肃 兰州 730070)

摘要: **目的** 系统评价运动训练对有运动习惯的健康成年人前交叉韧带损伤相关膝关节生物力学指标的影响。**方法** 检索 CNKI、万方、PubMed 及 Web of Science 数据库,纳入相关随机对照试验,采用 STATA 15.1 与 RevMan 5.4 软件进行 Meta 分析,按训练类型分为单一训练与综合训练亚组。共纳入 17 项研究,248 名受试者。**结果** 运动训练可显著增大触地时膝屈曲角度($MD=5.96, p<0.01$)和峰值膝屈曲角度($MD=2.51, p<0.01$),显著减小触地时膝外翻角度($MD=-0.64, p<0.01$)和峰值膝外翻角度($MD=-1.20, p<0.01$);但对膝外翻力矩($SMD=-0.24, p=0.08$)与垂直地面反作用力($SMD=-0.25, p=0.06$)的改善效果未达统计学水平。亚组分析显示,单一训练与综合训练在各指标的干预效果上均无显著差异。**结论** 运动训练可有效改善前交叉韧带损伤相关膝关节运动学指标,但对动力学指标的改善效果有限,两类训练均可作为健康成年人前交叉韧带损伤预防的有效手段。

关键词: 前交叉韧带损伤;运动训练;运动预防;生物力学;Meta 分析

中图分类号: G804.6 文献标识码: A 文章编号: 1003-983X(2026)04-0066-08

DOI: 10.20185/j.cnki.1003-983X.2026.04.012

A Meta-analysis of Knee Biomechanical Parameters Associated with ACL Injuries: Single- and Combined Training

MENG Wenkang, LIU Peiyang, HAO Ying

(Northwest Normal University, School of Physical Education, Lanzhou Gansu, 730070)

Abstract: **Objective** To conduct a systematic review of the effects of exercise training on knee biomechanical parameters associated with anterior cruciate ligament injuries in healthy adults who regularly exercise. **Methods** Databases including CNKI, Wanfang, PubMed and Web of Science were searched to identify relevant randomised controlled trials. Meta-analyses were conducted using STATA 15.1 and RevMan 5.4 software, with subgroups defined by training type as single-modality training and comprehensive training. A total of 17 studies involving 248 participants were included. **Results** Exercise training significantly increased the knee flexion angle at ground contact ($MD=5.96, p<0.01$) and the peak knee flexion angle ($MD=2.51, p<0.01$), and significantly reduced the knee varus angle at ground contact ($MD=-0.64, p<0.01$) and the peak knee varus angle ($MD=-1.20, p<0.01$); however, the improvements in knee varus moment ($SMD=-0.24, p=0.08$) and vertical ground reaction force ($SMD=-0.25, p=0.06$) did not reach statistical significance. Subgroup analysis revealed no significant differences between single-modality and combined training in the intervention effects across all measures. **Conclusion** Exercise training can effectively improve knee kinematic parameters associated with anterior cruciate ligament injury, but its effects on dynamic parameters are limited; both types of training can serve as effective means of preventing anterior cruciate ligament injury in healthy adults.

Keywords: anterior cruciate ligament injury; exercise training; injury prevention; biomechanics; meta-analysis

收稿日期: 2026-05-15

基金项目: 2026 年甘肃高校研究生“创新之星”项目(2026CXZX-418)。

第一作者简介: 孟文康(2001~),女,山东泰安人,在读硕士,研究方向: 运动生物力学。

通信作者简介: 郝 莹(1984~),女,河南巩义人,博士,教授,研究方向: 运动生物力学, E-mail: haoying@nwnu.edu.cn。

前交叉韧带损伤(Anterior Cruciate Ligament, ACL)是下肢最常见的运动损伤之一^[1],尤其在篮球、足球、手球等涉及急停、变向和跳跃的运动项目中发生率较高^[2]。ACL 损伤不仅导致运动员竞技能力下降、训练中断,还会显著增加创伤后膝关节骨性关节炎的发病风险^[3],给个人和社会带来沉重的医疗与经济负担。目前,ACL 损伤后重建手术周期长、康复效果存在个体差异、术后再损伤率较高^[4],因此,“预防优于治疗”已成为运动医学与运动防护领域的共识。

前交叉韧带损伤的生物力学机制,与膝关节在着地过程中的运动学与动力学特征密切相关。依据时间维度,可将膝关节生物力学指标划分为触地时指标与峰值指标两类。触地时指标反映足触地瞬间的膝关节运动状态,可影响后续力传递路径及膝关节负荷分布。峰值指标除表征整个缓冲阶段关节所受的外部冲力外,还可用于评价下肢整体缓冲效率与神经肌肉控制能力。从具体指标与 ACL 损伤的关联来看,Hewett 等^[5]的前瞻性研究证实,膝外翻力矩可有效预测 ACL 损伤风险,预测敏感度为 73%、特异度为 78%;同时,膝外翻角度的异常增大同样是 ACL 损伤的重要危险因素^[6]。当膝屈曲角度较小时,股四头肌力臂相对偏大,其所产生的胫骨前向剪切力会显著增加,进而加大 ACL 的牵拉负荷并提升损伤风险^[7]。此外,过高的落地地面反作用力与不良动作模式,均会进一步升高 ACL 损伤风险^[8]。将触地时指标与峰值指标结合分析,有助于更全面地揭示 ACL 损伤的生物力学机制,并为开展针对性预防训练干预提供理论依据。

近年来,运动训练被广泛用于 ACL 损伤的预防干预。根据训练内容的差异,可分为单一训练与综合训练两类。单一训练指整个干预方案中仅包含一种训练方式,如力量训练可能通过增强腘绳肌和股四头肌离心力量,增大落地时的膝屈曲角度,延长缓冲时间,从而降低垂直地面反作用力^[9];平衡训练可能通过改善踝膝关节本体感觉,提升落地姿势控制,从而减小触地时膝外翻角度^[10];快速伸缩复合训练可能通过增强肌腱刚度,提高落地缓冲的储能释能效率,从而降低膝外翻力矩和垂直地面反作用力^[11-12];敏捷训练可能通过优化下肢肌肉协调激活模式,从而增大峰值膝屈曲角度并控制膝外翻运动^[13-14]。综合训练则指同一干预方案中同时包含两种或两种以上不同训练方式,可能通过多成分协同干预,从力量、平衡、灵敏和神经肌肉控制多个维度同时发挥作用,从而在多个指标上产生综合改善效果^[15]。尽管已有大量研究表明运动训练能够改善 ACL 损伤相关的生物力学指标,但不同类型训练对各项指标的影响效果尚存在分歧:部分研究认为综合训练在改善膝关节动态对位方面更具优势^[16],而另一些研究则指出单一训练在提升特定力量与缓冲能力方面更为直接^[17]。此外,各研究在结局指标选取、样本特征、训练方案等方面存在较大异质性,导致结论难以直接比较与整合。目前,针对有运动习惯的健康成年人这一人群,尚缺乏系统评价运动训练对 ACL 损伤相关膝关节生物力学指标影响的 Meta 分析,也鲜有研究将单一训练与综合训练进行直接比较。基于此,本研究旨在通过 Meta 分析,系统评价运动训练对具有运动习惯的健康成年人在 ACL 损伤相关膝关节生物力学指标方面的影响,并比较单一训练与综合训练的干预效果差异,以期为 ACL 损伤预防训练方案的优化提供循证支持,推动运动防护实践的科学化与精准化。

1 方法

研究严格遵循《系统综述和 Meta 分析的首选报告条目》指南(PRISMA, Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)^[18],系统评价协议已预先在 PROSPERO 数据库中注册(注册 ID:CRD420261389914)。

1.1 文献检索策略

计算机检索 CNKI、万方、PubMed、Web of Science 四大数

据库,检索时间范围自各数据库建库至 2025 年 12 月。中文检索采用“运动”“训练”“损伤防护”“干预”“前交叉韧带损伤”“前交叉韧带”“下肢生物力学”“生物力学”“运动学”以及“动力学”作为主题词进行组合检索;英文检索以“Exercise”“Anterior Cruciate Ligament Injuries”“Biomechanical Phenomena”为主题词,并结合自由词开展检索。

1.2 文献纳入与排除标准

1.2.1 纳入标准

研究遵循 PICOS 原则,纳入标准:1)研究对象:纳入具备规律运动习惯的健康成年人,要求每周运动至少 3 次、每次不少于 20 min,年龄 18—30 岁;2)干预措施:训练方案旨在预防前交叉韧带损伤;3)结局指标:主要结局指标涉及膝关节生物力学参数;4)研究类型:纳入文献均为随机对照试验。

1.2.2 排除标准

研究排除标准为:1)以非中文或非英文发表的文献;2)动物实验类研究;3)综述类文献或无法获取全文的研究;4)经联系作者仍无法获取全文者;5)未以均值±标准差形式报告结果的文献。

1.3 数据提取

用 EndNote 20 文献管理软件剔除重复文献后,再通过阅读题目、摘要及全文,按照纳入与排除标准进一步筛选,以确保文献筛选过程的规范性与可重复性。在文献筛选过程中,由两名研究者采用独立双盲法进行数据采集。采集内容主要包括:文献作者与发表年份、研究对象基本信息(样本量、性别、年龄)、运动训练方案,以及所关注的结局指标。

1.4 偏倚风险评价

本研究依据 Cochrane 手册 5.1.0 版推荐的随机对照试验偏倚风险评估工具,采用 Review Manager 5.4 软件对纳入文献进行方法学质量评价。评价内容涵盖 6 个条目:随机序列生成、分配隐藏、盲法实施、结局数据完整性、选择性报告偏倚、其他偏倚来源^[19]。综合各条目评价结果,将文献的偏倚风险划分为 3 个等级:低度偏倚(A 级,满足 5 项及以上低风险条目)、中度偏倚(B 级,满足 3 至 4 项低风险条目)、高度偏倚(C 级,满足低风险条目不足 3 项)。

1.5 数据处理

提取纳入 17 篇文献的触地时膝关节屈曲角度、峰值膝关节屈曲角度、触地时膝外翻角、峰值膝外翻角、峰值膝外翻力矩以及垂直地面反作用力共 6 个指标。数据分析工具为 RevMan 5.4 软件和 Stata 15.1 软件。

纳入指标均属于连续性变量。其中,角度类指标(触地时膝关节屈曲角度、峰值膝关节屈曲角度、触地时膝外翻角以及峰值膝外翻角)单位均为度(°),采用均数差(MD)作为效应量进行合并;力矩与力类指标(峰值膝外翻力矩、垂直地面反作用力)因不同文献单位存在差异(N·m、N·m/kg、N/kg、%BW 等),采用标准化均数差(SMD)进行合并,值得注意的是,本研究采用 SMD 合并动力学指标,虽可能消除单位差异,但无法完全消除不同测试动作所固有的生物力学机制差异,这可能是本研究部分指标存在异质性的原因之一。采用 I^2 统计量进行各研究间异质性检验,当 $P < 50\%$ 时,表明各研究间异质性

不显著,采用固定效应模型分析;当 $F \geq 50\%$ 时,表明研究间存在明显异质性,需逐篇剔除文献或进行亚组分析。采用森林图确定效应量合并结果,采用 Egger's 检验评估发表偏倚,检验水准设定为 $\alpha = 0.05$ 。

考虑到不同训练类型对膝关节生物力学指标的影响可能存在差异,本研究根据干预方案的特点,将纳入文献分为单一训练(如抗阻训练、平衡训练、快速伸缩复合训练等)与综合训练(如神经肌肉训练等)2 个亚组,分别进行 Meta 分析,以比较不同训练类型的干预效果。

2 研究结果

2.1 纳入文献基本情况

本研究共从 CNKI、万方、PubMed、Web of Science 4 个数据库检索到相关文献 1 512 篇。依据文献纳入和排除标准,经逐层筛选后,最终纳入中英文文献 17 篇^[13, 20-35]进行分析。文献筛选流程见图 1。

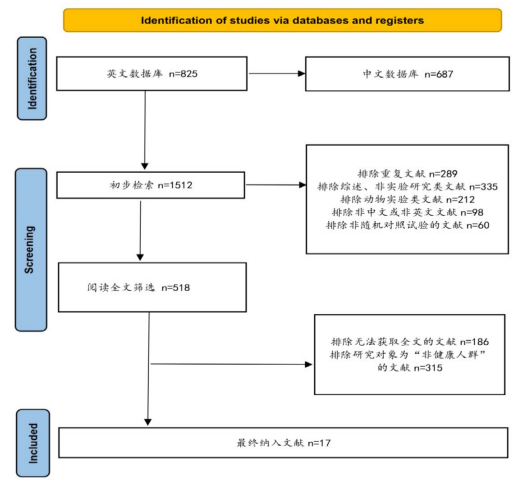


图1 文献筛选流程

纳入的 17 项研究总样本量为 463 例,其中干预组 232 例,对照组 231 例。干预措施共包括 2 种不同的运动类型,文献基本情况如表 1 所示。

表 1 纳入研究文献的基本特征

纳入研究		纳入人数		年龄		干预措施	干预 频次		结局指标
作者	年份	试验组	对照组	试验组	对照组		周期		
Irmischer	2004	14(女14)	14(女14)	24.0±5.0	24.3±4.3	跳跃训练	9	2	峰值垂直地面反作用力
Wilderman	2009	15(女15)	15(女15)	21.07±3.62	21.07±1.83	敏捷训练	6	4	峰值垂直地面反作用力、触地时膝屈曲角、峰值膝屈曲角
Baldon	2014	18(女18)	18(女18)	20.11±1.68	20.17±1.54	快速伸缩复合训练	8	3	峰值膝外翻角、峰值膝屈曲角
Letafatkar	2015	15(女15)	14(女14)	24.32±3.47	24.32±3.47	平衡训练	6	3	触地时膝屈曲角
Staynor	2017	8(女8)	10(女10)	21.1±5.7	19.9±3.2	综合训练	9	2	峰值膝外翻力矩
Popovic	2018	10(未报道)	10(未报道)	25±3	24±2	跳跃训练	6	3	触地时膝外翻角、峰值膝外翻角、峰值膝外翻力矩、峰值垂直地面反作用力
陈	2018	9(女9)	9(女9)	未报道	未报道	力量+快速伸缩复合训练	4	3	峰值垂直地面反作用力
鲁智勇	2019	7(女7)	7(女7)	18.4±1.4	18.8±0.8	改良损伤预防训练	12	4	触地时膝外翻角、峰值膝外翻角、峰值垂直地面反作用力、触地时膝屈曲角、峰值膝屈曲角
Jeong	2020	12(女12)	13(女13)	24.0±2.0	22.0±2.0	力量训练	10	3	触地时膝外翻角、峰值膝外翻角、峰值膝外翻力矩、峰值垂直地面反作用力
Jeong	2021	16(女0)	16(女0)	22.9±2.4	23.1±1.1	力量训练	10	3	触地时膝外翻角、峰值膝外翻角、峰值膝屈曲角
付子艺	2022	15(女15)	15(女15)	21.0±1.8	21.3±2.3	FIFA11+ 训练	6	2	触地时膝外翻角、峰值膝外翻角、峰值膝外翻力矩、峰值垂直地面反作用力、触地时膝屈曲角、峰值膝屈曲角
Ghanati	2022	11(女0)	11(女0)	22.36±2.15	23±0.63	神经肌肉训练	8	2—3	峰值膝外翻角、峰值膝外翻力矩、峰值垂直地面反作用力
Dalvandpour	2023	12(女0)	11(女0)	18.1±0.8	18.1±0.5	综合训练	8	3	触地时膝屈曲角
陈伯承	2024	12(女0)	12(女0)	21.52±2.89	21.71±3.21	快速伸缩复合训练	16	4	峰值膝外翻角、峰值膝外翻力矩、峰值膝屈曲角
Jeong	2025	18(女8)	17(女9)	22.1±1.8	21.9±1.9	力量训练	8	3	触地时膝外翻角、峰值膝外翻角、峰值膝外翻力矩、峰值膝屈曲角
Sheikhi	2025	20(女7)	19(女8)	23.4±2.3	24.1±2.4	综合训练	6	3	峰值膝外翻角、峰值膝外翻力矩、峰值垂直地面反作用力
严由绅	2025	20(女20)	20(女20)	18.95±0.69	19.35±0.67	整合性神经肌肉训练	12	3	触地时膝屈曲角

2.2 纳入研究的质量评价结果

纳入文献的方法学评价结果见图 2 所示,从整体评价结果来看,多数研究在随机序列生成、不完整结局数据以及选择性报告等关键方法学条目上均达到低度偏倚标准,说明纳入

文献在研究设计、数据管理与结果报告等核心环节较为规范。但在受试者与研究者实施盲法的条目上,多数研究存在较高的偏倚风险,这主要与运动干预类研究的自身特点有关,干预措施难以采用双盲设计,属于该领域研究的普遍局限。此外,部分研究在分配隐藏及结局评估者盲法方面信息不够明确,

仍存在一定的不清楚偏倚风险。总体而言,纳入文献整体方法学质量处于中等水平,且在随机化实施、结果数据完整性等核心质量要素上表现稳定,能够为本研究的 Meta 分析提供较为可靠的证据基础。

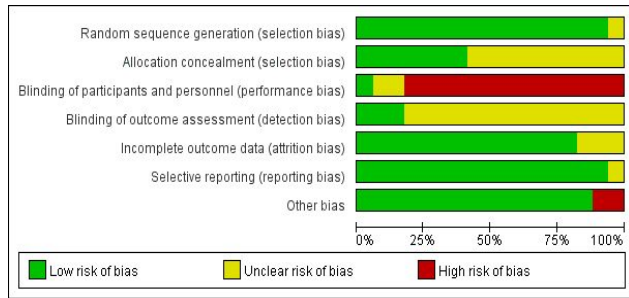


图 2 纳入文献的方法学质量评价各项占比图

2.3 文章偏倚检验

本研究对 6 项膝关节生物力学指标分别进行 Egger's 检验以评估发表偏倚,如图 3 所示,结果显示触地时膝外翻角 ($p=0.151$)、峰值膝外翻角 ($p=0.577$)、峰值膝外翻力矩 ($p=0.471$)、峰值垂直地面反作用力 ($p=0.781$)、触地时膝屈曲角 ($p=0.377$)及峰值膝屈曲角 ($p=0.822$),所有结局指标 p 值均大于 0.05,未检测出明显发表偏倚,结果可信度较高。

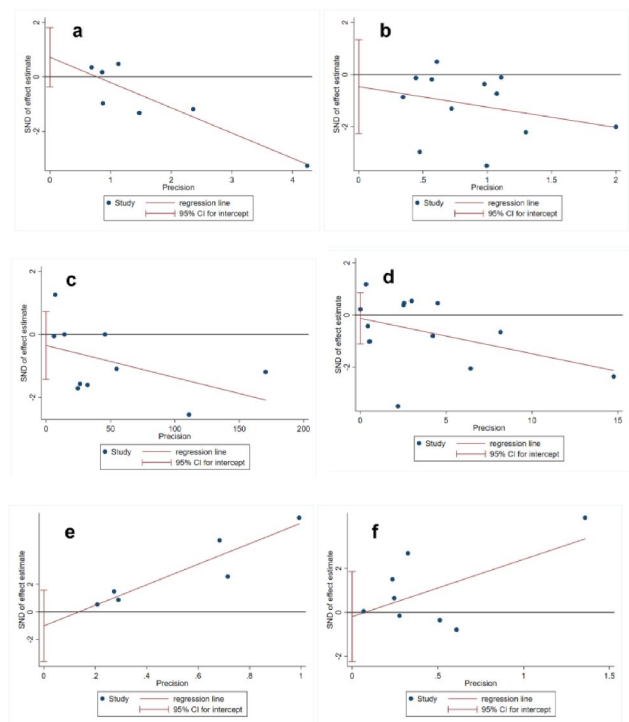


图 3 各结局指标发表偏倚的 Egger's 检验散点图

注:a-f 依次为触地膝外翻角、峰值膝外翻角、峰值膝外翻力矩、垂直地面反作用力、触地膝屈曲角、峰值膝屈曲角。所有指标无明显发表偏倚 ($p>0.05$)。

2.4 Meta 分析结果

2.4.1 运动训练对触地时膝屈曲角的影响

触地时膝屈曲角的 Meta 分析结果如图 4 所示,共纳入 6 项研究,训练组 84 人、对照组 82 人。相关研究结果合并后效

应值: $MD=5.96, 95\% CI: (4.63, 7.29), p<0.01$, 这表示运动训练能够显著增大触地时膝屈曲角度。对各个研究结果进行合并后发现各研究间具有同质性 ($p=0.29, I^2=20\%$)。亚组分析显示:单一训练亚组合并效应值: $MD=6.69, 95\% CI: (4.76, 8.62), p<0.01$, 研究间无异质性 ($p=0.38, I^2=0\%$);综合训练亚组合并效应值: $MD=5.30, 95\% CI: (3.46, 7.13), p<0.01$, 研究间异质性较低 ($p=0.22, I^2=32\%$);亚组差异检验显示两类训练的干预效果无统计学差异 ($p=0.31$)。

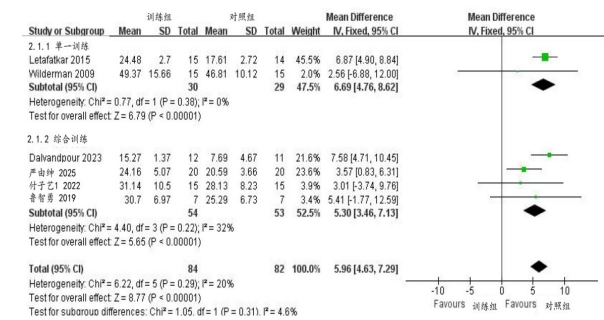


图 4 触地时膝关节屈曲角度的 Meta 分析森林图

2.4.2 运动训练对峰值膝屈曲角的影响

峰值膝屈曲角的 Meta 分析结果如图 5 所示,共纳入 8 项研究,训练组 112 人、对照组 111 人。相关研究结果合并后效应值: $MD=2.51, 95\% CI: (1.31, 3.71), p<0.01$, 这表示运动训练能够显著增大峰值膝屈曲角度。对各个研究结果进行合并后发现各研究间存在低度异质性 ($p=0.09, I^2=43\%$)。亚组分析显示:单一训练亚组合并效应值 $MD=2.26, 95\% CI: (1.01, 3.52), p<0.01$, 研究间异质性较低 ($p=0.13, I^2=44\%$);综合训练亚组合并效应值 $MD=4.99, 95\% CI: (0.96, 9.01), p=0.02$, 研究间异质性较低 ($p=0.17, I^2=44\%$);亚组差异检验显示两类训练的干预效果无统计学差异 ($p=0.21$)。

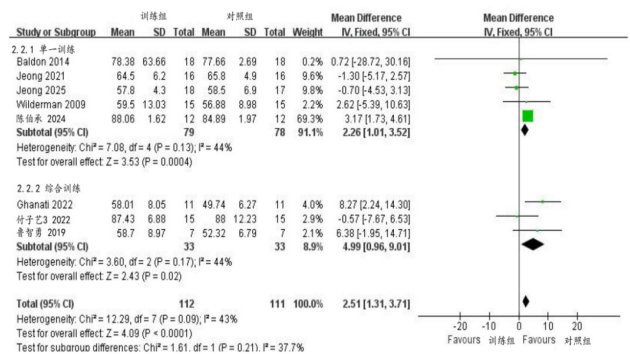


图 5 峰值膝关节屈曲角度的 Meta 分析森林图

2.4.3 运动训练对触地时膝外翻角的影响

触地时膝外翻角的 Meta 分析结果如图 6 所示,共纳入 6 项研究,训练组 78 人、对照组 78 人。相关研究结果合并后效应值: $MD=-0.64, 95\% CI: (-1.00, -0.27), p<0.01$, 这表示运动训练能够显著减小触地时膝外翻角度。对各个研究结果进行合并后发现各研究间具有同质性 ($p=0.77, I^2=0\%$)。亚组分析显示:单一训练亚组合并效应值: $MD=-0.47, 95\% CI: (-1.14, 0.19), p=0.16$, 研究间无异质性 ($p=0.77, I^2=0\%$);综合训练亚

组合并效应值 $MD=-0.71$, 95% CI : $(-1.15, -0.27)$, $p<0.01$, 研究间无异质性 ($p=0.41$, $I^2=0\%$); 亚组差异检验显示两类训练的干预效果无统计学差异 ($p=0.56$)。

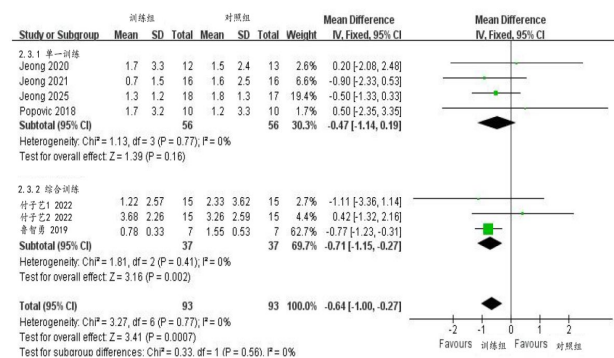


图 6 触地时膝关节外翻角度的 Meta 分析森林图

2.4.4 运动训练对峰值膝外翻角的影响

峰值膝外翻角的 Meta 分析结果如图 7 所示, 共纳入 10 项研究, 训练组 139 人、对照组 138 人。相关研究结果合并后效应值: $MD=-1.20$, 95% CI : $(-1.77, -0.63)$, $p<0.01$, 这表示运动训练能够显著减小峰值膝外翻角度。对各个研究结果进行合并后发现各研究间存在低度异质性 ($p=0.13$, $I^2=33\%$)。亚组分析显示: 单一训练亚组合并效应值 $MD=-1.10$, 95% CI : $(-1.93, -0.28)$, $p<0.01$, 研究间异质性较低 ($p=0.16$, $I^2=37\%$); 综合训练亚组合并效应值 $MD=-1.29$, 95% CI : $(-2.08, -0.50)$, $p<0.01$, 研究间异质性较低 ($p=0.14$, $I^2=40\%$); 亚组差异检验显示两类训练的干预效果无统计学差异 ($p=0.75$)。

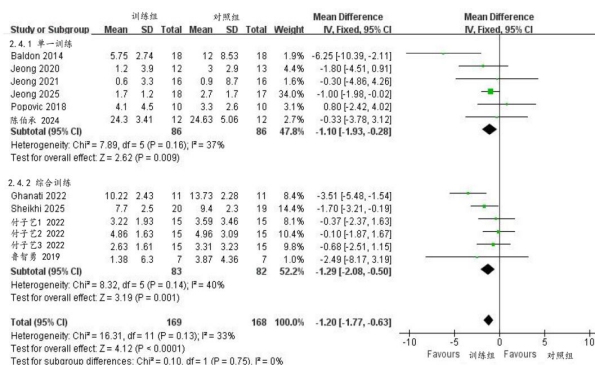


图 7 峰值膝关节外翻角度的 Meta 分析森林图

2.4.5 运动训练对峰值膝外翻力矩的影响

峰值膝外翻力矩的 Meta 分析结果如图 8 所示, 共纳入 7 项研究, 训练组 81 人、对照组 96 人。相关研究结果合并后效应值: $SMD=-0.24$, 95% CI : $(-0.50, 0.03)$, $p=0.08$, 这表示运动训练对峰值膝外翻力矩虽有降低趋势, 但未达到统计学显著水平。对各个研究结果进行合并后发现各研究间具有同质性 ($p=0.47$, $I^2=0\%$)。亚组分析显示: 单一训练亚组合并效应值 $SMD=-0.38$, 95% CI : $(-0.82, 0.07)$, $p=0.10$, 研究间无异质性 ($p=0.54$, $I^2=0\%$); 综合训练亚组合并效应值 $SMD=-0.17$, 95% CI : $(-0.53, 0.19)$, $p=0.36$, 研究间无异质性 ($p=0.33$, $I^2=14\%$); 亚组差异检验显示两类训练的干预效果无统计学差异 ($p=0.48$)。

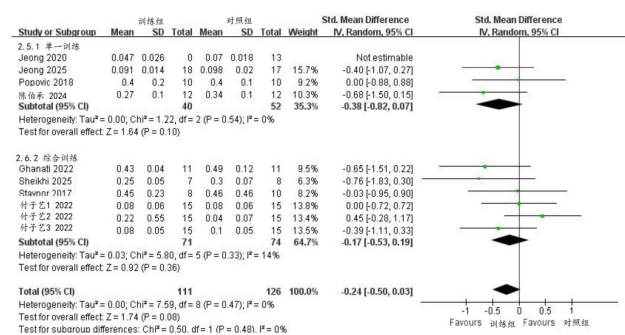


图 8 峰值膝关节力矩的 Meta 分析森林图

2.4.6 运动训练对峰值垂直地面反作用力的影响

峰值垂直地面反作用力的 Meta 分析结果如图 9 所示, 共纳入 14 项研究, 训练组 170 人、对照组 170 人。相关研究结果合并后效应值: $SMD=-0.25$, 95% CI : $(-0.50, 0.01)$, $p=0.06$, 这表示运动训练对峰值垂直地面反作用力虽呈现降低趋势, 但尚未达到统计学显著水平。对各个研究结果进行合并后发现各研究间存在低度异质性 ($p=0.17$, $I^2=26\%$)。亚组分析显示: 单一训练亚组合并效应值 $SMD=-0.57$, 95% CI : $(-1.12, -0.02)$, $p=0.04$, 研究间存在中度异质性 ($p=0.11$, $I^2=50\%$), 异质性可能来源于: 受试者性别, 训练类型以及测试动作的不同; 综合训练亚组合并效应值 $SMD=-0.11$, 95% CI : $(-0.37, 0.15)$, $p=0.42$, 研究间无异质性 ($p=0.56$, $I^2=0\%$); 亚组差异检验显示两类训练的干预效果无统计学差异 ($p=0.14$)。

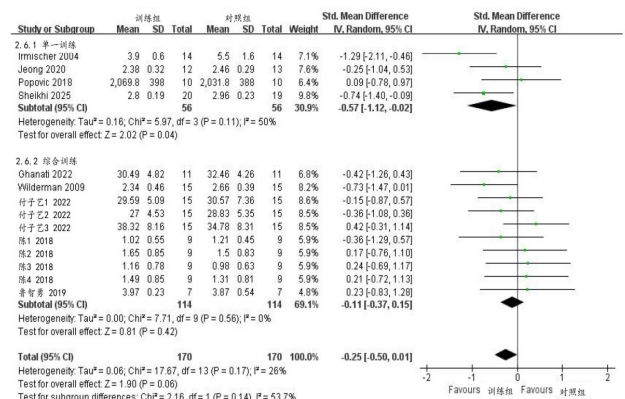


图 9 峰值垂直地面反作用力的 Meta 分析森林图

3 讨论

本研究通过 Meta 分析系统评价运动训练对有运动习惯的健康成年人预防 ACL 损伤相关膝关节生物力学指标的影响, 并比较单一训练与综合训练的干预差异。结果显示, 运动训练可显著增大触地时膝屈曲角和峰值膝屈曲角, 显著减小触地时膝外翻角和峰值膝外翻角; 对峰值膝外翻力矩和峰值垂直地面反作用力仅呈改善趋势, 未达到统计学显著水平。亚组分析表明, 单一训练与综合训练在各指标上的效果均无统计学差异, 以下对结果逐一讨论。

3.1 运动训练对膝关节运动学指标的影响

本 Meta 分析发现, 运动训练能够显著改善 ACL 损伤相关的膝关节运动学指标, 具体表现为显著增大触地时膝屈曲角度 ($MD=5.96$) 和峰值膝屈曲角度 ($MD=2.51$), 同时显著减小触

地时膝外翻角度($MD=-0.64$)和峰值膝外翻角度($MD=-1.20$)。亚组分析显示,单一训练与综合训练在各指标上均有效,但两组间无统计学差异。这些结果表明,运动训练能够通过改善膝关节的运动控制策略,降低 ACL 损伤风险。

从生物力学角度分析,膝屈曲角度的增大是 ACL 损伤预防的重要保护因素^[36]。ACL 的主要功能之一是抵抗胫骨相对于股骨的过度前向位移^[37],在较小的膝屈曲角度下,胫骨前向剪切力显著升高^[38],增加 ACL 负荷;而当膝屈曲角度增大时,胫骨前向剪切力降低,同时落地冲击力的作用时间延长,峰值力降低,从而将负荷从被动韧带结构转移至主动肌肉系统^[39]。多项研究证实运动训练可有效提升落地时膝屈曲角度,Letafatkar^[31]等采用平衡训练干预后发现,受试者峰值膝屈曲角度显著提升($p<0.01$),该研究认为平衡训练可提高肌梭敏感性,增强下肢本体感觉与姿态调控能力,使运动员在落地阶段更高效地完成离心缓冲。Dalvandpour^[25]等将外部注意焦点与 PEP 训练相结合,同样显著增大了落地时的峰值膝屈曲角度($p<0.001$)。依据 Wulf 的“约束行动假说”,外部注意可减少中枢刻意控制干扰,促进动作自动化,使运动员更自然地采用屈膝幅度更大的落地模式,但也有部分研究并未观察到膝屈曲角度的显著改善,提示训练效应存在一定异质性。例如 Wilderman^[13]等采用敏捷训练干预后,落地膝屈曲角度未出现统计学差异,其原因可能与受试者基线屈膝角度本身较高、干预后出现天花板效应有关。此外,部分干预周期较短、训练量不足或动作反馈缺失的研究^[40],也可能因刺激剂量不足而未引起膝屈曲角度的明显改变。

膝外翻角度的减小同样是 ACL 损伤预防的关键^[5-6,41]。过度的膝外翻会直接增加 ACL 的张力^[42],且往往伴随胫骨旋转^[43]。多项研究证实运动训练可有效减小膝外翻角度,鲁智勇^[21]等采用改良 PEP 训练研究发现,训练组峰值膝外翻角度显著减小,该研究指出膝关节外翻角度是各项指标中干预前后变化最大的参数,其峰值出现在动作周期的早期,这正是 ACL 损伤的高发阶段。Sheikhi^[32]等的全身系统训练研究发现,训练后峰值膝外翻角度显著减小($p<0.01$),说明通过躯干控制来间接影响膝关节负荷的策略更为有效。但也有部分研究并未观察到膝外翻角度的显著改善,如付子艺^[20]的 FIFA 11+ 研究发现 6 周干预后膝外翻角度反而显著增大($p=0.011$),该研究解释为运动表现的提升可能使运动员更专注于爆发性发力而非落地控制,提示运动表现提升与损伤风险降低之间存在权衡。同时,部分研究未设置明确的动作反馈与技术指导,受试者虽完成训练动作,但未形成正确的发力模式,也无法有效减少膝外翻角度^[44]。

亚组分析显示,单一训练与综合训练在各运动学指标上均无统计学差异($p>0.05$),但综合训练显著改善了触地时膝外翻角,而单一训练在该指标上未达显著水平,这可能和综合训练与多平面神经肌肉控制有关;单一训练在膝屈曲角改善方面略优,可能与力量和肌腱刚度的针对性强化有关。

综上,运动训练可显著改善 ACL 损伤相关的膝关节运动学指标——增大膝屈曲角度、减小膝外翻角度。其生物力学基础在于:屈膝角度的增大可降低胫骨前向剪切力、延长缓冲时间,将落地负荷从被动韧带转移至主动肌肉系统;膝外翻角度的减小则可减少 ACL 的扭转负荷。亚组分析显示,单一训练

与综合训练效果相当($p>0.05$),但作用机制可能不同;单一训练对膝屈曲角的改善略优,可能与力量和肌腱刚度的针对性强化有关;综合训练对膝外翻角的改善略优,可能与多平面神经肌肉控制有关。两类训练均可作为 ACL 损伤预防的有效手段,实践中可根据训练目标灵活选择。

3.2 运动训练对膝关节动力学指标的影响

本研究显示,运动训练对峰值膝外翻力矩($SMD=-0.24$, $p=0.08$)和峰值垂直地面反作用力(vGRF, $SMD=-0.25$, $p=0.06$)的改善未达显著水平。亚组分析提示,单一训练在降低 vGRF 方面效果相对明显($SMD=-0.57$, $p=0.04$),而综合训练在该指标上未观察到显著效应。值得注意的是,对垂直地面反作用力的改善,单一训练亚组存在中度异质性($I^2=50\%$, $P=0.11$),提示不同单一训练研究间的效应量存在差异。分析其原因可能包括:不同单一训练类型对 vGRF 的影响效果存在差异,快速伸缩复合训练通过反复的拉长-缩短周期刺激,可有效增强肌腱刚度并提高离心缓冲效率,而单纯的力量训练或平衡训练对此的直接影响相对有限;其次,各研究受试者性别存在差异,不同人群的改善空间不同;最后,不同研究采用的测试动作(跳深、侧切、急停起跳等)对下肢冲击负荷的要求不同, vGRF 的反应模式也存在差异。

从生物力学角度分析,膝外翻力矩^[45]与垂直地面反作用力^[46](vGRF)是落地过程中膝关节承受的重要外部负荷参数。其中,膝外翻力矩反映了膝关节受到的外翻应力, vGRF 则反映了落地冲击力的大小。两者均可用于评估 ACL 损伤的风险。从训练适应的生理机制来看,运动学指标(如关节角度)的改善主要依赖动作模式的重组与神经肌肉控制的快速学习,此类适应可在较短干预周期内实现;而动力学指标的改善则涉及肌腱刚度调整、肌肉协调模式改变,这些生理适应通常需要更长时间的训练刺激才可能发生变化。因此,相比运动学参数,动力学指标的改善可能对训练剂量更为敏感,可能需要更长的干预周期或更高的训练强度^[34,47]。Yang^[34]等对大学生运动员进行 4 周力量结合增强式训练,发现 vGRF 未发生显著变化,作者认为这可能与干预周期较短有关。本研究纳入的 17 项研究中,干预周期最短为 4 周,最长为 16 周,其中干预周期不超过 6 周的研究共 6 项(占 35.3%),整体干预周期偏短,这可能是本研究中动力学指标未达显著差异的重要原因之一。亚组分析显示,单一训练在降低 vGRF 方面优于综合训练,但亚组间无统计学差异($p=0.14$)。从已有研究来看,针对性较强的单一训练确实可在特定条件下产生显著效果。例, Irmischer^[27]等对女性运动员进行 9 周低强度快速伸缩复合训练, vGRF 显著降低($p<0.001$); Ghanati^[26]等对高风险男性运动员进行 8 周差异学习训练,膝外翻力矩显著降低($p=0.001$)。这些研究表明,当训练周期足够长(≥ 8 周)或针对高风险人群时,动力学指标仍可获得显著改善。这进一步提示,本研究中动力学指标整体未达显著水平,可能与纳入研究的平均干预周期偏短、受试者基线风险偏低有关。

综上,运动训练对膝外翻力矩和 vGRF 的改善未达显著水平,动力学指标对训练的敏感性低于运动学指标。这一结果可能与训练周期偏短、受试者基线风险偏低有关;当训练周期足够长或针对高风险人群时,动力学指标仍可获得显著改善。

3.3 研究局限性

本研究存在以下局限性:第一,结论仅适用于有运动习惯的健康成年人,无法直接外推至青少年或膝关节损伤术后等人群。第二,各纳入研究采用的测试动作不尽相同(如落地、急停、变向等),本研究虽采用标准化均数差(SMD)合并力矩与垂直地面反作用力等绝对值指标,可在一定程度上消除量纲与单位差异,但无法完全控制不同测试动作所固有的生物力学机制差异,这可能是部分指标存在异质性的原因之一,也可能影响合并结果的稳定性。第三,部分纳入研究的干预周期偏短,样本量较小,且本研究未系统分析训练剂量(如干预周期、频次)与效应量之间的量效关系,上述因素可能在一定程度上影响结果的可靠性与外推性。此外,受纳入研究原始数据所限,未对年龄、性别、运动水平等潜在调节因素进行亚组分析,这些因素对训练干预效果的影响尚不明确。

4 研究结论

对于有运动习惯的健康成年人,运动训练可显著改善与ACL损伤风险相关的膝关节运动学指标,但对动力学指标的改善效果有限。单一训练与综合训练在各指标上的干预效果均无统计学差异。既往前瞻性研究已证实,膝关节生物力学指标的改善与ACL损伤发生率的下降存在关联^[5],据此推测,本研究所观察到的运动学指标改善可能对降低真实损伤风险具有积极意义。但由于本Meta分析未直接纳入损伤发生率作为结局指标,该推论尚需大样本、长期随访的前瞻性研究进一步验证。

参考文献:

- [1] MONTALVO A M, SCHNEIDER D K, WEBSTER K E, et al. Anterior Cruciate Ligament Injury Risk in Sport: a Systematic Review and Meta-Analysis of Injury Incidence by Sex and Sport Classification[J]. *Journal of Athletic Training*, 2019, 54(5): 472-482.
- [2] 薛博士, 杨晓巍, 赵建斌, 等. 不同落地方向及运动疲劳对侧切动作中前交叉韧带损伤风险的影响[J]. *首都体育学院学报*, 2023, 35(6): 653-662.
- [3] 苏玉林, 李翰君, 于冰, 等. 前交叉韧带易伤动作的下肢运动生物力学分析[J]. *体育学刊*, 2009, 16(8): 96-101.
- [4] 张磊, 李义凯. 膝关节前交叉韧带本体感觉的研究进展[J]. *中国康复医学杂志*, 2017, 32(2): 245-247.
- [5] HEWETT T E, MYER G D, FORD K R, et al. Biomechanical Measures of Neuromuscular Control and Valgus Loading of the Knee Predict Anterior Cruciate Ligament Injury Risk in Female Athletes: a Prospective Study[J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2005, 33(4): 492-501.
- [6] KOGA H, NAKAMAE A, SHIMA Y, et al. Mechanisms for Noncontact Anterior Cruciate Ligament Injuries: Knee Joint Kinematics in 10 Injury Situations from Female Team Handball and Basketball[J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2010, 38(11): 2218-2225.
- [7] DRAGANICH L F, VAHEY J W. An in Vitro Study of Anterior Cruciate Ligament Strain Induced by Quadriceps and Hamstrings Forces[J]. *Journal of Orthopaedic Research*, 1990, 8(1): 57-63.
- [8] HUSTON L J, WOJTYŚ E M. Neuromuscular Performance Characteristics in Elite Female Athletes[J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 1996, 24(4): 427-436.
- [9] HERMAN D C, WEINHOLD P S, GUSKIEWICZ K M, et al. The Effects of Strength Training on the Lower Extremity Biomechanics of Female Recreational Athletes during a Stop-Jump Task[J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2008, 36(4): 733-740.
- [10] NIVETHA D, JOTHILINGAM M, PREETHI G. Effectiveness of Balance Training and Strengthening Exercise on Pain and Functional Performance among the Athletes with Ankle Sprain[J]. *Indian Journal of Physiotherapy & Occupational Therapy-an International Journal*, 2024, 18: 674-679.
- [11] FOURÉ A, NORDEZ A, CORNU C. Plyometric Training Effects on Achilles Tendon Stiffness and Dissipative Properties[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2010, 109(3): 849-854.
- [12] HEWETT T E, STROUPE A L, NANCE T A, et al. Plyometric Training in Female Athletes: Decreased Impact Forces and Increased Hamstring Torques[J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 1996, 24(6): 765-773.
- [13] WILDERMAN D R, ROSS S E, PADUA D A. Thigh Muscle Activity, Knee Motion, and Impact Force during Side-Step Pivoting in Agility-Trained Female Basketball Players[J]. *Journal of Athletic Training*, 2009, 44(1): 14-25.
- [14] DI PAOLO S, NIJMEIJER E, BRAGONZONI L, et al. Comparing Lab and Field Agility Kinematics in Young Talented Female Football Players: Implications for ACL Injury Prevention[J]. *European Journal of Sport Science*, 2023, 23(5): 859-868.
- [15] 韩征强. 整合性神经肌肉训练对前交叉韧带损伤康复与预防的研究进展[J]. *运动科学与健康研究*, 2025(4): 77-82+53.
- [16] MAGAÑA-RAMÍREZ M, GALLARDO-GÓMEZ D, ÁLVAREZ-BARBOSA F, et al. What Exercise Programme Is the Most Appropriate to Mitigate Anterior Cruciate Ligament Injury Risk in Football (Soccer) Players? A Systematic Review and Network Meta-Analysis[J]. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2024, 27(4): 234-242.
- [17] BROWN T N, PALMIERI-SMITH R M, MCLEAN S G. Comparative Adaptations of Lower Limb Biomechanics during Unilateral and Bilateral Landings after Different Neuromuscular-Based ACL Injury Prevention Protocols[J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2014, 28(10): 2859-2871.
- [18] 李强. 冷水浸泡疗法对团体运动员肌肉损伤及功能恢复的影响: 基于随机对照试验的Meta分析[J]. *湖北体育科技*, 2025, 44(3): 101-112.
- [19] STERNE J A C, SAVOVIĆ J, PAGE M J, et al. RoB 2: a Revised Tool for Assessing Risk of Bias in Randomised Trials[J]. *Bmj*, 2019: l4898.
- [20] 付子艺. FIFA 11+热身方案对于大学女子篮球爱好者下肢运动生物力学特征及运动表现的影响[D]. 北京体育大学, 2022.
- [21] 鲁智勇, 晋江艳, 解强, 等. 改良运动损伤预防方案在前交叉韧带损伤预防中的应用[J]. *中国康复医学杂志*, 2021, 36(4): 388-397.
- [22] 严由绅. 整合性神经肌肉训练对高校女子足球运动员前交叉韧带损伤风险影响的实验研究[D]. 江西师范大学, 2025.
- [23] DE MARCHE BALDON R, MOREIRA LOBATO D F, YOSHIMATSU A P, et al. Effect of Plyometric Training on Lower Limb Biomechanics in Females[J]. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 2014, 24(1): 44-50.
- [24] CHEN B, YE Z, WU J, et al. Effects of 16 Weeks of Plyometric Training on Knee Biomechanics during the Landing Phase in Athletes

- [J]. *European Journal of Sport Science*, 2024, 24(8): 1095–1109.
- [25] DALVANDPOUR N, ZAREEI M, ABBASI H, et al. Focus of Attention during ACL Injury Prevention Exercises Affects Improvements in Jump–Landing Kinematics in Soccer Players; a Randomized Controlled Trial[J]. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 2023, 37(2): 337–342.
- [26] GHANATI H A, LETAFATKAR A, SHOJAEDIN S, et al. Comparing the Effects of Differential Learning, Self–Controlled Feedback, and External Focus of Attention Training on Biomechanical Risk Factors of Anterior Cruciate Ligament (ACL) in Athletes; a Randomized Controlled Trial[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(16): 10052.
- [27] IRMISCHER B S, HARRIS C, PFEIFFER R P, et al. Effects of a Knee Ligament Injury Prevention Exercise Program on Impact Forces in Women[J]. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 2004, 18(4): 703.
- [28] JEONG J, CHOI D H, SONG Y, et al. Muscle Strength Training Alters Muscle Activation of the Lower Extremity during Side–Step Cutting in Females[J]. *Journal of Motor Behavior*, 2020, 52(6): 703–712.
- [29] JEONG J, CHOI D H, SHIN C S. Core Strength Training Can Alter Neuromuscular and Biomechanical Risk Factors for Anterior Cruciate Ligament Injury[J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2021, 49(1): 183–192.
- [30] JEONG J, CHOI D H, SHIN C S. The Effect of Strength Training Targeting Medial Thigh Muscles on Neuromuscular and Biomechanical Risk Factors for Anterior Cruciate Ligament Injury; a Randomized Controlled Trial[J]. *Sports Medicine–Open*, 2025, 11(1): 5.
- [31] LETAFATKAR A, RAJABI R, TEKAMEJANI E E, et al. Effects of Perturbation Training on Knee Flexion Angle and Quadriceps to Hamstring Cocontraction of Female Athletes with Quadriceps Dominance Deficit; Pre – Post Intervention Study[J]. *The Knee*, 2015, 22(3): 230–236.
- [32] SHEIKHI B, LETAFATKAR A, HADADNEZHAD M, et al. Effectiveness of Injury Prevention Program Using a Global Systems Approach on High–Risk Movement Mechanics for Noncontact ACL Injury[J]. *Sports Health: A Multidisciplinary Approach*, 2025, 17(5): 1081–1090.
- [33] STAYNOR J M D, NICHOLAS J C, WEIR G, et al. Targeting Associated Mechanisms of Anterior Cruciate Ligament Injury in Female Community–Level Athletes[J]. *Sports Biomechanics*, 2017, 16(4): 501–513.
- [34] YANG C, YAO W, GARRETT W E, et al. Effects of an Intervention Program on Lower Extremity Biomechanics in Stop–Jump and Side–Cutting Tasks[J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2018, 46(12): 3014–3022.
- [35] POPOVIC T, CASWELL S V, BENJAMINSE A, et al. Implicit Video Feedback Produces Positive Changes in Landing Mechanics[J]. *Journal of Experimental Orthopaedics*, 2018, 5(1): 12.
- [36] LI G, DEFRATE L E, RUBASH H E, et al. In Vivo Kinematics of the ACL during Weight–Bearing Knee Flexion[J]. *Journal of Orthopaedic Research*, 2005, 23(2): 340–344.
- [37] BATES N A, SCHILATY N D, NAGELLI C V, et al. Multiplanar Loading of the Knee and Its Influence on Anterior Cruciate Ligament and Medial Collateral Ligament Strain during Simulated Landings and Noncontact Tears[J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2019, 47(8): 1844–1853.
- [38] BEAULIEU M L, ASHTON–MILLER J A, WOJTYŚ E M. Loading Mechanisms of the Anterior Cruciate Ligament[J]. *Sports Biomechanics*, 2023, 22(1): 1–29.
- [39] PODRAZA J T, WHITE S C. Effect of Knee Flexion Angle on Ground Reaction Forces, Knee Moments and Muscle Co–Contraction during an Impact–Like Deceleration Landing; Implications for the Non – Contact Mechanism of ACL Injury[J]. *The Knee*, 2010, 17(4): 291–295.
- [40] PADUA D A, DISTEFANO L J, HEWETT T E, et al. National Athletic Trainers’ Association Position Statement; Prevention of Anterior Cruciate Ligament Injury[J]. *Journal of Athletic Training*, 2018, 53(1): 5–19.
- [41] SCHILATY N D, BATES N A, KRYCH A J, et al. How Anterior Cruciate Ligament Injury Was Averted during Knee Collapse in a NBA Point Guard[J]. *Annals of Musculoskeletal Medicine*, 2017, 1(1): 8–12.
- [42] KIAPOUR A M, KIAPOUR A, GOEL V K, et al. Uni–Directional Coupling between Tibiofemoral Frontal and Axial Plane Rotation Supports Valgus Collapse Mechanism of ACL Injury[J]. *Journal of Biomechanics*, 2015, 48(10): 1745–1751.
- [43] ISHIDA T, YAMANAKA M, TAKEDA N, et al. Knee Rotation Associated with Dynamic Knee Valgus and Toe Direction[J]. *The Knee*, 2014, 21(2): 563–566.
- [44] BILL K, MAI P, MAUSEHUND L, et al. Individualized Technique Feedback for Instant Technique Improvements and Knee Abduction Moment Reductions—a New Approach for ‘Sidestepping’ ACL Injuries? [J]. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 2024, 19(5): 535–547.
- [45] 王朋飞, 邢泽宇, 武梦旻, 等. 动态膝外翻女性跑步着地阶段动态稳定性与下肢刚度特征[J]. *医用生物力学*, 2025, 40(6): 1541–1548+1591.
- [46] THWAITES S, RICKMAN M, THEWLIS D. Visualising Knee Loading Patterns during Kneeling and the Development of a Laboratory–Based Adaptation of the Aberdeen Weight–Bearing Test (Knee)[J]. *The Knee*, 2022, 38: 201–211.
- [47] PAREJA–BLANCO F, ALCAZAR J, SÁNCHEZ–VALDEPEÑAS J, et al. Velocity Loss as a Critical Variable Determining the Adaptations to Strength Training[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2020, 52(8): 1752–1762.