

脊柱 - 骨盆矢状面平衡在膝关节置换术中的临床应用研究进展

张雪彬¹, 赵兴文², 杨盛强¹, 李宏键^{2*}

¹昆明理工大学医学部, 云南 昆明

²云南省第一人民医院&昆明理工大学附属医院骨科, 云南省数字骨科重点实验室, 云南省脊柱与脊髓疾病临床医学中心, 云南 昆明

收稿日期: 2025年5月3日; 录用日期: 2025年5月27日; 发布日期: 2025年6月5日

摘要

膝关节置换术(TKA/UKA)是治疗重度膝关节骨性关节炎(KOA)的有效手段, 但术后仍有高达20%的不满意率。近年来, 脊柱 - 骨盆矢状面平衡参数与膝关节置换术预后的关联逐渐成为研究热点。研究表明, 脊柱 - 骨盆矢状面失衡通过脊柱过度伸展、骨盆后倾和膝关节屈曲等代偿机制增加膝关节负荷, 不仅加速KOA进展, 而且与术后僵硬及患者满意度下降显著相关。同时, 全膝关节置换术后也会对脊柱 - 骨盆矢状面平衡产生影响。未来需结合多模态评估、精准手术技术及跨学科合作, 推动“脊柱 - 膝关节一体化”诊疗策略, 以实现从局部重建到全身力线优化的目标。本综述系统分析了脊柱 - 骨盆矢状面参数的生物力学定义、代偿机制及其与KOA的病理生理作用, 并探讨其在膝关节置换术中的临床价值。

关键词

膝骨性关节炎, 全膝关节置换术, 脊柱 - 骨盆对齐, 矢状面失衡

Advances in the Clinical Application of Spinal-Pelvic Sagittal Balance in Knee Arthroplasty

Xuebin Zhang¹, Xingwen Zhao², Shengqiang Yang¹, Hongjian Li^{2*}

¹Medical School, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan

²The Clinical Medicine Center of Spinal and Spinal Cord Disorders of Yunnan Province, The Key Laboratory of Digital Orthopedics of Yunnan Province, Department of Orthopedics, The First People's Hospital of Yunnan Province & The Affiliated Hospital of Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan

Received: May 3rd, 2025; accepted: May 27th, 2025; published: Jun. 5th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 张雪彬, 赵兴文, 杨盛强, 李宏键. 脊柱-骨盆矢状面平衡在膝关节置换术中的临床应用研究进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(6): 190-197. DOI: 10.12677/acm.2025.1561715

Abstract

Knee arthroplasty (TKA/UKA) is an effective treatment for severe knee osteoarthritis (KOA), but the dissatisfaction rate after surgery can be as high as 20%. In recent years, the association between spinal-pelvic sagittal balance parameters and the prognosis of TKA has gradually become a research hotspot. Studies have shown that spinal-pelvic sagittal imbalance increases the load on the knee joint through compensatory mechanisms such as excessive spinal extension, posterior pelvic tilt, and knee flexion, which not only accelerates the progression of KOA but is also significantly associated with postoperative stiffness and decreased patient satisfaction. At the same time, total knee arthroplasty can also affect the spinal-pelvic sagittal balance. In the future, it is necessary to combine multi-modal assessment, precise surgical techniques, and interdisciplinary collaboration to promote an integrated "spine-knee" diagnostic and treatment strategy, with the goal of transitioning from local reconstruction to optimization of the overall mechanical alignment. This review systematically analyzes the biomechanical definitions of spinal-pelvic sagittal parameters, their compensatory mechanisms, and their pathophysiological roles in KOA, and discusses their clinical value in knee arthroplasty.

Keywords

Knee Osteoarthritis, Total Knee Arthroplasty, Spinal-Pelvic Alignment, Sagittal Imbalance

Copyright © 2025 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. 前言

膝关节置换术是治疗重度膝关节骨性关节炎的有效手段[1], 包括膝关节单髁置换术(Unicompartmental Knee Arthroplasty, UKA)与人工全膝关节置换术(Total Knee Arthroplasty, TKA)。近年来, KOA 的患病率逐年升高[2], 需要进行膝关节置换手术的患者数量也逐年增大。尽管膝关节置换术目前已相当成熟, 但是既往研究表明, TKA 术后的不满意率高达 20% [3], 术后疼痛、关节活动受限等是患者满意度的重要影响因素[4]。关于膝关节术后临床疗效的影响因素及相关机制还需要不断探索。有研究发现, 脊柱-骨盆的矢状面失衡会对膝关节置换术的预后造成不良影响[5]-[7]。此外, 不同人群的脊柱-骨盆矢状面平衡特征存在差异[8]-[10], 这些差异可能会对膝关节置换术的疗效产生影响。探索脊柱骨盆-矢状面平衡与膝关节置换术后疗效的因果关系, 对预估膝关节置换术的预后和完善治疗方案十分有利。关于脊柱-骨盆矢状面平衡对膝关节置换术的影响机制并不明确, 目前也并未将其作为手术适应症的参考标准。现对近年来脊柱-骨盆矢状面平衡与膝关节置换术相关性的研究给予综述。

2. 脊柱-骨盆矢状面平衡的参数与代偿机制

脊柱-骨盆矢状面平衡是指在矢状面上, 脊柱与骨盆之间的相互关系和排列方式, 以维持人体直立时的稳定性和动态平衡[11]。这种平衡是通过脊柱的生理曲度以及骨盆的形态和位置相互协调来实现的[12]。通常用脊柱和骨盆矢状面参数来评价脊柱-骨盆矢状面的平衡状态, 正常情况下, 脊柱矢状面曲度遵循严格的几何规则, 且这些参数之间存在一定的数学关系[13]。

2.1. 脊柱参数的定义与测量

常用的参数包括: 胸椎后凸角(Thoracic Kyphosis, TK, T4~T12), 矢状面垂直轴(Sagittal Vertical Axis,

SVA), 腰椎前凸角(Lumbar Lordosis, LL, L1~S1)。

SVA 定义为 C7 铅垂线与 S1 后上角垂线间的水平距离(单位: cm)。正常情况下, SVA 应小于 5 cm, 然而, SVA 是一个与年龄相关的参数, 且其值会受到骨盆入射角(PI)的影响, SVA 的变化可以反映脊柱平衡的动态变化[12]。TK 指 T4 椎体上终板与 T12 椎体下终板之间的夹角。LL 指 L1 椎体上终板与 S1 终板之间的夹角。

2.2. 骨盆参数的定义与测量

常用的参数包括: 骨盆入射角(Pelvic Incidence, PI), 骨盆倾斜角(Pelvic Tilt, PT), 骶骨倾斜角(Sacral Slope, SS)。

PI 指股骨头中心和骶骨端板之间绘制的线与垂直于骶骨端盘绘制的线所成的角度。传统的观点认为 PI 是骨盆形态的固有参数, 不随体位改变[14], 最新的研究表明, PI 在健康人群中并非固定不变, 而是可以通过骨盆旋转而改变[15], 未来的研究可以进一步探讨 PI 变化的机制。PT 是指从骶骨端板中点到股骨头中心的线与垂直铅垂线形成的角度。PT 是骨盆的功能参数, 表示的是骨盆围绕股骨头旋转的位置[16]。SS 指平行于骶骨端板绘制的线与水平参考线所成的角度。

2.3. 脊柱 - 骨盆参数间的生物力学关联

PI 与 LL 呈正相关性($LL = 0.54 \times PI + 27.6$), 提示 PI 较高的患者需更大的腰椎前凸以维持平衡[17]。SS 与 LL 之间存在强相关性, SS 的变化直接影响腰椎前凸的角度[18]。PT 与 PI 之间存在线性关系, 公式为: $PT = 0.44 \times PI - 11.4$, 这个公式表明, PT 是 PI 的线性函数[19]。TK 与 LL 之间存在一定的比例关系, 理论上的 TK 值为: $TK = 0.75 \times LL$ [19]。总之, 脊柱参数之间的关系是复杂且相互关联的, 这些关系在临床中具有重要意义, 通过理解这些参数之间的关系, 医生可以更好地评估患者的脊柱平衡状态, 并制定更精准的治疗方案。

2.4. 矢状面失衡的代偿机制: 从脊柱到下肢的连锁反应

在腰椎层面, 常见的代偿机制是相邻节段的过度伸展。这种伸展可以是单节段或多节段的, 表现为单个节段的前凸角度超过 15° 。这种机制会导致后方结构的压力增加, 可能导致退行性病变[20]。髋关节的伸展能力是维持脊柱平衡的重要因素, 髋关节的伸展能力在正常人群中有限, 但在某些病理状态下(如髋关节炎)会进一步减少[21] [22]。骨盆后倾是通过髋关节的后伸来实现的, 这种机制可以部分补偿腰椎前凸的减少[23], 骨盆后倾的能力与 PI 有关, PI 越大, 骨盆后倾的潜力越大。当骨盆后倾达到最大值后, 膝关节屈曲成为一种常见的代偿机制[24]。膝关节屈曲可以帮助将重心线向后移动, 从而减少前倾的趋势[20]。踝关节的背伸也可以帮助调整重心线的位置, 尤其是在膝关节屈曲后, 进一步向后移动重心线。骨盆平移是一种整体的代偿机制, 通过改变骨盆的位置来调整重心线[25]。这种机制在某些病理状态下(如下肢长度不等)尤为重要[26]。在矢状面失衡时会启动一系列代偿机制, 这些机制涉及脊柱的过度伸展、骨盆的后倾和下肢的关节调整。这些代偿机制在维持脊柱 - 骨盆矢状面平衡中起着重要作用。

3. 脊柱 - 骨盆矢状面失衡与膝关节骨性关节炎(KOA)的病理生理关联

Taichi 等最先提出了膝脊柱综合征, 指出了膝关节的疼痛与脊柱失衡相关[27]。Murata 等人介绍了膝脊柱综合征, 描述膝关节退行性变与随后腰椎退行性变化以及前凸丧失之间的关联[28]。一项综述分析指出脊柱 - 骨盆对齐异常(如高 PI、更大的 PT 和更小的 LL), 可能导致 KOA 的进展, 并通过增加膝关节负荷进一步加剧疼痛和功能障碍[29]。膝关节屈曲挛缩会导致脊柱后凸增加, 髋关节伸展, 膝关节屈曲, 踝关节背屈, 这种姿势变化增加了膝关节的负荷, 可能导致 KOA 的进展[25]。一项纳入 213 名受试者的横

断面研究确认了脊柱矢状面失衡与膝关节角度之间的相关性。脊柱失衡的严重程度与膝关节和腰背痛的进展相关,在轻度脊柱失衡($10^{\circ} \leq \text{PI-LL} \leq 20^{\circ}$)的受试者中,PT 增加可能是主要的代偿机制;而在重度脊柱失衡($\text{PI-LL} > 20^{\circ}$)的受试者中,膝关节屈曲角(KFA)和髌膝角(HKA)显著增加,表明膝关节参与了代偿[30]。该研究中的放射学分析仅揭示了脊柱、骨盆倾斜和膝关节屈曲之间的静态相互作用,而实际的人体运动是动态的,膝关节屈曲、骨盆和腰椎之间的动态相互作用未能揭示。一项队列研究分析了 252 名 60 岁以上老年人在自由站立位进行侧位和前后位 X 光拍摄的脊柱骨盆参数,分析得出站立位膝关节屈曲(KF)主要是由于脊柱-骨盆失衡的代偿机制引起,而非单纯由 KOA 引起[31]。但该研究的不足在于没有动态的复测脊柱状态,脊柱畸形的原因多种多样,且研究中观察到的姿势可能是暂时的补偿姿势,而非长期稳定的状态,这可能影响对 KF 原因的准确判断。2024 年一项研究纳入了来自 13 个美国脊柱中心的 527 名术前 ASD 患者,该研究得出 KOA 严重程度增加时,患者的踝关节背屈和膝关节屈曲显著增加。KOA 患者表现出更大的膝关节屈曲,这可能与脊柱畸形的代偿有关,但也可能是膝关节病变本身的结果[32]。综上,脊柱-骨盆矢状位的失衡在膝关节屈曲挛缩和骨关节炎的进展中发挥着重要的作用,这与失衡后下肢的代偿相关。

4. 脊柱-骨盆参数在膝关节置换术中的临床价值

4.1. PI-LL 不匹配与术后僵硬风险

Kim 等[33]一项纳入 116 名的前瞻性队列研究通过 EOS 测量得出术前腰椎灵活性(LF)是 TKA 术后改善脊柱和下肢对线的重要因素。更大的 LF 有助于术后 LL 的增加和 SVA 的减少,LF 较低的患者可能会出现膝关节被动伸展和站立伸展状态之间的差异,这种差异可能与腰椎后凸或弯腰姿势有关,长期可能导致膝关节屈曲畸形复发。该研究的随访时间为术后 1 年,无法确定这种差异是否会在更长的时间内发展为真正的屈曲挛缩。Jonathan 等[6]回顾性分析了 78 例病例,研究首次发现,脊柱矢状面畸形(通过 PI-LL 不匹配评估)可能导致 TKA 术后膝关节僵硬,尤其是屈曲挛缩。因此其建议应前瞻性地评估脊柱矢状面畸形与 TKA 术后僵硬之间的直接关系,并制定术前评估和管理方案,以降低术后僵硬的风险。TKA 术后膝关节活动范围受多种因素影响,如患者性别、年龄、BMI、基础疾病、手术技术、植入物设计等。虽然研究中对部分因素进行了分析,但仍无法完全控制所有这些变量,这可能导致结果的偏差。一项纳入 216 例患者的回顾性研究结果表明,脊柱-骨盆失配($\text{PI-LL} \geq 10^{\circ}$)是 TKA 后人工关节感知的预测因素,与患者报告的不良结果相关[7],包括术后膝关节活动范围、总活动范围的减少以及屈曲挛缩和需要手法松解的可能性增加。该研究患者完成了至少 10 年的术后随访,但是样本量小,纳入的患者主要是亚洲人,且男性比例较低(仅 14.9%),这与西方国家的 TKA 患者人群特征可能不同,因此研究结果可能不适用于其他种族或性别比例不同的患者群体。一项回顾性队列研究纳入 TKA 术后 93 例,其中 44 例存在腰椎滑脱,49 例没有腰椎滑脱,研究发现,单纯腰椎滑脱并不会导致 TKA 术后功能结果变差,但是腰椎滑脱增加了患者出现脊柱-骨盆失配的可能性,可能会有更差的 TKA 术后功能表现[34],作者认为对于合并腰椎滑脱和脊柱矢状面失衡的患者,可能需要在 TKA 术前行脊柱评估,甚至考虑转诊至脊柱外科进行干预,以改善 TKA 的术后结果。PI-LL 的测量可以帮助预测 TKA 的长期结果。这提示临床医生在 TKA 手术前应评估患者的脊柱-骨盆对齐情况,以更好地管理患者的期望。

4.2. 高 PI 患者的假体对位策略

Hongyi Li 等[35]学者的研究指出较高的 PI 可能与更高的股骨假体组件(FC)矢状位错位风险相关。PI 与股骨矢状位弯曲之间的关系可能是导致 FC 错位的原因之一。对于 PI 较高的患者,术中应特别注意 FC 的矢状位对齐,以避免术后不良结果。Yoshinori 等[36]回顾性分析了 200 例接受 TKA 的膝关节骨关节炎

患者,研究得出 $PI \geq 55^\circ$ 与 TKA 术后残余屈曲挛缩显著相关,对于 PI 较高的患者,建议在手术中调整股骨假体的插入位置,避免过度屈曲,以减少术后屈曲挛缩的发生。PI 的测量可以作为 TKA 术后效果的潜在预测指标,包括对患者满意度的影响。

4.3. UKA 术后膝关节活动度与脊柱代偿的关联

Mitsuru 等[37]的一项回顾性横断面研究共纳入 42 名患者,所有患者都完成了 1 年及更长时间的随访。首次揭示了 UKA 术后膝关节活动度和临床结果与术前全下肢对线和脊柱骨盆参数之间的关系,术前冠状面下肢对线(HKAA)和矢状面脊柱-骨盆参数与 UKA 术后的膝关节活动度和临床结果密切相关。术前下肢对线不佳(如较大的 HKAA)可能导致术后膝关节屈曲角度受限,而较高的 PT 和 SVA 可能导致术后膝关节屈曲挛缩和较差的临床结果。术前评估这些参数对于预测术后结果和优化手术方案具有重要意义。为了预测 UKA 术后膝关节活动度和临床结果,术前进行全脊柱矢状面的放射学评估是必要的。但研究纳入的患者数量相对较少,这可能限制了研究结果的统计功效和普遍性。未计算放射学参数测量的观察者间相关系数,这可能影响结果的准确性。

4.4. 不同人群的差异性分析

研究发现,不同年龄的脊柱矢状面平衡的参数会发生变化[8][9],这些变化可能会影响膝关节置换术的疗效。Okamoto 等人[36]的研究发现,年龄较大的患者在膝关节置换术后更容易出现膝关节屈曲挛缩,这可能与老年人骨盆代偿能力减弱有关。当骨盆失去代偿,会启动下肢膝关节的屈曲来维持身体的平衡,造成膝关节的屈曲挛缩。此外,Sheppard 等人[34]的研究也指出,年龄较大的患者在膝关节置换术后,如果存在脊柱滑脱和矢状面畸形,可能会导致术后活动范围减少和膝关节僵硬,这可能与老年人脊柱的柔韧性下降、代偿能力减弱有关。其次,不同种族的人群在骨骼结构和生理特征上存在差异,这可能导致他们在膝关节置换术后的疗效上有所不同。Arima [10]等人的研究发现,PI、SS、LL 在非洲裔美国人中比高加索人中更大,而高加索人比亚洲人更大。先前研究已指出高 PI 会对膝关节置换术后临床疗效产生不良影响[35][36],这些差异可能会影响膝关节置换术后的疗效,但目前暂时没有关于针对不同种族人群术后疗效影响的研究。

5. 膝关节置换对脊柱-骨盆平衡的改善与限制

Wataru 等人研究了 TKA 对躯干运动的影响,TKA 手术显著改善了膝关节的伸展活动范围和疼痛,同时减少了行走时的躯干前倾角度,使 KOA 患者的躯干运动模式接近健康人群[38]。这表明 TKA 手术不仅改善了膝关节功能,还对整体行走姿势产生了积极影响。Heil 等研究得出 TKA 对上身姿势有显著影响[39],表现为 TK 和 LL 减少,这可能是身体对下肢力线变化的代偿机制。TKA 有助于改善患者的矢状面脊柱-骨盆对齐,在并发严重 KOA 和 LSD 的患者中,如果存在严重的矢状面脊柱-骨盆参数异常,建议优先考虑 TKA,以优化脊柱融合手术的效果[40]。Shichman 等的研究指出对于有腰椎融合手术史的患者,TKA 可以显著改变脊柱-骨盆的矢状面排列,尤其是 PT 和 SS,而对没有腰椎融合手术史的患者影响较小[41]。这种变化可能是由于腰椎融合后脊柱的灵活性降低,导致代偿机制更多地依赖于骨盆和髋关节。一项美国多中心数据库的回顾性分析得出膝关节置换术能够有效缓解与 KOA 相关的代偿机制,使得置换术患者的全身矢状位对线和膝关节活动度与轻度或无骨关节炎的患者相当[42]。这表明膝关节置换术可能对 ASD 患者的姿势和功能有积极影响。最新的一项研究指出 TKA 与 LL 和 SS 的显著降低相关,这可能与膝关节置换后下肢力线改变导致的脊柱代偿机制有关[43]。

而 Kitagawa 等人的研究认为 TKA 手术能够解除膝关节屈曲挛缩,但脊柱-骨盆对齐的全局失衡并未得到纠正,且腰痛的改善并不显著[44],表明膝关节屈曲挛缩的解除并不足以恢复全局平衡。一项对印

度人群的研究探讨了 TKA 对膝关节骨性关节炎患者膝关节屈曲畸形矫正后脊柱-骨盆矢状面参数的影响, 结果表明, 尽管 TKA 能够显著矫正膝关节屈曲畸形, 但对脊柱-骨盆矢状面参数的影响并不显著, 因此作者认为 TKA 术前不需要考虑脊柱-骨盆矢状面参数(SSPs)的影响[45]。然而该研究样本量较小, 随访时间较短(仅 3 个月), 可能限制了对 SSPs 变化的全面评估。

目前大量的临床研究表明, 膝关节置换术能改善脊柱骨盆的平衡状态, 也有学者指出膝关节置换术后对脊柱的改善不明显。上述研究的局限都在于样本量小、随访时间短, 研究结果的差异可能与患者基线矢状面失衡程度、假体设计及术后康复策略相关。因此未来还需要更大的样本量、更长时间的随访来揭示两者之间的关系。

6. 结语

本文系统综述了脊柱-骨盆矢状面平衡与膝关节置换术的关联, 揭示了矢状面失衡通过脊柱过度伸展、骨盆后倾及膝关节屈曲等代偿机制增加膝关节负荷, 加速骨关节炎进展, 并与术后僵硬、满意度下降显著相关。研究强调, 术前评估脊柱-骨盆参数(如 PI-LL 匹配度、PT、SVA)对预测术后效果至关重要, 尤其对于高 PI 患者需优化假体对位策略以减少并发症。尽管部分研究显示 TKA 可改善整体力线及代偿姿势, 但其对脊柱-骨盆平衡的长期影响仍存争议, 现有研究的样本量小、随访时间短及基线差异可能影响结论的普适性。未来需通过多中心、大样本、长随访的临床研究进一步验证两者因果关系, 并整合多模态影像、动态生物力学分析及人工智能技术, 推动“脊柱-膝关节一体化”诊疗模式的发展。将脊柱-骨盆矢状面平衡参数纳入膝关节置换术的标准化评估体系, 实现从“局部关节重建”到“全身力线优化”的精准医疗目标。

基金项目

国家自然科学基金(62463031); 云南省数字骨科重点实验室(202005AG070004); 云南省脊柱脊髓疾病临床医学中心(ZX2022000101); 云南省科技厅重点研发计划(202403AC100003)。

参考文献

- [1] 中国骨关节炎诊疗指南专家组, 中国老年保健协会疼痛病学分会, 黄东, 等. 中国骨关节炎诊疗指南(2024 版) [J]. 中华疼痛学杂志, 2024, 20(3): 323-338.
- [2] Giorgino, R., Albano, D., Fusco, S., Peretti, G.M., Mangiavini, L. and Messina, C. (2023) Knee Osteoarthritis: Epidemiology, Pathogenesis, and Mesenchymal Stem Cells: What Else Is New? An Update. *International Journal of Molecular Sciences*, **24**, Article No. 6405. <https://doi.org/10.3390/ijms24076405>
- [3] Gunaratne, R., Pratt, D.N., Banda, J., Fick, D.P., Khan, R.J.K. and Robertson, B.W. (2017) Patient Dissatisfaction Following Total Knee Arthroplasty: A Systematic Review of the Literature. *The Journal of Arthroplasty*, **32**, 3854-3860. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2017.07.021>
- [4] Nakano, N., Shoman, H., Olavarria, F., Matsumoto, T., Kuroda, R. and Khanduja, V. (2020) Why Are Patients Dissatisfied Following a Total Knee Replacement? A Systematic Review. *International Orthopaedics*, **44**, 1971-2007. <https://doi.org/10.1007/s00264-020-04607-9>
- [5] Sheppard, W.L., Upfill-Brown, A., McKay, K.M., Park, H.Y., Shah, A., Park, D.Y., et al. (2021) Lumbar Spine Sagittal Mismatch Deformity Negatively Affects Total Knee Arthroplasty Outcomes. *The Journal of Knee Surgery*, **35**, 1409-1416. <https://doi.org/10.1055/s-0041-1723979>
- [6] Vigdorichik, J.M., Sharma, A.K., Feder, O.I., Buckland, A.J., Mayman, D.J., Carroll, K.M., et al. (2020) Stiffness after Total Knee Arthroplasty: Is It a Result of Spinal Deformity? *The Journal of Arthroplasty*, **35**, S330-S335. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2020.02.031>
- [7] Okamoto, Y., Wakama, H., Okayoshi, T., Matsuyama, J., Otsuki, S. and Neo, M. (2022) Spinopelvic Mismatch Is Associated with Patient-Reported Outcome Measures after Total Knee Arthroplasty at a Mean Follow-Up of 15 Years. *The Knee*, **34**, 156-166. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2021.11.017>

- [8] Mac-Thiong, J., Roussouly, P., Berthonnaud, É. and Guigui, P. (2010) Sagittal Parameters of Global Spinal Balance: Normative Values from a Prospective Cohort of Seven Hundred Nine Caucasian Asymptomatic Adults. *Spine*, **35**, E1193-E1198. <https://doi.org/10.1097/brs.0b013e3181e50808>
- [9] Mac-Thiong, J., Roussouly, P., Berthonnaud, É. and Guigui, P. (2011) Age- and Sex-Related Variations in Sagittal Sacropelvic Morphology and Balance in Asymptomatic Adults. *European Spine Journal*, **20**, 572-577. <https://doi.org/10.1007/s00586-011-1923-2>
- [10] Arima, H., Dimar, J.R., Glassman, S.D., Yamato, Y., Matsuyama, Y., Mac-Thiong, J., *et al.* (2018) Differences in Lumbar and Pelvic Parameters among African American, Caucasian and Asian Populations. *European Spine Journal*, **27**, 2990-2998. <https://doi.org/10.1007/s00586-018-5743-5>
- [11] Abelin-Genevois, K. (2021) Sagittal Balance of the Spine. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*, **107**, Article ID: 102769. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2020.102769>
- [12] Le Huec, J.C., Thompson, W., Mohsinaly, Y., Barrey, C. and Faundez, A. (2019) Sagittal Balance of the Spine. *European Spine Journal*, **28**, 1889-1905. <https://doi.org/10.1007/s00586-019-06083-1>
- [13] Clément, J., Solla, F., Amorese, V., Oborocianu, I., Rosello, O. and Rampal, V. (2020) Lumbopelvic Parameters Can Be Used to Predict Thoracic Kyphosis in Adolescents. *European Spine Journal*, **29**, 2281-2286. <https://doi.org/10.1007/s00586-020-06373-z>
- [14] Vialle, R., Levassor, N., Rillardon, L., Templier, A., Skalli, W. and Guigui, P. (2005) Radiographic Analysis of the Sagittal Alignment and Balance of the Spine in Asymptomatic Subjects. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, **87**, 260-267. <https://doi.org/10.2106/jbjs.d.02043>
- [15] Place, H.M., Hayes, A.M., Huebner, S.B., Hayden, A.M., Israel, H. and Brechbuhler, J.L. (2017) Pelvic Incidence: A Fixed Value or Can You Change It? *The Spine Journal*, **17**, 1565-1569. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2017.06.037>
- [16] Hills, J., Lenke, L.G., Sardar, Z.M., Le Huec, J., Bourret, S., Hasegawa, K., *et al.* (2022) The T4-L1-Hip Axis. *Spine*, **47**, 1399-1406. <https://doi.org/10.1097/brs.0000000000004414>
- [17] Roussouly, P., Gollogly, S., Berthonnaud, E. and Dimnet, J. (2005) Classification of the Normal Variation in the Sagittal Alignment of the Human Lumbar Spine and Pelvis in the Standing Position. *Spine*, **30**, 346-353. <https://doi.org/10.1097/01.brs.0000152379.54463.65>
- [18] Berthonnaud, E., Dimnet, J., Roussouly, P. and Labelle, H. (2005) Analysis of the Sagittal Balance of the Spine and Pelvis Using Shape and Orientation Parameters. *Journal of Spinal Disorders & Techniques*, **18**, 40-47. <https://doi.org/10.1097/01.bsd.0000117542.88865.77>
- [19] Le Huec, J.C. and Hasegawa, K. (2016) Normative Values for the Spine Shape Parameters Using 3D Standing Analysis from a Database of 268 Asymptomatic Caucasian and Japanese Subjects. *European Spine Journal*, **25**, 3630-3637. <https://doi.org/10.1007/s00586-016-4485-5>
- [20] Barrey, C., Roussouly, P., Le Huec, J., D'Acunzi, G. and Perrin, G. (2013) Compensatory Mechanisms Contributing to Keep the Sagittal Balance of the Spine. *European Spine Journal*, **22**, 834-841. <https://doi.org/10.1007/s00586-013-3030-z>
- [21] Hovorka, I., Rousseau, P., Bronsard, N., Chalali, M., Julia, M., Carles, M., *et al.* (2008) Extension Reserve of the Hip in Relation to the Spine: Comparative Study of Two Radiographic Methods. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Réparatrice de l'Appareil Moteur*, **94**, 771-776. <https://doi.org/10.1016/j.rco.2008.03.033>
- [22] Lazennec, J.Y., Brusson, A., Folinais, D., Zhang, A., Pour, A.E. and Rousseau, M.A. (2015) Measuring Extension of the Lumbar-Pelvic-Femoral Complex with the EOS® System. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology*, **25**, 1061-1068. <https://doi.org/10.1007/s00590-015-1603-8>
- [23] Kuhns, B.D., Kahana-Rojkind, A.H., Parsa, A., McCarroll, T.R., Sikligar, D. and Domb, B.G. (2025) Posterior Pelvic Tilt Allows for Increased Hip Motion, While Anterior Pelvic Tilt Decreases Joint Stress: A Systematic Review of Biomechanical and Motion Analyses. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2025.02.021>
- [24] Shimizu, T., Cerpa, M. and Lenke, L.G. (2021) Understanding Sagittal Compensation in Adult Spinal Deformity Patients: Relationship between Pelvic Tilt and Lower-Extremity Position. *Journal of Neurosurgery: Spine*, **35**, 616-623. <https://doi.org/10.3171/2021.1.spine201660>
- [25] Oshima, Y., Watanabe, N., Iizawa, N., Majima, T., Kawata, M. and Takai, S. (2019) Knee-Hip-Spine Syndrome: Improvement in Preoperative Abnormal Posture Following Total Knee Arthroplasty. *Advances in Orthopedics*, **2019**, Article ID: 8484938. <https://doi.org/10.1155/2019/8484938>
- [26] Ferrero, E., Liabaud, B., Challier, V., Lafage, R., Diebo, B.G., Vira, S., *et al.* (2016) Role of Pelvic Translation and Lower-Extremity Compensation to Maintain Gravity Line Position in Spinal Deformity. *Journal of Neurosurgery: Spine*, **24**, 436-446. <https://doi.org/10.3171/2015.5.spine14989>

- [27] Tsuji, T., Matsuyama, Y., Goto, M., Yimin, Y.U., Sato, K., Hasegawa, Y., *et al.* (2002) Knee-Spine Syndrome: Correlation between Sacral Inclination and Patellofemoral Joint Pain. *Journal of Orthopaedic Science*, **7**, 519-523. <https://doi.org/10.1007/s007760200092>
- [28] Murata, Y., Takahashi, K., Yamagata, M., Hanaoka, E. and Moriya, H. (2003) The Knee-Spine Syndrome. Association between Lumbar Lordosis and Extension of the Knee. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume*, **85**, 95-99. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.85b1.13389>
- [29] Amarasinghe, P., Wadugodapitiya, S. and Weerasekara, I. (2023) Biomechanical and Clinical Relationships between Lower Back Pain and Knee Osteoarthritis: A Systematic Review. *Systematic Reviews*, **12**, Article No. 28. <https://doi.org/10.1186/s13643-022-02164-3>
- [30] Fu, P., Xu, W., Xu, P., Huang, J. and Guo, J.J. (2023) Relationship between Spinal Imbalance and Knee Osteoarthritis by Using Full-Body EOS. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **24**, Article No. 402. <https://doi.org/10.1186/s12891-023-06508-5>
- [31] Wang, J., Ushirozako, H., Yamato, Y., Hasegawa, T., Yoshida, G., Banno, T., *et al.* (2023) Why Does Knee Flexion in the Standing Position Occur? Spinal Deformity or Knee Osteoarthritis. *Journal of Orthopaedic Surgery*, **31**. <https://doi.org/10.1177/10225536231169575>
- [32] Balmaceno-Criss, M., Lafage, R., Alsoof, D., Daher, M., Hamilton, D.K., Smith, J.S., *et al.* (2024) Impact of Hip and Knee Osteoarthritis on Full Body Sagittal Alignment and Compensation for Sagittal Spinal Deformity. *Spine*, **49**, 743-751. <https://doi.org/10.1097/brs.0000000000004957>
- [33] Kim, S.C., Kim, J.S., Choi, H.G., Kim, T.W. and Lee, Y.S. (2020) Spinal Flexibility Is an Important Factor for Improvement in Spinal and Knee Alignment after Total Knee Arthroplasty: Evaluation Using a Whole Body EOS System. *Journal of Clinical Medicine*, **9**, Article No. 3498. <https://doi.org/10.3390/jcm9113498>
- [34] Sheppard, W.L., Chiou, D., Upfill-Brown, A., Shah, A., Edogun, E., Sassoon, A., *et al.* (2023) Spondylolisthesis and Mismatch Deformity Affect Outcomes after Total Knee Arthroplasty. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **18**, Article No. 157. <https://doi.org/10.1186/s13018-023-03605-y>
- [35] Li, H., Zhu, F., Liao, S., Wang, X., Zhong, Y., Wen, X., *et al.* (2022) Higher Pelvic Incidence Was Associated with a Higher Risk of Sagittal Malposition of Femoral Component and Poor Outcomes of Primary Total Knee Arthroplasty: A Retrospective Cohort Analysis. *The Journal of Knee Surgery*, **36**, 806-813. <https://doi.org/10.1055/s-0042-1743494>
- [36] Okamoto, Y., Wakama, H., Matsuyama, J., Nakamura, K., Otsuki, S. and Neo, M. (2022) The Significance of the Pelvic Incidence Measurement as a Possible Predictor of TKA Outcome. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, **31**, 3106-3115. <https://doi.org/10.1007/s00167-022-07224-8>
- [37] Hanada, M., Hotta, K. and Matsuyama, Y. (2024) Impact of the Sagittal Spinopelvic and Coronal Lower Extremity Alignments on Clinical Outcomes after Medial Unicompartmental Knee Arthroplasty. *Journal of Orthopaedics*, **54**, 131-135. <https://doi.org/10.1016/j.jor.2024.03.027>
- [38] Kuwahara, W., Nakanishi, K., Kurumadani, H., Shimada, N., Asaeda, M., Deie, M., *et al.* (2020) Total Knee Arthroplasty for Patients with Medial Knee Osteoarthritis Improves Trunk Movement during Gait. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation*, **33**, 727-734. <https://doi.org/10.3233/bmr-181383>
- [39] Heil, L., Maltry, L., Lehmann, S., Heil, D., Lehmann, C., Kopp, S., *et al.* (2019) The Impact of a Total Knee Arthroplasty on Jaw Movements, Upper Body Posture, Plantar Pressure Distribution, and Postural Control. *CRANIO®*, **39**, 35-46. <https://doi.org/10.1080/08869634.2019.1574999>
- [40] Kim, H.J., Yang, J.H., Chang, D., Suh, S.W., Jo, H., Kim, S., *et al.* (2021) Impact of Preoperative Total Knee Arthroplasty on Radiological and Clinical Outcomes of Spinal Fusion for Concurrent Knee Osteoarthritis and Degenerative Lumbar Spinal Diseases. *Journal of Clinical Medicine*, **10**, Article No. 4475. <https://doi.org/10.3390/jcm10194475>
- [41] Shichman, I., Ben-Ari, E., Sissman, E., Singh, V., Hepinstall, M. and Schwarzkopf, R. (2022) Total Knee Arthroplasty in Patients with Lumbar Spinal Fusion Leads to Significant Changes in Pelvic Tilt and Sacral Slope. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, **143**, 2103-2110. <https://doi.org/10.1007/s00402-022-04462-w>
- [42] Daher, M., Daniels, A.H., Knebel, A., *et al.* (2024) Impact of Knee Osteoarthritis and Arthroplasty on Full Body Sagittal Alignment in Adult Spinal Deformity Patients. *Spine (Phila Pa 1976)*, **50**, 508-514.
- [43] Hambrecht, J., Köhli, P., Chiapparelli, E., Zhu, J., Guven, A.E., Evangelisti, G., *et al.* (2025) The Spinopelvic Alignment in Patients with Prior Knee or Hip Arthroplasty Undergoing Elective Lumbar Surgery. *The Spine Journal*, **25**, 45-54. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2024.08.025>
- [44] Kitagawa, A., Yamamoto, J., Toda, M. and Hashimoto, Y. (2021) Spinopelvic Alignment and Low Back Pain before and after Total Knee Arthroplasty. *Asian Spine Journal*, **15**, 9-16. <https://doi.org/10.31616/asj.2019.0359>
- [45] Puthiyapura, L.K., Jain, M., Tripathy, S.K. and Puliappadamb, H.M. (2022) Effect of Osteoarthritic Knee Flexion Deformity Correction by Total Knee Arthroplasty on Sagittal Spinopelvic Alignment in Indian Population. *World Journal of Clinical Cases*, **10**, 7348-7355. <https://doi.org/10.12998/wjcc.v10.i21.7348>