

全膝关节置换术中下肢对线方式的研究进展

尹志文, 田最, 王泽华, 向川

(山西医科大学第二医院骨科, 山西 太原 030001)

【摘要】 膝骨关节炎已成为当今老年人常见疾病之一, 目前, 对于终末期膝骨关节炎, 行全膝关节置换术(total knee arthroplasty, TKA)是最为有效的治疗手段。在 TKA 中, 下肢力线的有效恢复则是手术成功的关键因素之一, 极大影响患者术后的临床效果及假体存活率。最早被提出、认可并被广泛应用于 TKA 的对线方式是机械对线。近年来, 随着对下肢力线的深入研究及计算机技术的迅速发展, TKA 对线技术实现了由“统一化”向“个性化”, 二维向三维的转变, 调整机械对线、解剖学对线、运动学对线、反向运动学对线、限制运动学对线及功能学对线等新的对线方式被相继提出, 为外科医师提供了更多选择。但对于何种对线方式是最佳选择, 目前尚未有定论。本文对目前 TKA 中各种对线方式的研究现状及优缺点进行总结阐述, 旨在为临床上 TKA 中对线方式的选择提供一定参考。

【关键词】 全膝关节置换术; 机械对线; 解剖学对线; 运动学对线; 功能学对线; 综述文献

中图分类号: R687.4+2

DOI: 10.12200/j.issn.1003-0034.20220902

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress of lower extremity alignment in total knee arthroplasty

YIN Zhi-wen, TIAN Zui, WANG Ze-hua, XIANG Chuan (Department of Orthopaedics, The Second Hospital of Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, Shanxi, China)

ABSTRACT Knee osteoarthritis has become one of the common diseases of the elderly, total knee arthroplasty (TKA) is the most effective treatment for end-stage knee osteoarthritis at present. In TKA, the effective restoration of the lower extremity alignment is one of the key factors for the success of the operation, which greatly affects the postoperative clinical effect and prosthesis survival rate of patients. Mechanical alignment is a TKA alignment method which is first proposed, recognized and widely used in TKA. In recent years, with the in-depth research on the lower limb alignment and the rapid development of computer technology, the alignment technology in TKA has realized the transformation from "unified" to "individualized", two-dimensional to three-dimensional. New alignment methods, such as adjusted mechanical alignment, anatomic alignment, kinematic alignment, inverse kinematic alignment, restricted kinematic alignment and functional alignment have been proposed to provide surgeons with more choices. However, there is no conclusion on which alignment method is the best choice. This paper summarizes the current research status, advantages and disadvantages of various alignment methods in TKA, and aims to provide some reference for the selection of alignment methods in TKA.

KEYWORDS Total knee arthroplasty; Mechanical alignment; Anatomic alignment; Kinematic alignment; Functional alignment; Review literatur

随着全膝关节置换术(total knee arthroplasty, TKA)的诞生及不断改进, 目前已经成为治疗终末期膝关节疾病的首选方法^[1], 在 TKA 中下肢力线的恢复情况被认为是影响术后临床疗效的重要因素, 下肢力线改善不良将会导致关节不稳、假体松动、聚乙烯衬垫加速磨损等并发症, 这也是导致 TKA 失败的主要原因^[2-3]。目前, 大多数关节外科医生倾向于接受 TKA 中将下肢力线恢复机械中性对齐, 大部分患者术后可获得较好的满意度, 有效的缓解膝关节症状, 但对于部分患者, 效果并不乐观^[4]。随着对下肢

力线的深入研究, 国内外学者相继提出了调整机械对线、解剖学对线、运动学对线、反向运动学对线、限制运动学对线及功能学对线等新的对线方式^[5-7], 以期获得更好的临床效果。但迄今为止, 哪种对线方式才是 TKA 中最佳选择尚未有定论, 本文就 TKA 术中各种对线方式的研究现状作一综述。

1 机械对线与调整机械对线

机械对线(mechanical alignment, MA)的概念最早于 1973 年由 FREEMAN 等^[8]提出, 是指术中股骨远端和胫骨近端截骨面均垂直于下肢机械轴线, 从而使下肢轴线与关节线垂直并穿过膝关节中心。其目的在于创造一个“生物力学友好型”的人工膝关节, 而不是恢复患者的生理解剖结构^[6,9-10]。良好的机

通讯作者: 向川 E-mail: chuanxiang@sxmu.edu.cn

Corresponding author: XIANG Chuan E-mail: chuanxiang@sxmu.edu.cn

械对线被认为可以使压力在膝关节内外侧间室之间更加均匀地分布,有效防止早期假体松动及聚乙烯衬垫磨损,获得较好的长期假体生存率^[11]。为证实这一观点,FANG 等^[12]对 1983 年至 2006 年共 3 992 例患者(共进行 6 070 例 TKA)进行了随访分析,其中符合严格机械中性对线组的翻修率仅为 0.5% (21/4 029),低于内翻组的 1.8% (18/1 222)与外翻组的 1.5% (12/819),且 20 年后假体生存率为 99%,高于内翻组与外翻组的 95%。CHOONG 等^[13]的研究也发现,TKA 中精确的机械对线与患者术后的功能和生活质量呈正相关,在术后 6 周内,机械对齐良好的患者国际膝关节学会(the International Knee Society, IKS)膝关节功能评分显著优于机械对齐较差的患者。在 3、6 和 12 个月的随访中,SF-12 评分也明显更好。但 COLLINS 等^[14]提出,与全髋关节置换术相比,TKA 的临床效果并不尽如人意,值得进一步关注与改进。然而,令人失望的是,随着几十年来膝关节假体的不断改进,计算机导航等辅助技术的发展,假体植入精度不断提高,增加了实现 0°髌-膝-踝角度的再现性,但仍有 20%的患者不满意率^[15],这可能与追求标准的机械对线,会导致过度矫正,影响膝关节及相邻关节功能有关^[16]。因此,有学者对机械对齐的合理性产生了质疑,NAM 等^[17]的一项多中心研究显示,在完成了全部随访的 661 例受试者中,仅有 66%认为术后他们的膝关节是“正常”的,且存在有 33%到 54%不等的疼痛,僵直,弹响等一系列残余症状。这对机械对线这一“金标准”提出了挑战。

此外,并非所有正常健康成人的下肢机械轴都是完全中立位对线,而是存在一定程度的固有内翻。既往^[18]对 198 例 20~40 岁的健康的亚洲(印度和韩国)成年人(共 388 膝)的下肢力线进行了研究,发现其中约有 34.5%的肢体存在固有内翻。BELLEMANS 等^[4]也得到了类似的结论,在对 250 例 20~27 岁的成年人下肢力线进行研究中,有 32%的男性和 17%的女性都存在一定程度的固有内翻。对于这些固有内翻较大的患者,在术中完全恢复机械中性对齐可能并不是最佳选择,因为其会导致韧带和软组织的过度松解。VANLOMMELE 等^[19]在对术前患有内侧关节炎和膝内翻对齐的患者进行 5~9 年的中期随访后,发现术后保留轻度内翻对齐的患者临床结果更好。对此,有学者提出了调整机械对线的概念,即胫骨截骨面仍与轴线垂直,通过轻微内翻的股骨截骨来实现在不过度松解软组织及韧带的情况下,在手术肢体上保留 2°~3°的残余内翻^[20]。然而,目前对于调整机械对线技术的研究与应用较少,其临床效益未得到有效地证实。

2 解剖学对线

解剖学对线(anatomic alignment, AA)这一概念于 20 世纪 80 年代由 HUNGERFORD 等^[21]提出,即在术中截骨时胫骨部分内翻截骨,股骨部分外翻截骨,创造一个相对下肢机械轴有 2°~3°夹角的关节线。该对线方式对膝关节固有解剖结构的改变较机械对线小,使压力负荷在胫骨组件上更合理的分布^[22],且降低了膝关节屈曲时外侧支持带的过度拉伸,使术后髌股关节的对位更加良好^[23]。INCAVO 等^[24]证实了在膝关节屈曲 0°和 90°时,解剖对齐产生了极佳的平衡(<2 mm 内侧-外侧差异),机械对齐则在膝关节屈曲 0°和 90°时产生了至少 3 mm 的横向松弛。不足的是,在中度屈曲时(50°~70°),解剖对齐与机械对齐一样会导致侧副韧带的松弛。在上世纪,由于该技术实际操作较困难,常常会导致股骨侧的过度截骨,提升了手术失败的风险^[25],加之假体选择的限制,因此未得到很好的发展。如今,计算机导航技术的广泛应用使该技术再次得到关注,但 YIM 等^[26]对被随机分配采用 MA (56 例)或 AA (61 例)进行机器人辅助 TKA 的 117 例患者研究发现,两组之间没有显著的临床差异。同时,新的假体 the Journey Bi-Cruciate Stabilized (BCS) knee Systems 也随之出现,其假体本身被设计成存在 3°倾斜的关节线,即聚乙烯衬垫内侧和外侧厚度以及股骨髁内侧和外侧的厚度之间存在约 2.5 mm 的差异,从而使术者使用等同于机械对齐的截骨技术便可达到解剖对齐^[27]。另一个值得思考的问题是,解剖对线技术默认所有患者生理内倾为 3°,未考虑到不同个体的差异性,因从并未完全恢复所有患者的术前生理内倾。

3 运动学对线、反向运动学对线与限制运动学对线

对于膝关节中决定运动的 3 个运动轴的深入认识^[28],促使人们对之前下肢对线技术的局限性进行了新的审视。运动学对线(kinematic alignment, KA)的理念由 HOWELL 等^[29]等提出。其目的是在不进行韧带松解的情况下,通过去除与假体植入物厚度相当的软骨和骨的厚度来恢复患者膝关节关节炎前的正常状态,实现假体组件的 3 个轴(即胫骨屈伸轴、髌骨屈伸轴、胫骨内外旋轴)与正常膝关节的 3 个运动轴对齐。其本质上是一个动态和三维对齐^[30-32]。目前,特异性器械的使用与计算机导航技术的辅助使 KA 得以应用于临床^[33]。然而,由于应用时间较短,其临床价值一直存在争议。有观点认为,KA 可能会导致胫骨组件过度内翻倾斜,增加内侧间室磨损的可能^[34],此外,部分学者认为 KA 还会通过改变髌骨轨迹,增加髌骨-股骨关节应力,导致髌骨轨迹不良^[35],

不过目前尚未有有价值的研究能证实上述观点。相反, KLASAN 等^[36]的研究显示, KA 在 10 种不同膝关节表型的经过验证的有限元分析模型中, 通过在整个步态周期中增加或保持接触面积, 从而降低聚乙烯衬垫的接触压力。LEE 等^[37]的研究表明 KA 相较于 MA 而言, 在中期的随访中获得了类似或者稍好的临床结果, 且没有影响假体的生存率, 多项荟萃分析^[38-39]也得到了与此基本一致的结果。LIU 等^[40]最新的涉及 14 个随机对照试验, 纳入总样本量 1 112 例的荟萃分析发现, KA 组出院前步行距离, 功能评分高于 MA 组, 且在术后并发症发生率, 假体生存率等方面与 MA 组基本持平。同时, BLAKENEY 等^[41]的一项回顾性病例对照研究发现 KA 能够更好地恢复术后步态参数, MA 组与健康组相比, 矢状面活动范围减少 (49.1° vs. 54.0° , $P=0.020$), 最大屈曲度降低 (52.3° vs. 57.5° , $P=0.002$), 内收角度增加 (2.0° ~ 7.5° vs. 2.8° ~ 3.0° , $P<0.05$), 胫骨外旋转增加 ($2.3\pm 0.7^{\circ}$, $P<0.001$), 而 KA 组则与健康组无明显差异。最近, 反向运动学对线 (inverse kinematic alignment, iKA) 这一新概念也被提出, 与传统运动学对线保持原有的股骨关节线倾斜度, 通过胫骨切除达到间隙平衡相反, iKA 的原理则是保持原始胫骨关节线的倾斜度, 通过股骨切除来达到间隙平衡^[42]。其更好的临床效果在既往的研究^[7,43]中得到初步证实, 但除此之外, 由于其提出时间较短, 暂时没有其它临床研究被实施来进一步评估其优越性。

KA 技术的目标是恢复患者关节炎前的解剖状态。然而, 人群中正常膝关节解剖结构差异很大, 由于先天或后天的各种因素, 部分患者术前的膝关节解剖结构存在极端的异常。若继续盲目遵循 KA 技术, 将会重建一个与术前同样异常的膝关节, 这可能会导致严重的不良后果^[44]。对此, 有学者提出了限制运动学对线 (restricted kinematic alignment, rKA) 的概念, 即在一定的安全范围内重现患者的膝关节解剖^[45]。其主要遵循 5 个原则: (1) 整体下肢冠状位对齐在 $\pm 3^{\circ}$ 以内。(2) 股骨和胫骨假体的冠状位对齐在 $\pm 5^{\circ}$ 以内。(3) 恢复膝关节自然软组织张力。(4) 优先保留股骨解剖结构。(5) 当需要进行解剖调整时, 应选择最完整的一侧膝关节间室作为枢轴点使用^[44]。BLAKENEY 等^[46]通过扫描创建三维骨骼模型的模拟实验, 证实了 rKA 技术显著改善了 MA 技术在伸展和屈伸间隙、内侧和外侧间室造成的 ≥ 3 mm 不平衡, MACDESSI 等^[47]的一项随机对照研究也得到了类似的结果。另外, 假体的选择似乎会影响 rKA 技术的效果, SAPPEY-MARINIER 等^[48]的病例对照研究显示: 当使用后稳定型 (posterior stabilized, PS) 假

体时, rKA 组较 MA 组胫骨假体松动的风险增加。

4 功能学对线

功能学对线 (functional alignment, FA) 目的是恢复患者关节线高度及固有关节线倾角, 通过调整骨切除量和假体植入位置, 在尽可能减少了术中关节周围软组织松解情况下实现屈伸平衡间隙^[49]。FA 可看作是基于 KA 的一种改进, CLARK 等^[50]的研究证明, 利用个性化的 KA 计划, 可以更好地实现 FA, 以达到更好地膝关节平衡。KA 的发展得益于各种新兴的机器人辅助技术, 如 ROSA 膝关节系统等^[51]。该技术相较于传统技术“先截骨, 后评估”来说, 其最大的优势在于外科医生实现了在术中实时评估并根据评估结果调整截骨厚度、关节间隙和肢体对齐等^[52]。目前, 对于 FA 的研究较少, CHANG 等^[53]通过术中压力传感器的评估, 证实了 FA-TKA 技术实现了中等外侧软组织张力的平衡。ZAMBIANCHI 等^[54]一项回顾性队列研究则证实了其有效的恢复了关节线。此外, 为了更好地了解 FA-TKA 能否提高手术质量, 改善患者预后及减少并发症, KAYANI 等^[55]一项前瞻性双盲随机对照试验也正在进行中, 这是第一个描述使用机器人技术实现 FA-TKA 的研究, 也是目前唯一一个比较机器人 MA-TKA 和机器人 FA-TKA 的临床试验。

5 总结

TKA 中下肢对线方式的选择一直存在争议, 引发了国内外学者的广泛讨论。过去几十年中, MA 是最被大部分外科医生所接受的对线方式, 甚至在早期被奉为“金标准”, 且其较为可观的临床效果也被诸多研究所证实。但随着该技术的不断发展, 假体植入精度的不断提高, 患者的满意度并没有明显提升, 这说明 MA 技术可能存在“天花板效应”。rMA 作为其补充与改良, 目前也还未有明确的临床效果。为了恢复患者的固有解剖结构, AA、KA 等技术被相继提出, 为下肢对线方式提供了新思路, 但 AA 将所有患者关节线倾斜度统一, 因此并未完全恢复所有患者的生理内倾, 且由于截骨难度及假体限制, 其存在早期胫骨组件失效的风险。KA 则更好地考虑到了患者的个体化差异, 另外对于部分术前存在极端解剖的患者, rKA 为其提供了折衷的解决方案, 随着计算机导航技术的发展和新型假体设计, 未来可能会成为 TKA 的主流对线方式。而最新被提出的 FA 技术, 极大地规避了术中过度的软组织松解同时达到了精确的对线, 但由于提出时间较短, 可能需要更长的随访和更大的队列研究来证明其优越性, 此外, 其产生的高额治疗费用也应被考虑到。总体来说, TKA 中对线方式的不应该是绝对的, 需要外科医生根据患者

自身状况,经济条件及当下的医疗资源综合评估,选择相对来说最合适的对线方式,以期达到更好的临床效果。对于各种对线方式的研究也应继续深入,以期更好地指导临床。

参考文献

- [1] SALZMANN M, FENNEMA P, BECKER R, et al. Does postoperative mechanical axis alignment have an effect on clinical outcome of primary total knee arthroplasty? A retrospective cohort study [J]. *Open Orthop J*, 2017, 11: 1330–1336.
- [2] SCHIFFNER E, WILD M, REGENBRECHT B, et al. Neutral or natural? Functional impact of the coronal alignment in total knee arthroplasty [J]. *J Knee Surg*, 2019, 32(8): 820–824.
- [3] 刘欣, 郭升杰, 李帅杰, 等. 人工全膝关节置换术中胫骨假体旋转对线方法研究进展 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2020, 34(9): 1200–1204.
LIU X, GUO S J, LI S J, et al. Progress in the method of tibial prosthesis rotation alignment in total knee arthroplasty [J]. *Chin J Reparative Reconstr Surg*, 2020, 34(9): 1200–1204. Chinese.
- [4] BELLEMANS J, COLYN W, VANDENNEUCKER H, et al. The Chitranjan Ranawat award: is neutral mechanical alignment normal for all patients? The concept of constitutional varus [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2012, 470(1): 45–53.
- [5] WEBER P, GOLLWITZER H. Kinematic alignment in total knee arthroplasty [J]. *Oper Orthop Traumatol*, 2021, 33(6): 525–537.
- [6] RIVIÈRE C, IRANPOUR F, AUVINET E, et al. Alignment options for total knee arthroplasty: a systematic review [J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2017, 103(7): 1047–1056.
- [7] WINNOCK DE GRAVE P, KELLENS J, LUYCKX T, et al. Inverse kinematic alignment for total knee arthroplasty [J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2022, 108(5): 103305.
- [8] FREEMAN M A, SWANSON S A, TODD R C. Total replacement of the knee using the Freeman–Swanson knee prosthesis [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1973(94): 153–170.
- [9] SAPPEY–MARINIER E, BATAILLER C, SWAN J, et al. Mechanical alignment for primary TKA may change both knee phenotype and joint line obliquity without influencing clinical outcomes: a study comparing restored and unrestored joint line obliquity [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2022, 30(8): 2806–2814.
- [10] SCUDERI G R, SCOTT W N, TCHEJEYAN G H. The Insall legacy in total knee arthroplasty [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2001(392): 3–14.
- [11] PATIL S, MCCAULEY J C, PULIDO P, et al. How do knee implants perform past the second decade? Nineteen– to 25–year followup of the Press-fit Condylar design TKA [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2015, 473(1): 135–140.
- [12] FANG D M, RITTER M A, DAVIS K E. Coronal alignment in total knee arthroplasty: just how important is it [J]. *J Arthroplasty*, 2009, 24(6 Suppl): 39–43.
- [13] CHOONG P F, DOWSEY M M, STONEY J D. Does accurate anatomical alignment result in better function and quality of life? Comparing conventional and computer-assisted total knee arthroplasty [J]. *J Arthroplasty*, 2009, 24(4): 560–569.
- [14] COLLINS M, LAVIGNE M, GIRARD J, et al. Joint perception after hip or knee replacement surgery [J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2012, 98(3): 275–280.
- [15] SPRINGER B D, PARRATTE S, ABDEL M P. Measured resection versus gap balancing for total knee arthroplasty [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2014, 472(7): 2016–2022.
- [16] 汪小健, 吕帅洁, 李少广, 等. 全膝关节置换术中下肢机械轴的研究进展 [J]. *中国骨伤*, 2021, 7(2): 191–194.
WANG X J, LYU S J, LI S G, et al. Progress on femorotibial mechanical axis of total knee arthroplasty [J]. *China J Orthop Traumatol*, 2021, 7(2): 191–194. Chinese.
- [17] NAM D, NUNLEY R M, BARRACK R L. Patient dissatisfaction following total knee replacement: a growing concern [J]. *Bone Joint J*, 2014, 96–B(11 Suppl A): 96–100.
- [18] SHETTY G M, MULLAJI A, BHAYDE S, et al. Factors contributing to inherent varus alignment of lower limb in normal Asian adults: role of tibial plateau inclination [J]. *Knee*, 2014, 21(2): 544–548.
- [19] VANLOMMEL L, VANLOMMEL J, CLAES S, et al. Slight under-correction following total knee arthroplasty results in superior clinical outcomes in varus knees [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2013, 21(10): 2325–2330.
- [20] HOMMEL H, TSAMASSIOTIS S, FALK R, et al. Adjusted mechanical alignment: operative technique—Tips and tricks [J]. *Orthopade*, 2020, 49(7): 562–569.
- [21] HUNGERFORD D S, KENNA R V, KRACKOW K A. The porous-coated anatomic total knee [J]. *Orthop Clin North Am*, 1982, 13(1): 103–122.
- [22] KLATT B A, GOYAL N, AUSTIN M S, et al. Custom-fit total knee arthroplasty (OtisKnee) results in malalignment [J]. *J Arthroplasty*, 2008, 23(1): 26–29.
- [23] GHOSH K M, MERICAN A M, IRANPOUR–BOROUJENI F, et al. Length change patterns of the extensor retinaculum and the effect of total knee replacement [J]. *J Orthop Res*, 2009, 27(7): 865–870.
- [24] INCAVO S J, SCHMID S, SREENIVAS K, et al. Total knee arthroplasty using anatomic alignment can produce mid-flexion laxity [J]. *Clin Biomech*, 2013, 28(4): 429–435.
- [25] RITTER M A, DAVIS K E, MEDING J B, et al. The effect of alignment and BMI on failure of total knee replacement [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2011, 93(17): 1588–1596.
- [26] YIM J H, SONG E K, KHAN M S, et al. A comparison of classical and anatomical total knee alignment methods in robotic total knee arthroplasty: classical and anatomical knee alignment methods in TKA [J]. *J Arthroplasty*, 2013, 28(6): 932–937.
- [27] MUGNAI R, DIGENNARO V, ENSINI A, et al. Can TKA design affect the clinical outcome? Comparison between two guided-motion systems [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2014, 22(3): 581–589.
- [28] ECKHOFF D G, BACH J M, SPITZER V M, et al. Three-dimensional mechanics, kinematics, and morphology of the knee viewed in virtual reality [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2005, 87(Suppl 2): 71–80.
- [29] HOWELL S M, HODAPPE E E, KUZNIK K, et al. In vivo adduction and reverse axial rotation (external) of the tibial component can be minimized [J]. *Orthopedics*, 2009, 32(5): 319.
- [30] SCHIRALDI M, BONZANINI G, CHIRILLO D, et al. Mechanical and kinematic alignment in total knee arthroplasty [J]. *Ann Transl Med*, 2016, 4(7): 130.
- [31] RIVIÈRE C, IRANPOUR F, HARRIS S, et al. The kinematic

- alignment technique for TKA reliably aligns the femoral component with the cylindrical axis[J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2017, 103(7):1069-1073.
- [32] 彭慧明, 蒋超, 翁习生. 运动力学对线在初次全膝关节置换术中的应用研究进展[J]. *中华骨与关节外科杂志*, 2017, 10(5):446-449.
- PENG H M, JIANG C, WENG X S. Development of kinematical alignment in primary total knee arthroplasty[J]. *Chin J Bone Jt Surg*, 2017, 10(5):446-449. Chinese.
- [33] HUTT J R, LEBLANC M A, MASSÉ V, et al. Kinematic TKA using navigation: surgical technique and initial results[J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2016, 102(1):99-104.
- [34] YOON J R, HAN S B, JEE M K, et al. Comparison of kinematic and mechanical alignment techniques in primary total knee arthroplasty: a meta-analysis[J]. *Medicine*, 2017, 96(39):e8157.
- [35] 张国栋, 杨晨, 杨光, 等. 膝关节表面置换术中运动力学对线的应用与发展[J]. *中国骨伤*, 2015, 28(12):1162-1165.
- ZHANG G D, YANG C, YANG G, et al. Application and development of kinematical alignment during total knee arthroplasty[J]. *China J Orthop Traumatol*, 2015, 28(12):1162-1165. Chinese.
- [36] KLASAN A, KAPSHAMMER A, MIRON V, et al. Kinematic alignment in total knee arthroplasty reduces polyethylene contact pressure by increasing the contact area, when compared to mechanical alignment—a finite element analysis[J]. *J Pers Med*, 2022, 12(8):1285.
- [37] LEE Y S, HOWELL S M, WON Y Y, et al. Kinematic alignment is a possible alternative to mechanical alignment in total knee arthroplasty[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2017, 25(11):3467-3479.
- [38] WOON J T K, ZENG I S L, CALLIESS T, et al. Outcome of kinematic alignment using patient-specific instrumentation versus mechanical alignment in TKA: a meta-analysis and subgroup analysis of randomised trials[J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2018, 138(9):1293-1303.
- [39] LI Y H, WANG S K, WANG Y L, et al. Does kinematic alignment improve short-term functional outcomes after total knee arthroplasty compared with mechanical alignment? A systematic review and meta-analysis[J]. *J Knee Surg*, 2018, 31(1):78-86.
- [40] LIU B F, FENG C Y, TU C. Kinematic alignment versus mechanical alignment in primary total knee arthroplasty: an updated meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *J Orthop Surg Res*, 2022, 17(1):201.
- [41] BLAKENEY W, CLÉMENT J, DESMEULES F, et al. Kinematic alignment in total knee arthroplasty better reproduces normal gait than mechanical alignment[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2019, 27(5):1410-1417.
- [42] LUSTIG S, SAPPEY-MARINIER E, FARY C, et al. Personalized alignment in total knee arthroplasty: current concepts[J]. *SICOT J*, 2021, 7:19.
- [43] WINNOCK DE GRAVE P, LUYCKX T, CLAEYS K, et al. Higher satisfaction after total knee arthroplasty using restricted inverse kinematic alignment compared to adjusted mechanical alignment[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2022, 30(2):488-499.
- [44] VENDITTOLI P A, MARTINOV S, BLAKENEY W G. Restricted kinematic alignment, the fundamentals, and clinical applications[J]. *Front Surg*, 2021, 8:697020.
- [45] BLAKENEY W G, VENDITTOLI P A. Restricted Kinematic Alignment: the Ideal Compromise[M]//*Personalized Hip and Knee Joint Replacement*. Cham: Springer, 2020:197-206.
- [46] BLAKENEY W, BEAULIEU Y, KISS M O, et al. Less gap imbalance with restricted kinematic alignment than with mechanically aligned total knee arthroplasty: simulations on 3-D bone models created from CT-scans[J]. *Acta Orthop*, 2019, 90(6):602-609.
- [47] MACDESSI S J, GRIFFITHS-JONES W, CHEN D B, et al. Restoring the constitutional alignment with a restrictive kinematic protocol improves quantitative soft-tissue balance in total knee arthroplasty: a randomized controlled trial[J]. *Bone Joint J*, 2020, 102-B(1):117-124.
- [48] SAPPEY-MARINIER E, SHATROV J, BATAILLER C, et al. Restricted kinematic alignment may be associated with increased risk of aseptic loosening for posterior-stabilized TKA: a case-control study[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2022, 30(8):2838-2845.
- [49] BEGUM F A, KAYANI B, MAGAN A A, et al. Current concepts in total knee arthroplasty: mechanical, kinematic, anatomical, and functional alignment[J]. *Bone Jt Open*, 2021, 2(6):397-404.
- [50] CLARK G, STEER R, WOOD D. Functional alignment achieves a more balanced total knee arthroplasty than either mechanical alignment or kinematic alignment prior to soft tissue releases[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2023, 31(4):1420-1426.
- [51] BATAILLER C, HANNOUCHE D, BENAZZO F, et al. Concepts and techniques of a new robotically assisted technique for total knee arthroplasty: the ROSA knee system[J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2021, 141(12):2049-2058.
- [52] OUSSEDIK S, ABDEL M P, VICTOR J, et al. Alignment in total knee arthroplasty[J]. *Bone Joint J*, 2020, 102-B(3):276-279.
- [53] CHANG J S, KAYANI B, WALLACE C, et al. Functional alignment achieves soft-tissue balance in total knee arthroplasty as measured with quantitative sensor-guided technology[J]. *Bone Joint J*, 2021, 103-B(3):507-514.
- [54] ZAMBIANCHI F, BAZZAN G, MARCOVIGI A, et al. Joint line is restored in robotic-arm-assisted total knee arthroplasty performed with a tibia-based functional alignment[J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2021, 141(12):2175-2184.
- [55] KAYANI B, KONAN S, TAHMASSEBI J, et al. A prospective double-blinded randomised control trial comparing robotic arm-assisted functionally aligned total knee arthroplasty versus robotic arm-assisted mechanically aligned total knee arthroplasty[J]. *Trials*, 2020, 21(1):194.

(收稿日期:2022-10-17 本文编辑:朱嘉)