

· 综述 ·

开放获取

## 全膝置换术假体周围骨量丢失的研究进展<sup>△</sup>

何忠宝<sup>1</sup>, 陆声<sup>1</sup>, 舒钧<sup>2\*</sup>

(1. 云南省第一人民医院骨科, 云南昆明 650034; 2. 昆明医科大学第二附属医院骨科, 云南昆明 650034)

**摘要:** 全膝关节置换术 (total knee arthroplasty, TKA) 是膝关节相关疾病终末期的主要治疗方法。因此, 膝关节假体是否松动已成为决定膝关节置换术后成败的决定性因素, 假体周围骨量损失则成为重要的评价依据。此外, 骨量丢失通常发生在膝关节置换术的早期, 并且与假体的设计、手术技术、骨负荷状况以及功能锻炼有高度的相关性。尽管假体设计和手术技术不断进步, 但 TKA 目前仍存在假体松动的高风险。本文对全膝关节置换术后应力传递机制、颗粒、炎症、假体周围骨量损失评估、假体置入完成后修复标准等方面做一综述, 以期为临床上假体松动的预防提供参考。

**关键词:** 全膝置换术, 骨量, 假体松动, 翻修

**中图分类号:** R687.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2024) 09-0831-05

**Research progress on periprosthetic bone mass losing after total knee arthroplasty // HE Zhong-bao<sup>1</sup>, LU Sheng<sup>1</sup>, SHU Jun<sup>2</sup>. 1. The First People's Hospital of Yunnan Province, Kunming, 650034, China; 2. The Second Affiliated Hospital, Kunming Medical University, Kunming, 650034, China**

**Abstract:** Total knee arthroplasty (TKA) is the main treatment for the end-stage knee diseases currently. However, whether the knee prosthesis is loose has become a decisive factor to determine the success or failure of the surgical procedure, and the bone loss around the prosthesis has become an important evaluation basis. In addition, bone mass loss usually occurs in early stage secondary to TKA, which is highly correlated with implant design, surgical technique, bone loading status, and functional exercise. Despite advances in implant design and surgical techniques, TKA is still at high risk of loosening the implant. In this paper, the stress transfer mechanism, particles, inflammation, evaluation of bone loss around the prosthesis, and repair criteria after prosthetic implantation were reviewed, so as to provide reference for the prevention of prosthetic loosening in clinical settings.

**Key words:** total knee arthroplasty, bone mass, prosthetic loosening, revision

随着全球老龄化进程加速, 全膝关节置换术 (total knee arthroplasty, TKA) 在骨科手术的占比越来越高, 成为老年膝关节骨性关节炎的终末治疗方式。我国大陆地区关节置换手术例数达到 90 万例, 并每年增加将超过 20%<sup>[1]</sup>; 随着 TKA 手术例数的大量增加, 术后并发症的发生例数也呈快速增长趋势, 如假体松动发生率为 20.3%, 相应翻修手术数量也同样上升<sup>[2]</sup>。假体松动是导致膝关节不稳最主要的原因, 同样也是 TKA 术后翻修的主要适应证, 其发展与假体周围的骨量丢失关系密切<sup>[3, 4]</sup>。TKA 术后 3 个月假体周围骨量开始丢失, 通常在 3 年后逐渐恢复正常, 与手术技术 (假体配置与力线的偏移程度)、术后炎症反应、微动的机械应力和骨重建等因素密切相关<sup>[5]</sup>。

本文将膝关节假体周围骨量丢失的发生发展及预防进行综述。

### 1 假体周围骨量丢失的发生机制

#### 1.1 机械应力

导致假体周围骨量丢失的原因很多, 其中机械应力诱导骨溶解 (mechanically induced osteolysis, MIO) 理论已成为该领域的普遍共识<sup>[4]</sup>。膝关节假体置入初期的早期微动对假体/骨水泥与骨接触面的稳定性具有破坏性<sup>[5]</sup>, 假体或水泥与骨面因力学传递导致静态磨损, 部分骨小梁断裂直至溶解, 产生骨质丢失, 界面出现间隙, 持续微动导致物理性摩擦进一步加重,

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2024.09.11

<sup>△</sup>基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 81960268; 82172442)

作者简介: 何忠宝, 主治医师, 研究方向: 骨外科, (电子信箱) hezhongbao123@163.com

\* 通信作者: 舒钧, (电子信箱) 1498245422@qq.com

最终界面间隙增大而出现早期不稳定。Goodman<sup>[6]</sup>研究发现,骨面骨质丢失的结果会导致假体的沉降,需要翻修的概率将呈倍数增加。影像学及组织学研究证实了 MIO 理论,部分 TKA 术后病例在早期骨面形成侵蚀样改变,呈局灶性骨溶解,溶解区的进展速度与膝关节使用频率及强度,以及骨质情况相关,最终发展为无菌性松动<sup>[7,8]</sup>。

在实验研究中也证实了机械应力导致骨溶解。在机械应力的刺激下,不仅巨噬细胞的促进骨吸收的细胞因子表达量上升,并可以直接诱导破骨细胞的分化,微动的机械应力可以在短时间活化破骨细胞并诱导其骨的吸收能力<sup>[9-11]</sup>。骨细胞培养时进行流体压力干预下,通过 RANKL 等关键信号通路,导致破骨细胞进行聚集并活化,并且在研究中显示肿瘤坏死因子- $\alpha$  (tumor necrosis factor- $\alpha$ , TNF- $\alpha$ ), IL 家族 (interleukin 6, IL-6) 等炎症因子与骨吸收也存在一定关系<sup>[12-14]</sup>。机械应力通过反复的微运动刺激界面的骨组织成分,激活相关炎症反应及骨细胞代谢信号通路,活化破骨细胞,出现骨溶解,最终导致假体周围出现骨量丢失,是假体松动的分子生物学基础。

## 1.2 假体微粒

膝关节假体在前述的机械应力反复挤压、摩擦等作用下,会逐渐形成许多大小不等的假体微粒,而界面颗粒诱导与机械应力诱导有很多的相似性,两者的发生有相互促进作用,但两者在本质上是不同的<sup>[15,16]</sup>。关节置换术后均会产生界面微粒,与髌膝运动方式不同密切相关<sup>[17]</sup>。关节腔微粒依据其来源分为两种:假体-骨面来源、假体-假体面来源。

假体-骨面来源:假体与骨界面间微动。在机械应力-微动作用下,界面逐渐出现间隙,界面出现趋向摩擦,聚乙烯材料在氧化作用及摩擦力双重作用下出现分解,骨面骨小梁出现断裂,游离吸收,形成很少的微粒,由界面间隙游离至关节腔。假体-假体面来源:膝关节假体面之间的相互摩擦,包括假体黏附摩擦、微粒摩擦、假体表面疲劳及电化学磨损。膝关节比髌关节运动范围大,整体关节对合面更大,胫骨平台的旋转性导致股骨髁表面磨损更为明显,活动的频率更高,受到的摩擦作用更明显,关节活动所产生的聚乙烯微粒更小,更具有生物活性<sup>[18]</sup>。

膝关节运动呈机械滚动式,非球窝关系;股骨髁表面在不同膝关节体位时,其摩擦面是不同的,胫骨平台假体则需要不同体位与股骨髁形成接触,胫骨假体需要对髌假体 60% 以上的面产生摩擦<sup>[19]</sup>,因其接触的方式基本是点面接触(髌-平台),其摩擦力

比髌关节球窝的面面接触更大,接触的瞬间摩擦力更大,膝关节假体和界面的磨损明显要高于髌关节,摩擦力、运动方式及频率决定了膝关节假体界面微粒的直径更大,出现界面微粒的时间更早。

假体微粒形成条件较为复杂,假体表面的氧化作用也是导致聚乙烯材料分解产生微粒的条件之一,聚乙烯表面的氧化促使其更易在疲劳下出现分解,氧化促进了摩擦作用下的微粒产生<sup>[20]</sup>。膝关节假体的表面因机械应力产生的微粒大小及数量与假体设计也存在密切关系。通常在全髌置换中所使用的髌臼杯表面积是 TKA 术中胫骨假体表面积的 2 倍,微粒脱落的总数远大于髌关节<sup>[21]</sup>。膝关节腔的解剖结构(非严格对合)具有较高容纳性,为颗粒聚集创造了条件。

## 1.3 炎症反应

TKA 的假体为聚乙烯及合金等材料,在体内以异物的形式存在,依据宿主对其的反应,关节腔的微粒是 TKA 术后出现炎症反应的根本原因。在 TKA 中存在与髌关节置换一样的超敏反应(迟发型 T 细胞介导),金属假体在关节液的侵蚀和磨损下均会释放金属离子,其研究表明,这种超敏反应导致“过敏性松动”与临床调查结果并不吻合,金属产生离子并不是假体松动关键的原因,其他材料所形成的微粒为其主要因素及基础<sup>[22]</sup>。依据其微粒的来源、浓度与直径导致不同的免疫反应,相应启动损伤相关的分子模式(damage associated molecular patterns, DAMPs),微生物或病原微生物相关分子模式(microbe/pathogen-associated molecular patterns, M/PAMP),巨噬细胞/自然免疫细胞吞噬机制。微粒的存在刺激了炎症细胞或单核-巨噬细胞,产生大量的趋化因子、细胞因子、蛋白水解酶及前列腺素 E2 等炎症因子,诱导激活破骨细胞,在界面出现炎症反应,炎症反应最终在假体界面形成假滑膜,分泌大量关节液,增加界面的流体压力,刺激破骨细胞,扩大假体周围的吸收空间<sup>[23]</sup>。然而基于假体磨损产生的微粒刺激免疫反应在界面形成局部骨吸收优势,促进了假体周围骨丢失及假体松动。

对于不同直径微粒处理方式不同,25  $\mu\text{m}$  以内的微粒由巨噬细胞吞噬,>25  $\mu\text{m}$  的微粒将由异物巨细胞包裹,促进炎症介质 IL-1 的释放;然而体外细胞实验发现吞噬微粒的巨噬细胞不会产生细胞毒性,并明显延长存活时间<sup>[24]</sup>。长期的炎症反应,致使界面出现慢性持续的炎症细胞积聚,假体表面因长期慢性炎症出现假体抗疲劳性能降低,骨面破骨细胞大量积聚,促进骨小梁的吸收,界面间隙在炎症反应下形成

生物膜, 间隙不断扩大, 骨质大量丢失, 炎症反应诱导大量肉芽组织在界面间隙生长, 因为假体周围出现炎症反应, 膝关节周围的软组织可能出现炎症反应的早期症状, 对冷热反应及活动时出现不适感, 下肢力线随之出现偏移, 为假体松动提供了基础条件。

## 2 假体周围骨量丢失的评估

### 2.1 症状评估

在假体周围骨量丢失出现后, 使得假体无法获得稳定固定基座, 并且导致假体的位置出现偏移, 从而不能维持骨-假体面的稳定。在骨量丢失早期并没有明显的症状, 只是在出现局部微小的炎症反应时可能表现出极其常见的症状, 局部感到不适, 然而没有疼痛等症状。随着骨量丢失的加剧, 因溶骨效应导致骨小梁断裂, 区域软组织炎症反应加重, 出现轻微疼痛(隐痛), 局部微肿等非典型症状。当骨量丢失已引起假体开始出现松动时, 其症状具有典型性, 疼痛更为明显, 在膝关节负重及活动时加重, 休息时依然存在; 膝关节活动受限, 因为界面的间隙已足够大, 假体随关节活动出现局部甚至整体滑动, 膝关节较大角度屈伸及旋转均会受到限制<sup>[25]</sup>。膝关节假体置换后骨量丢失的临床症状并不具有典型性, 患者自我发现和临床早期诊断非常困难, 常需要进行辅助检查以评估其严重程度。

### 2.2 影像学评估

在 TKA 术后常规使用 DR 进行复查, 可以较为清晰地观察假体状态及术区骨组织情况, 包括界面间隙, 但由于其为二维图像, 无法真实并全面提供假体周围的全部影像。CT 及 MR 的去金属伪影技术不仅可以提供三维图像, 还可以清晰地显示骨质面情况, 被用于术后早期骨量丢失的定性分析<sup>[26, 27]</sup>。定量分析在早期骨量丢失的评估中不可缺少, 能谱成像技术(gemstone spectral imaging, GSI) 通过多能谱 CT 进行扫描, GSI 对骨成分(羟基磷石灰)进行定量分析, 可以获得局部的骨密度<sup>[28]</sup>。

### 2.3 翻修评估标准

骨量丢失相关的假体不稳症状及关节功能丢失已严重影响日常生活时, 常规需要进行膝关节翻修, 以改善症状并恢复关节功能。安德森骨科研究所标准(Anderson Orthopaedic Research Institute, AORI) 普遍被全球骨科关节外科医生认可<sup>[29]</sup>, 膝关节翻修标准的分类以股骨和胫骨的骨质丢失为主要依据, 依据不同情况进行假体翻修, 补充骨缺损, 修复韧带。

## 3 假体周围骨量丢失的预防

假体周围骨量丢失常常在术后 3~6 个月才可以在影像学体现, 然而在手术过程中与术后康复开始后均有关节腔微粒形成。机械应力发生于术后康复的开始。骨量丢失在严格意义上是界面出现微动后, 局部骨小梁断裂, 破骨细胞激活, 骨吸收即开始。然而行 TKA 的患者年龄常在 50 岁以上, 且伴随全身骨量减少/骨质疏松, 所以在假体置入后更易出现假体骨量丢失, 目前常需要补充钙剂等方法来预防假体周围骨量丢失。

### 3.1 手术技术

TKA 手术目的是恢复膝关节功能, 不仅需要在解剖结构上进行力线恢复, 还需要进行软组织平衡恢复。研究表明, 软组织平衡将很大程度上减少因关节假体力学原因引起的磨损与微动而导致的界面不稳定程度, 从而降低骨量丢失的风险<sup>[30]</sup>。伸直位下股骨与胫骨进行假体置入, 并未考虑 TKA 患者膝关节的水平位置已经丧失(外翻/内翻), 在不考虑软组织平衡的情况下进行膝关节假体在解剖位置安装会导致后期关节面磨损及界面应力增加<sup>[31]</sup>。并且在手术过程中, 骨水泥的使用和假体的握持会导致微粒的出现, 特别在骨水泥溢出区域, 增加了关节液与骨水泥的接触面积, 同样截骨面被认为也是一个影响因素, 过多的截骨面会导致松质骨直接暴露于关节液, 侵蚀后释放微粒将会更为明显, 增加了术后假体周围骨量降低的风险<sup>[32]</sup>。手术个性化, 假体材料与设计的不断发展, 以及从解剖到功能的理念不断提升, 将有效预防假体周围的骨量丢失。

### 3.2 非手术治疗技术

不仅术前患者体重与膝关节慢性损伤关系密切, 术后体重也是参考因素, TKA 的患者肥胖占很大比例, 术后不进行体重管理将是对假体微动及摩擦最大的考验<sup>[33]</sup>。药物治疗主要使用在 TKA 的围手术期, 较为常用的双磷酸盐通过干预 RANKL 通路进行, 抑制破骨细胞, 降低破骨细胞的功能, 减少骨量的丢失, 对预防骨质流失有很好的效果<sup>[34]</sup>。部分 TKA 患者合并骨质疏松, 在围手术期进行抗骨质疏松治疗将有效预防假体周围骨量丢失, 并减少假体松动的发生<sup>[35]</sup>。随着分子生物学的发展, 对转录调节的手段进行深入研究, 更多的方式将用于骨量丢失的预防性治疗。目前干细胞技术成为治疗骨缺损的热点, 在 TKA 翻修前是否可以进行治疗仍需等待研究

结果。

综上所述, 膝关节假体周围骨量丢失与机械力学、假体材料及设计、炎性反应及微粒形成等均密切相关, 其预防及治疗措施目前仍不充分, 为了从简单的解剖性假体置换转变成运动功能性置换, 改变手术理念、创新手术技术(机器人辅助)、围手术期综合管理及治疗等均需要进一步研究及验证, 从而恢复膝关节生理学运动, 最终创造出更合宜的整体治疗方案。

### 参考文献

- [1] Feng B, Zhu W, Bian YY, et al. China artificial joint annual data report [J]. *Chin Med J (Engl)*, 2020, 134 (6): 752-753. DOI: 10.1097/CM9.0000000000001196.
- [2] Tarazi JM, Chen Z, Scuderi GR, et al. The epidemiology of revision total knee arthroplasty [J]. *J Knee Surg*, 2021, 34 (13): 1396-1401. DOI: 10.1055/s-0041-1735282.
- [3] Johnson WB Jr, Engh CA Jr, Parks NL, et al. A lower threshold for revision of aseptic unicompartmental vs total knee arthroplasty [J]. *Bone Joint J*, 2020, 102-B (6\_Supple\_A): 91-95. DOI: 10.1302/0301-620X.102B6.BJJ-2019-1538.R1.
- [4] Wilson CJ, Theodoulou A, Damarell RA, et al. Knee instability as the primary cause of failure following Total Knee Arthroplasty (TKA): a systematic review on the patient, surgical and implant characteristics of revised TKA patients [J]. *Knee*, 2017, 24 (6): 1271-1281. DOI: 10.1016/j.knee.2017.08.060.
- [5] 原福贞, 孙泽文, 齐岩松, 等. 膝关节置换假体研究进展 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2019, 27 (2): 154-158. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2019.02.13.  
Yuan FZ, Sun ZW, Qi YS, et al. Current researches on knee arthroplasty prosthesis [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2019, 27 (2): 154-158. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2019.02.13.
- [6] Goodman SB, Gallo J. Periprosthetic osteolysis: mechanisms, prevention and treatment [J]. *J Clin Med*, 2019, 8 (12): 2091. DOI: 10.3390/jcm8122091.
- [7] Papas PV, Congiusta D, Cushner FD. Cementless versus cemented fixation in total knee arthroplasty [J]. *J Knee Surg*, 2019, 32 (7): 596-599. DOI: 10.1055/s-0039-1678687.
- [8] 丛晔昊, 孙水. 骨重塑在关节假体松动作用的研究进展 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2023, 31 (7): 639-643. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2023.07.12.  
Cong HY, Sun S. Research progress in the role of bone remodeling on aseptic loosening of prosthesis [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2023, 31 (7): 639-643. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2023.07.12.
- [9] 侯开宇, 王宇飞, 陆晓涛, 等. 巨噬细胞炎性蛋白 2 及其受体在假体无菌性松动周围组织及外周血中的表达及临床意义 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2015, 23 (13): 1222-1226. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2015.13.16.  
Hou KY, Wang YF, Lu XT, et al. The clinical significance of the expressions of chemokine (C-X-C motif) ligand 2 and its receptor in peripheral blood and peri-implant tissues in patients who underwent aseptic implant loosening after total hip replacement [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2015, 23 (13): 1222-1226. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2015.13.16.
- [10] Liu P, Tu J, Wang W, et al. Effects of mechanical stress stimulation on function and expression mechanism of osteoblasts [J]. *Front BioengBiotechnol*, 2022, 10: 830722. DOI: 10.3389/fbioe.2022.830722.
- [11] Dong L, Song Y, Zhang Y, et al. Mechanical stretch induces osteogenesis through the alternative activation of macrophages [J]. *J Cell Physiol*, 2022, 236 (9): 6376-6390. DOI: 10.1002/jcp.30312.
- [12] Qin L, Liu W, Cao H, et al. Molecular mechanosensors in osteocytes [J]. *Bone Res*, 2020, 8: 23. DOI: 10.1038/s41413-020-0099-y.
- [13] Connors JP, Stelzer JW, Garvin PM, et al. The role of the innate immune system in wear debris-induced inflammatory peri-implant osteolysis in total joint arthroplasty [J]. *Bioengineering (Basel)*, 2022, 9 (12): 764. DOI: 10.3390/bioengineering9120764.
- [14] Li W, Zhao J, Sun W, et al. Osteocytes promote osteoclastogenesis via autophagy-mediated RANKL secretion under mechanical compressive force [J]. *Arch BiochemBiophys*, 2020, 694: 108594. DOI: 10.1016/j.abb.2020.108594.
- [15] Amirhosseini M, Andersson G, Aspenberg P, et al. Mechanical instability and titanium particles induce similar transcriptomic changes in a rat model for periprosthetic osteolysis and aseptic loosening [J]. *Bone Rep*, 2017, 7: 17-25. DOI: 10.1016/j.bonr.2017.07.003.
- [16] McArthur BA, Scully R, Patrick Ross F, et al. Mechanically induced periprosthetic osteolysis: a systematic review [J]. *HSS J*, 2019, 15 (3): 286-296. DOI: 10.1007/s11420-018-9641-5.
- [17] Cyndari KI, Goodheart JR, Miller MA, et al. Peri-implant distribution of polyethylene debris in postmortem-retrieved knee arthroplasties: can polyethylene debris explain loss of cement-bone interlock in successful total knee arthroplasties [J]. *J Arthroplasty*, 2017, 32 (7): 2289-2300. DOI: 10.1016/j.arth.2017.01.047.
- [18] Ozer A. Computational wear of knee implant polyethylene insert surface under continuous dynamic loading and posterior tibial slope variation based on cadaver experiments with comparative verification [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2022, 23 (1): 871. DOI: 10.1186/s12891-022-05828-2.
- [19] Tan J, Zou D, Zhang X, et al. Loss of knee flexion and femoral roll-back of the medial-pivot and posterior-stabilized total knee arthroplasty during early-stance of walking in Chinese patients [J]. *Front BioengBiotechnol*, 2021, 9: 675093. DOI: 10.3389/fbioe.2021.675093.
- [20] Meng X, Zhang W, Lyu Z, et al. ZnO nanoparticles attenuate polymer-wear-particle induced inflammatory osteolysis by regulating the MEK-ERK-COX-2 axis [J]. *J OrthopTransl*, 2022, 34: 1-10. DOI: 10.1016/j.jot.2022.04.001.

- [21] Cowie RM, Jennings LM. Third body damage and wear in arthroplasty bearing materials: a review of laboratory methods [J]. *Biomater Biosyst*, 2021, 4 : 100028. DOI: 10.1016/j.bbiosy.2021.100028.
- [22] Bracey DN, Hegde V, Johnson R, et al. Poor correlation among metal hypersensitivity testing modalities and inferior patient-reported outcomes after primary and revision total knee arthroplasties [J]. *Arthroplast Today*, 2022, 18: 138–142. DOI: 10.1016/j.artd.2022.09.016.
- [23] Jabbal M, Simpson AHR, Walmsley P. Mechanisms of bone loss in revision total knee arthroplasty and current treatment options [J]. *Orthop Rev (Pavia)*, 2023, 15 : 75359. DOI: 10.52965/001c.75359.
- [24] Zhang L, Haddouti EM, Welle K, et al. The effects of biomaterial implant wear debris on osteoblasts [J]. *Front Cell Dev Biol*, 2020, 8: 352. DOI: 10.3389/fcell.2020.00352.
- [25] 陈继营, 柴伟, 郝立波. 科技改变关节外科模式 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2022, 30 (22) : 2017–2021. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.22.01.  
Chen JY, Chai W, Hao LB. Science and technology change the model of joint surgery [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2022, 30 (22) : 2017–2021. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.22.01.
- [26] Hothi H, Cerquiglini A, Büel L, et al. SPECT/CT assessment of in-vivo loading of the knee correlates with polyethylene deformation in retrieved total knee arthroplasty [J]. *Tomography*, 2022, 8 (1) : 180–188. DOI: 10.3390/tomography8010015.
- [27] Soloviev VY, Wells SG, Renforth KL, et al. Metal artefact reduction in digital tomosynthesis using component decomposition [J]. *Biomed Phys Eng Exp*, 2023, 9 (2) : 025003. DOI: 10.1088/2057-1976/acb357.
- [28] 邓亚军, 韩蕾, 解琪琪, 等. 能谱 CT 与 DXA 测量骨密度准确性的比较研究 [J]. *中国医学物理学杂志*, 2019, 36 (2) : 194–198. DOI: 10.3969/j.issn.1005-202X.2019.02.014.  
Deng YJ, Han L, Xie QQ, et al. Comparison of the accuracy of bone mineral density measurement by spectral CT vs DXA [J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2019, 36 (2) : 194–198. DOI: 10.3969/j.issn.1005-202X.2019.02.014.
- [29] Jabbal M, Simpson AHR, Walmsley P. Mechanisms of bone loss in revision total knee arthroplasty and current treatment options [J]. *Orthop Rev (Pavia)*, 2023, 15 : 75359. DOI: 10.52965/001c.75359.
- [30] 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. DOI: 10.1007/s00167-022-07156-3.
- [31] Wojciechowski M, Dembski T. Kinematic alignment in total knee arthroplasty [J]. *Chir Narzadow Ruchu Ortop Pol*, 2020, 85(3-4) : 49–56. DOI: 10.31139/chnriop.2020.85.3-4.4.
- [32] Scheele CB, Pietschmann MF, Schröder C, et al. Effect of bone density and cement morphology on biomechanical stability of tibial unicompartmental knee arthroplasty [J]. *Knee*, 2020, 27 (2) : 587–597. DOI: 10.1016/j.knee.2020.01.005.
- [33] Jolissaint JE, Kammire MS, Averkamp BJ, et al. An update on the management and optimization of the patient with morbid obesity undergoing hip or knee arthroplasty [J]. *Orthop Clin North Am*, 2023, 54 (3) : 251–257. DOI: 10.1016/j.ocl.2023.02.010.
- [34] McDonald CL, Lemme NJ, Testa EJ, et al. Bisphosphonates in total joint arthroplasty: a review of their use and complications [J]. *Arthroplast Today*, 2022, 14: 133–139. DOI: 10.1016/j.artd.2022.02.003.
- [35] Xiao PL, Hsu CJ, Ma YG, et al. Prevalence and treatment rate of osteoporosis in patients undergoing total knee and hip arthroplasty: a systematic review and meta-analysis [J]. *Arch Osteoporos*, 2022, 17 (1) : 16. DOI: 10.1007/s11657-021-01055-9.
- (收稿:2023-06-07 修回:2024-01-12)  
(同行评议专家: 王丙刚, 赵刚, 袁勇)  
(本文编辑: 宁桦)