

## 3D 打印辅助治疗儿童与青少年髌骨脱位的研究进展

曹晓天<sup>1</sup>, 王嘉庆<sup>1</sup>, 常旭东<sup>2</sup>, 杨国清<sup>3</sup>, 刘晨<sup>3</sup>, 唐兆鹏<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>甘肃中医药大学中西医结合学院, 甘肃兰州 730030; <sup>2</sup>甘肃中医药大学中医临床学院, 甘肃兰州 730030; <sup>3</sup>甘肃省中医院运动医学科, 甘肃兰州 730050

[中图分类号] R687.4 [文献标志码] A [DOI] 10.11855/j.issn.0577-7402.2134.2026.0409

[声明] 本文所有作者声明无利益冲突

[引用本文] 曹晓天,王嘉庆,常旭东等.3D 打印辅助治疗儿童与青少年髌骨脱位的研究进展[J].解放军医学杂志,DOI:10.11855/j.issn.0577-7402.2134.2026.0409.

[收稿日期] 2025-10-15 [录用日期] 2026-01-22 [上线日期] 2026-04-09

**[摘要]** 髌骨脱位是儿童与青少年最常见的膝关节损伤之一, 由于此阶段患者骨骺仍处于生长阶段, 解剖结构与生物力学特点与成人存在显著差异, 因此治疗方案需根据其骨骼发育状况、脱位机制及具体损伤程度进行高度个体化的精准调整。传统治疗方法在应对复杂的解剖变异与生长需求时存在局限, 难以实现个性化干预, 影响治疗效果与长期功能恢复。3D 打印技术凭借其 1:1 复现患肢解剖形态, 并实现植入物或导板的个性化定制, 为该群体的治疗提供了新的思路。本文旨在系统梳理 3D 打印技术辅助治疗儿童及青少年髌骨脱位的研究进展, 探讨其临床应用潜力与未来发展方向, 以期为未成年群体髌骨脱位提供个性化治疗方案, 促进该技术的规范化应用。

**[关键词]** 3D 打印; 儿童与青少年; 髌骨脱位; 三维模型; 畸形评估; 手术导板; 植入物

### Research progress on 3D printing-assisted treatment of patellar dislocation in children and adolescents

Cao Xiao-Tian<sup>1</sup>, Wang Jia-Qing<sup>1</sup>, Chang Xu-Dong<sup>2</sup>, Yang Guo-Qing<sup>3</sup>, Liu Cheng<sup>3</sup>, Tang Zhao-Peng<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>College of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine, Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou, Gansu 730030, China

<sup>2</sup>College of Traditional Chinese Medicine, Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou, Gansu 730030, China

<sup>3</sup>The Sports Medicine Department of Gansu Provincial Hospital of Traditional Chinese Medicine, Lanzhou, Gansu 730050, China

\*Corresponding author, E-mail: tzp2013@126.com

This work was supported by the Gansu Provincial Science and Technology Plan Project (26JRRA783)

**[Abstract]** Patellar dislocation is one of the most common knee injuries in children and adolescents. Due to the fact that the epiphyses of patients in this stage are still in the growth phase, their anatomical structure and biomechanical characteristics are significantly different from those of adults. Therefore, the treatment plan needs to be highly individualized and precisely adjusted according to their skeletal development status, dislocation mechanism and specific injury degree. Traditional treatment methods have limitations in dealing with complex anatomical variations and growth needs, making it difficult to achieve personalized intervention and affecting the treatment effect and long-term functional recovery. 3D printing technology, with its ability to 1:1 reproduce the anatomical morphology of the affected limb and customize implants or guides, provides a new approach for the treatment of this group. This article aims to systematically review the research progress of 3D printing technology in assisting the treatment of patellar dislocation in children and adolescents, explore its clinical application potential and future development direction, with the expectation of providing personalized treatment plans for patellar dislocation in the underage group and promoting the standardized application of this technology.

**[Key words]** 3D printing; children and adolescents; patellar dislocation; three-dimensional model; deformity assessment; surgical guide plate; implant

[基金项目] 甘肃省科技计划项目(26JRRA783)

[作者简介] 曹晓天, 硕士研究生, 主要从事中西医结合防治骨伤科疾病的基础与临床研究

[通信作者] 唐兆鹏, E-mail: tzp2013@126.com

髌骨脱位是儿童与青少年群体中最为常见的膝关节疾病之一，其主要表现为髌骨从股骨滑车沟中发生移位，导致患者膝关节剧烈疼痛、肿胀、功能障碍以及存在长期的不稳定感<sup>[1]</sup>。该病症在此年龄段的发病具有特殊性，常与股骨滑车发育不良、胫骨结节-滑车沟距离(tibial tubercle-trochlear groove, TT-TG)增大、下肢力线异常及软组织平衡失调等复杂的骨性与软组织因素密切相关<sup>[2-3]</sup>。由于儿童与青少年的骨骼系统仍处于动态发育与成熟的关键阶段，因此对于该年龄段患者髌骨脱位的治疗不仅需要精准矫正解剖学畸形，更必须审慎考量手术对骨骺生长潜能的远期影响，避免造成继发性生长障碍，这给临床诊疗带来重大挑战。近年来，随着3D打印技术的发展及其与医学应用的融合，为上述挑战提供了革命性的解决方案。该技术能基于患者的CT或MRI影像数据，通过计算机三维重建与辅助设计，快速、精确地制造出与患者解剖结构完全一致的1:1实体模型、个性化手术导板及定制化植入物，其在儿童与青少年髌骨脱位诊疗中具有较高的应用价值<sup>[4]</sup>。本研究旨在系统综述3D打印技术辅助治疗儿童与青少年髌骨脱位的最新研究进展，围绕其在畸形评估、术前模拟、手术导板及个性化植入物等领域的应用展开详细论述，并深入探讨其当前面临的临床挑战与未来发展方向，以期为该技术的进一步临床转化与推广提供理论依据，进而推动儿童与青少年髌骨脱位的诊疗模式向更精准、更安全、更个性化迈进。

## 1 儿童与青少年髌骨脱位的治疗现状

髌骨脱位是指髌骨从其正常解剖位置脱离，通常向外侧脱离，且多由急性创伤事件引发<sup>[5]</sup>。流行病学研究表明该损伤在<18岁的青少年女性群体中最为常见，约占所有膝关节损伤的3%，典型临床表现为急性膝关节血肿<sup>[6-7]</sup>。初次髌骨脱位常伴随剧烈疼痛、软骨损伤及膝关节功能障碍，因骨性及软组织结构的对线异常与稳定性失衡导致髌骨脱位具有较高的复发倾向<sup>[8]</sup>，一项系统评价显示，初次脱位后总体复发率为33.5%，且青少年患者的复发风险显著高于成人<sup>[9]</sup>。

目前，临床针对无合并骨或软骨骨折的初次髌骨脱位，一般倾向于采取保守治疗，急性期于受损部位冰敷以减轻疼痛与肿胀，辅以加压包扎控制关节血肿和水肿，亦可酌情使用非甾体类药物抗炎镇痛；使用膝关节支具或石膏托将患肢固定于伸直位2~4周，避免再次脱位，并允许内侧髌股韧带(medial patellofemoral ligament, MPFL)愈合<sup>[10-11]</sup>。在制动期结束后，逐步开始进行膝关节屈伸活动训练，

随后逐渐开始肌力强化训练，尤以股内侧斜肌的针对性激活和强化为主，训练方式可从等长收缩开始，逐步过渡至直腿抬高、闭链运动和开链运动<sup>[11-13]</sup>。然而，保守治疗的疗效存在较大差异，Smith等<sup>[12]</sup>的系统评价(纳入Cochrane数据库的数据)和Sheehan等<sup>[14]</sup>的研究表明，保守治疗后复发脱位率高达25%~60%。针对存在明显复发高风险因素的患者(如骨骺未闭、滑车发育不良、TT-TG>20 mm等)，Parikh等<sup>[11]</sup>发布的基于共识的青少年首次髌骨脱位管理指南建议将手术治疗作为首选策略。目前常见的手术方式有MPFL重建术、外侧松解与内侧紧缩术、滑车成形术、胫骨结节截骨术及股骨截骨术等<sup>[15]</sup>。

MPFL重建术适用于复发性髌骨外向脱位且无髌骨畸形或滑车发育不良的患者。Wright等<sup>[16]</sup>通过视频技术详细展示了该术式的操作要点，强调股骨隧道定位的精准性对于术后疗效至关重要；Zhang等<sup>[17]</sup>的系统综述纳入了多项临床研究，结果显示MPFL重建术后髌骨再脱位率为2.5%~7.8%，且患者功能评分(Kujala评分)平均改善25~30分；Migliorini等<sup>[18]</sup>对单纯MPFL重建术的预后分析发现，在严格筛选的适应证患者中，术后复发率仅为4.3%；但当合并滑车发育不良时，复发风险升高至12.8%。因此该术式虽能有效恢复髌骨的稳定性，但手术成功的关键在于MPFL等长，而等长重建的关键在于股骨等距点的定位<sup>[19-21]</sup>，由于儿童及青少年骨骼解剖的特殊性，未成熟骨骼中MPFL与股骨远端骺端之间的相对位置关系尚不确定<sup>[22-24]</sup>，且MPFL重建需要破坏股骨骨质，可能损伤骨骺并影响青少年发育，因此对青少年骨骺未闭合者应慎重选择MPFL重建术。

外侧松解与内侧紧缩术则通过改变膝关节外侧结构紧张和内侧结构松弛的生物力学作用，调整股外侧肌对外侧支持带的牵拉方向，以恢复髌骨内、外侧结构的软组织平衡，降低髌骨外侧脱位的概率<sup>[12]</sup>，该术式不损伤骨骺，且创伤小，尤适用于初次髌骨半脱位的青少年患者。Yang等<sup>[25]</sup>对33例行内侧紧缩术联合股骨去旋转截骨的患者进行随访，末次随访时Kujala评分较术前明显升高[(88.7±8.3)分 vs. (53.6±12.4)分,  $P<0.05$ ]。但Ahrend等<sup>[26]</sup>发现，对于复发性髌骨脱位合并滑车发育不良或胫骨结节外偏畸形等，单纯进行外侧支持带松解与内侧紧缩术往往疗效欠佳，当TT-TG>15 mm时术后复发风险增加约3倍。

股骨滑车作为髌骨运动的骨性轨道，其形态结构是维持正常髌骨轨迹与髌股关节稳定的解剖学基石<sup>[27]</sup>，Grisdela等<sup>[28]</sup>指出若滑车发育不良，髌股关节不稳的发生风险显著增高，此时滑车成形术可加深并重塑滑车沟，为髌骨提供新的解剖轨道，从生物

力学上有效防止髌骨向外脱位。Liebensteiner等<sup>[29]</sup>的随机对照试验比较了保守治疗与滑车成形术的疗效,结果显示手术组复发率(5.6%)明显低于保守组(31.2%);Hao等<sup>[30]</sup>对骨骺未闭患者行滑车成形术后的随访研究发现,术后滑车沟角较术前明显[(142.5±7.2)° vs. (157.3±8.6)°],髌骨倾斜角明显减小。然而该技术虽可重塑滑车沟,恢复髌骨稳定,但需同步进行软组织手术,且Dejour等<sup>[31]</sup>指出滑车成形术可能增加关节软骨远期损伤的风险,Bram等<sup>[32]</sup>发现髌骨脱位次数与滑车软骨损伤程度呈正相关,每次脱位事件使软骨损伤的风险上升约15%。

胫骨结节位于胫骨近端的生长骨骺板处<sup>[33]</sup>,胫骨结节截骨术包括胫骨结节前内侧移、内侧移,其目标主要是将TT-TG减少至15 mm<sup>[34]</sup>。Fan等<sup>[35]</sup>的系统评价纳入9项研究共367例患者,结果显示胫骨结节截骨术后复发率为4.1%~9.7%,功能评分显著改善。但该术式在临床应用中存在显著风险,Wagner<sup>[36]</sup>指出,对于骨骼未成熟的青少年,胫骨结节截骨术可能损伤骨骺,导致继发性的下肢长度不等或膝反屈等严重畸形,发生率为8%~15%;Naveed等<sup>[37]</sup>的长期随访研究(10~15年)结果表明,胫骨结节约内侧移术后,内侧髌股关节的骨关节炎发生率高达30%~75%,其中影像学退变发生率为56%,有临床症状的关节炎发生率为12%。

股骨截骨术主要适用于股骨前倾角>30°的严重股骨侧畸形的患者<sup>[37-38]</sup>,Hart等<sup>[39]</sup>对11例因股骨前倾角增大导致习惯性髌骨脱位的患者行粗隆间去旋转截骨术,术后随访显示股骨前倾角由术前>30°矫正至10°~15°,所有患者髌骨脱位均未复发,Kujala评分由术前的(58.2±6.5)分提升至末次随访时的(91.4±5.2)分。当脱位源于股骨本身的严重旋转畸形或力线异常时,股骨截骨术可直接在畸形源头进行矫正,通过改变整个股骨远端的朝向,从根本上改善髌骨相对于滑车沟的对位关系<sup>[39-41]</sup>。Hall等<sup>[40]</sup>的系统评价指出,该手术涉及截断股骨并使用钢板螺钉等内固定,术后骨不连发生率为2%~5%,感染率为1%~3%,神经血管损伤风险约为1%;此外,胫骨或股骨截骨术往往伴随韧带的修复与转位,截骨术与韧带修复术在髌骨脱位的治疗中相辅相成,二者可协同恢复髌股关节的静态与动态稳定<sup>[42]</sup>,闫鹏安等<sup>[43]</sup>的研究强调,在实施截骨术的同时亦需考虑股骨等距点的定位问题,这增加了手术难度与技术要求。

基于上述术式的各自局限,近年来学者们开始探索3D打印技术在优化手术精准度与安全性方面的应用价值。Fulkerson等<sup>[44]</sup>采用三维规划系统进行胫骨结节截骨设计,证实术前三维重建可精确预测术

后力线矫正效果;Yu等<sup>[45]</sup>将3D打印模型应用于滑车发育不良的教学与术前模拟,结果显示打印模型能够准确复现滑车畸形特征;Chen等<sup>[46]</sup>的回顾性研究报道了计算机辅助设计与3D打印截骨导板在股骨去旋转截骨中的应用,术后影像学评估显示截骨角度误差<2°,明显优于传统手术组。以上研究表明3D打印技术能够通过股骨隧道、锚钉及三维空间的精准定位,规划出最接近解剖等距点且完全避开股骨远端骨骺的隧道路径,显著降低了骨骺损伤与术后等距性不佳的风险;采用截骨与定位一体化导板,精确控制骨块内移、前移的距离及旋转角度,确保TT-TG距离矫正至目标值;并基于健侧或理想滑车形态数据,逆向工程设计出个性化滑车假体或截骨导板,实现滑车沟深度、弧度的个体化重塑,恢复正常的骨性轨道;在复杂的髌骨脱位中实现“去旋转与成角矫正”的精确控制,不仅能够对单一或多平面截骨的精准角度控制,还可预演矫正后的整体下肢力线(表1<sup>[44-51]</sup>)。

## 2 3D打印技术在髌骨脱位诊断与术前规划中的应用

### 2.1 三维模型与畸形评估

在儿童与青少年髌骨脱位的诊断中,传统的X线片、CT和MRI等影像学资料虽然能提供重要信息,但其解读主要依赖医师的经验,且缺乏立体的视触感,加之儿童及青少年骨骺尚未闭合,手术干预更需精准考量<sup>[52]</sup>。洪庆南等<sup>[53]</sup>研究表明,3D打印技术是基于数字模型逐层堆积材料构建三维物体;Yu等<sup>[45, 54]</sup>和徐彪等<sup>[55]</sup>指出,3D打印技术可将患者虚拟的影像迅速转换成三维实体物件,实现材料结构的个性化定制以及与病变部位的解剖学匹配。该技术通过获取患者膝关节薄层扫描CT或高分辨率MRI数据,利用专业软件进行三维重建,采用图像分割技术,精确勾画出髌骨、股骨远端及胫骨近端轮廓,生成数字模型,最终通过光固化等技术制造出1:1的实体模型<sup>[56]</sup>。该模型为畸形评估提供了直观工具,Degen等<sup>[56]</sup>的研究显示,基于3D打印模型的解剖参数测量具有极高的可重复性,组内相关系数(ICC)可达0.94~0.98,显著优于传统二维影像。医师可直接在模型上进行多角度观察和精确测量,量化评估关键参数,如TT-TG、股骨滑车沟的深度及形态(Dejour分型)、髌骨高度以及下肢的旋转畸形角度等<sup>[57]</sup>。

Cuadrado等<sup>[58]</sup>和Michaud等<sup>[59]</sup>进一步利用髌股数字孪生与接触检测算法,构建了能够再现髌骨不稳定病理场景的计算模型,并结合传感3D打印测试台验证了髌股运动过程中的位置、方向和接触力的历史,结果表明仿真与实验测量误差<5%,为临床优

表1 髌骨脱位主要术式对比及3D打印技术的应用价值

Tab.1 Comparison of main surgical procedures for patellar dislocation and the application value of 3D printing technology

术式名称	核心原理	适应症	优势	风险与局限	3D打印的优势
MPFL重建术	恢复MPFL结构	复发性髌骨脱位, 无严重骨畸形者	能有效恢复髌骨稳定性	未成年人慎用: 可能损伤骨骺, 影响发育	实现股骨隧道、锚钉的“骨骺旁精确定位”, 降低骨骺损伤与术后等距性不佳的风险 <sup>[44-46]</sup>
外侧松解与内侧紧缩术	松解外侧紧缩内侧, 恢复软组织平衡	初次半脱位的青少年患者 <sup>[47]</sup>	创伤小, 不损伤骨骺	对合并骨畸形者疗效欠佳	术前精确评估软组织失衡与潜在畸形, 为“单纯软组织手术是否足够”提供决策依据 <sup>[48]</sup> , 避免无效手术
滑车成形术	加深并重塑滑车沟, 提供骨性轨道	滑车发育不良导致的关节不稳	从解剖学上根治, 有效防止脱位	需联合软组织手术, 远期软骨损伤风险高	实现“个体化解剖形态重建”, 恢复正常的骨性轨道 <sup>[49]</sup>
胫骨结节截骨术	内移胫骨结节, 改善髌骨力线	胫骨结节外偏畸形 (TT-TG>15 mm)	临床应用广, 目标明确	未成年人禁忌: 损伤骨骺, 致下肢畸形; 远期关节炎发生率高	实现三维空间上的“精准位移与固定”, 确保TT-TG距离矫正至目标值, 避让胫骨远端骨骺 <sup>[50]</sup>
股骨截骨术	矫正股骨严重旋转畸形	股骨前倾角>30°的严重畸形	从源头矫正力线, 从根本上改善对位	创伤大, 有骨不连、感染、神经损伤风险	实现“去旋转与成角矫正”的精确控制, 对单一或多平面截骨的角度精准控制, 并预演矫正后的整体下肢力线 <sup>[51]</sup>

MPFL. 内侧髌股韧带; TT-TG. 胫骨结节-滑车沟距离

化提供了可靠的力学依据。徐彪等<sup>[55]</sup>报道, 某医院骨科团队通过医学3D打印中心计算机辅助技术将患者CT数据转换成可视化的1:1三维数字模型, 直观了解具体参数并进行术前精准规划, 使术者对手术方案了然于胸。这种技术对于评估髌骨脱位患者的股骨滑车发育不良、TT-TG增大、下肢力线异常等复杂畸形具有重要价值<sup>[53, 60]</sup>。

**2.2 手术模拟与方案优化** 对于骨骼尚在发育、解剖变异复杂的儿童群体而言, 3D打印技术通过三维建模与1:1实体打印设计出包含股骨远端、胫骨近端及髌骨的膝关节模型<sup>[45]</sup>, 该实体模型为手术医师提供了可触可感的操作平台。以常见的胫骨结节截骨术(如Fulkerson截骨术)为例, 医师可在模型上进行预手术, 精确规划截骨线位置、角度与深度; 模拟胫骨结节骨块向内、向前或复合方向的移动, 并量化位移距离与旋转角度; 还可预弯接骨板、选择合适长度的螺钉<sup>[46, 61]</sup>。Yuan等<sup>[61]</sup>的研究显示, 基于3D打印模型的手术规划可使术中截骨角度误差控制在2°以内, 显著优于传统经验法(误差>5°)。这种“术前演练”使得医师能预见并规避术中可能遇到的障碍, 如骨骺损伤、截骨不当或内固定物冲突, 极大地提升了手术的可预测性与安全性<sup>[62]</sup>。

目前3D打印技术实现了从“经验依赖”到“数据驱动”的跨越。Du等<sup>[63]</sup>通过对三维重建后不同手术方法的评估, 发现基于3D打印模型的术前规划可将手术时间缩短约25%, 术中透视次数减少约40%。Yu等<sup>[64]</sup>研究发现, 在实体模型上反复模拟与测量, 可以找到针对该特定患者的最优矫形方案, 实现个

体化的力线矫正, 精确恢复髌股关节的对合关系, 避免了传统方案中因依赖“平均标准”而可能导致的矫正不足或矫枉过正。这一发现为复杂联合术式的规划提供了可能, 对于同时存在股骨滑车发育不良、胫骨旋转畸形及高位髌骨的复杂病例, 医师可以在模型上协同规划滑车成形术、胫骨结节截骨术及MPFL重建术的联合实施策略, 评估不同术式间的相互影响, 从而制定出最协调、最有效的一体化手术方案<sup>[45, 54]</sup>。

**2.3 基于骨龄分期的个性化手术策略与骨骺保护** 儿童与青少年髌骨脱位的治疗不仅要纠正脱位, 更重要的是保护骨骺生长潜能。Pérez等<sup>[65]</sup>的研究表明, 对于Tanner分期为I-III期的骨骺未闭患者应绝对禁忌进行经骨骺的内固定或截骨术, 3D打印导板的设计需确保所有截骨线、钻孔通道与生长板保持安全距离(通常建议≥10 mm); 并在1:1模型上模拟操作, 可视化验证器械路径与骨骺的空间关系。IV期骨骺部分闭合或接近闭合时, 患者生长潜力已大部完成, 但术中仍存在损伤风险, 导板设计需精确测绘骨骺轮廓, 实现“毫米级”贴附, 以确保操作在安全区进行。有研究表明, 有限元生物力学分析可模拟截骨与固定后, 剩余生长板所承受的应力变化<sup>[66]</sup>, 以此优化内固定物放置位置, 避免产生不对称的应力导致继发性成角畸形。至V期骨骺完全闭合后, 手术策略即可按照成人方案进行, 追求解剖匹配与力线精准。

相较于传统方案, 3D打印辅助的手术模拟与规划将空间想象的术前规划转化为精准的术中操作,

实现“一人一策”的定制治疗。Márquez Gómez等<sup>[67]</sup>的研究显示,在骨骺未闭患者中应用3D打印导板,术后生长障碍发生率由传统手术的12%降至3.5%,通过术前模拟显著降低术中不确定性,缩短手术时间,减少透视次数;尤其对于骨骺未闭的青少年,能最大限度地规避生长板损伤的风险<sup>[67]</sup>。

### 3 3D打印个性化手术导板与植入物的应用

**3.1 个性化截骨导板** 髌骨脱位手术矫正正常需进行胫骨结节截骨移位、股骨滑车成形等操作,这些手术对精度要求极高<sup>[12]</sup>。传统手术中为了确保准确性和避免损伤周围神经、血管、器官等重要结构,往往需要依赖术者的经验及术中多次透视,导致手术时间过长,并且存在操作偏差的风险。3D打印截骨导板则基于患者术前CT资料进行三维重建,精确计算出为了矫正髌骨脱位,胫骨结节需要向内、向前或向后移动的距离和角度,随后设计出专属于该患者的截骨导板<sup>[68-70]</sup>。该导板模型上包含关键的截骨槽和导向孔<sup>[71]</sup>。术中导板紧贴于胫骨结节区域的骨骼表面,可确保位置的唯一性和稳定性<sup>[72]</sup>,随后手术锯片严格按照预设的槽道进行切割。Wei等<sup>[68]</sup>的研究显示,3D打印截骨导板在术中的贴合误差仅为0.5~1.2 mm,明显低于传统手工定位的2.5~4.0 mm。此槽道不仅定义了截骨线的走向,更精确控制了截骨的深度和范围,从而形成一个与术前规划完全一致的、形态规整的骨块;同时也避免了传统截骨中可能出现的截骨面不平整、骨块过小易碎裂或过大影响移位的问题<sup>[73-74]</sup>;并且许多先进的截骨导板会设计额外的钉孔或针道,用于在截骨前先用细克氏针将导板临时固定在骨骼上,防止其在操作过程中移位,以确保截骨的绝对精准<sup>[68,75]</sup>。部分一体化设计的导板甚至会将截骨导板与后续用于定位新骨块位置的定位导板功能相结合<sup>[76]</sup>。

张艳<sup>[77]</sup>在治疗复发性髌骨脱位中,将3D打印导向模板与传统透视定位对比,结果表明,导板组股骨隧道定位误差较传统组明显降低 $[(1.2\pm 0.4)\text{ mm vs. } (2.8\pm 0.7)\text{ mm}, P<0.01]$ ;导板组Kujala评分由术前的 $(58.6\pm 6.2)$ 分提升至末次随访时的 $(91.3\pm 4.5)$ 分,传统组则由 $(57.9\pm 5.8)$ 分提升至 $(84.7\pm 6.1)$ 分,导板组患者术后恢复较传统组快,患者满意度亦明显提升。李振伟等<sup>[78]</sup>研究中针对TT-TG距离 $>20\text{ mm}$ 的复发性髌骨脱位患者,基于术前影像学数据三维重建并1:1打印膝关节模型,据此进行个性化胫骨结节截骨术的精确规划与术前模拟,术后随访显示TT-TG距离由术前的 $(23.6\pm 2.1)\text{ mm}$ 矫正至 $(12.3\pm 1.8)\text{ mm}$ ,矫正精度达 $(11.3\pm 1.5)\text{ mm}$ ,患者末次随访Kujala评分由 $(54.2\pm 7.3)$ 分提升至 $(89.6\pm 5.1)$ 分,差异均有统计学意

义 $(P<0.01)$ 。与传统手术方式相比,3D打印截骨导板通过将患者影像数据的数字化术前规划,转化为术中直观、可靠的物理引导,从根本上提升了胫骨结节截骨移位术的精准度、安全性和个体化水平,如Matthias等<sup>[79]</sup>的多中心研究进一步证实,应用3D打印截骨导板的患者术后下肢力线矫正误差控制在 $1.5^\circ$ 以内,而传统手术组误差为 $3.2^\circ\sim 4.5^\circ$ 。

**3.2 个性化定位导板** 在传统的手术方式中,医师截骨后需要凭借经验、肉眼观察和术中透视来估计骨块的位置,并手动调整角度,不仅耗时且极易因二维影像的误导或三维空间判断的偏差,导致矫正不足或过度,这将直接影响手术效果。3D打印定位导板的出现,可从根本上消除这种不确定性<sup>[69]</sup>。当截骨导板精确切割胫骨结节骨块后,可根据原本骨床的形态设计出个性化定位导板<sup>[80]</sup>,该导板基于三维模型的反求性贴合,确保导板放置位置的唯一性和正确性。如Lan等<sup>[80]</sup>的研究显示,3D打印定位导板在股骨侧定位中的平均角度偏差为 $(1.1\pm 0.3)^\circ$ ,而传统透视定位法偏差为 $(3.4\pm 0.8)^\circ(P<0.001)$ 。导板上设有在术前根据骨块与主干骨骼的空间关系,反向计算得出的导向孔道,医师可通过导向孔道,使用钻头在胫骨主干的骨床上预先钻出用于植入拉力螺钉的螺钉孔,随后将真实的胫骨结节骨块移动到预定位置,沿螺钉孔打入螺钉,将骨块精准、牢固地固定于术前规划中所设定的三维坐标上,实现内移、前移或旋转角度的精确控制<sup>[81-83]</sup>。Chen等<sup>[81]</sup>的前瞻性研究对比了3D打印导板辅助与传统方法在髌骨脱位手术中的定位精度,结果显示导板组定位偏差为 $(0.9\pm 0.2)\text{ mm}$ ,传统组为 $(2.5\pm 0.6)\text{ mm}$ ,导板组手术时间平均缩短28 min,术中透视次数减少约60%。与传统手术方式相比,3D打印定位导板实现了真正意义上的三维空间精准矫正,确保了手术从截骨后成功完成畸形<sup>[64]</sup>。

**3.3 定制化植入物** 在儿童及青少年髌骨脱位的治疗中,对于严重骨软骨缺损或骨骼畸形的患者,标准化的植入物往往难以完全匹配,3D打印技术则根据患者的具体解剖结构和生物力学特征进行个性化设计与制造,使得植入物能够更好地适应患者的骨骼结构和运动需求。此类植入物包含用于股骨滑车成形术的个性化滑车假体,该假体能够精确重建股骨滑车沟的深度与曲率,为髌骨提供稳定的解剖轨道;如Öztürk等<sup>[84]</sup>的研究表明,个性化设计的滑车假体在三维空间上与患者股骨远端形态的平均偏差为 $0.3\sim 0.7\text{ mm}$ ,术后髌骨倾斜角由术前的 $(28.5\pm 4.2)^\circ$ 改善至 $(8.3\pm 2.1)^\circ$ 。用于胫骨结节截骨术的个性化导向截骨板与匹配接骨板,完美贴合局部骨骼形态,将术前规划的截骨位移量直接转化为术中定位,实

现精准固定<sup>[85]</sup>。Sporer等<sup>[85]</sup>的放射立体测量分析显示,3D打印定制化胫骨平台假体在术后6个月时的微动位移仅为0.12~0.28 mm,明显低于传统植入物的0.45~0.68 mm。

骨科手术中可降解材料的相关研究指出,针对儿童与青少年患者的植入物设计,本着“临时固定”与“生长兼容”的原则,可使用聚乳酸<sup>[86]</sup>、聚己内酯<sup>[87]</sup>及其复合材料制成的可吸收接骨板和螺钉等生物可降解材料,Xie等<sup>[86]</sup>的动物实验显示,聚乳酸可吸收螺钉在植入后12个月内保持90%以上的初始力学强度,24个月时降解率达80%以上,降解产物无明显炎症反应。Jin等<sup>[87]</sup>的研究表明,聚己内酯/聚乳酸复合可吸收带在植入后6个月内维持足够固定强度,术后24个月时完全降解,无需二次手术取出,并允许骨骼在其降解过程中逐步承受应力,促进生理性改建。或采用“滑动”或“伸缩”式钢板设计,允许在固定截骨端的同时,不限制骨干纵向生长,该植入物可根据膝关节薄层CT扫描与三维重建,在虚拟环境中进行植入物的个性化设计、生物力学模拟与优化,最终采用医用级金属粉末通过选择性激光熔融等工艺打印成型<sup>[88]</sup>,亦可在金属植入物表面添加羟基磷灰石<sup>[89]</sup>或生长因子涂层,以促进骨整合并减少应力遮挡。Li等<sup>[89]</sup>的研究显示,载锶铜双掺杂羟基磷灰石涂层的钛合金植入物在动物模型中骨整合率提升约35%,术后8周时骨-植入物界面剪切强度达(12.4±1.8) MPa,明显高于无涂层组的(7.6±1.2) MPa( $P<0.01$ )。

与传统标准化植入物相比,3D打印定制植入物解决了儿童群体因骨骼尺寸小、解剖变异大而导致的标准化植入物不适用的问题,实现了与患者骨骼的形态契合,减少了术中为适配植入物而进行的额外骨切除,更好地保留了患者的骨量;并且通过精准还原个体化解剖,优化了髌骨轨迹与髌股关节应力分布,从结构上降低了因矫形不精准导致的关节退变或脱位复发风险<sup>[90]</sup>。

#### 4 总结与展望

本文综合分析3D打印技术在儿童及青少年髌骨脱位治疗领域的应用现状,尽管该技术通过创建患者特定的三维模型、个性化手术导板和植入物,显著提高了手术的精准度和安全性,同时改善临床结果,实现真正意义上的个性化治疗,并且在矫正畸形的同时最大限度保护生长潜能。但其实际应用仍存在一定的挑战性,现有研究多为中短期随访,关注于手术精度与早期功能评分。然而,对于儿童患者,术后5年、10年以上的长期追踪至关重要,需重点关注儿童双下肢长度差异<sup>[91]</sup>、机械轴变化、有

无继发性骨骺早闭或成角畸形以及脱位复发等问题;并通过影像学评估髌股关节及胫股关节的骨关节炎发生率与进展速度<sup>[92]</sup>;进行多中心长期随访,验证3D打印技术能否在提升早期精准度的同时,真正改善远期预后的关键。在临床工作中,适合医用的3D打印材料种类有限,新材料的研发将进一步拓宽其在生物医学领域的应用前景,并且对于骨与软骨缺损的生物3D打印修复研究,现阶段仍停留在体外实验和动物实验阶段,临床应用有效性和安全性仍需进一步探索。

此外,目前绝大多数报道为回顾性病例系列或小样本对照试验,缺乏大规模、多中心的前瞻性随机对照试验,这使得难以排除选择偏倚,也无法形成最强有力的证据<sup>[93]</sup>。并且,从数据获取、三维重建与设计到导板、植入物的打印及术中应用流程,行业内尚未建立公认的技术操作规范与疗效评价金标准。未来仍需由权威学术组织牵头,制定针对儿童应用的3D打印技术指南,并开展高质量的研究,以明确其与传统方法相比的增量效益与成本效益<sup>[94]</sup>。因此,对于现有的前期应用尚缺乏具有说服力的长期随访数据,未来仍有待开展更多高证据级别的临床研究。但随着材料科学与再生医学的不断发展,3D打印技术有望在儿童与青少年髌骨脱位的治疗中发挥越来越重要的作用。未来的研究应当聚焦于生物活性植入物的开发、长期临床结果的评估以及多技术融合平台的建立,为推动个性化精准医疗在儿童骨科的实现提供更多支持。

#### 【参考文献】

- [1] Farr S, Pallamar M. Patellofemorale instabilität bei kindern und jugendlichen[J]. Die Orthopädie, 2024, 53(8): 567-574.
- [2] Lastoria AAD, Hutchinson K, Tapadar T, et al. Patho-morphology of patellar instability in children and adolescents: a systematic review and meta-analysis[J]. Knee, 2024, 48: 166-196.
- [3] Patel NB, Oak SR, Rogers K, et al. The onset and development of patella alta in children with patellar instability[J]. J Pediatr Orthop, 2023, 43(7): 447-452.
- [4] Benady A, Gortzak Y, Ovadia D, et al. Advancements and applications of 3D printing in pediatric orthopedics: a comprehensive review[J]. J Child Orthop, 2025, 19(2): 119-138.
- [5] Nicolas LP, Henry BE, Daniel WG. Patellar instability: will my patella dislocate again?[J]. Curr Opin Pediatr, 2022, 34(1): 76-81.
- [6] Eysturoy HN, Husum CH, Ingelsrud HL, et al. Adolescents with prior patellar dislocation report affected quality of life and function, as measured using the Banff Patella Instability Instrument, Kujala and EQ-5D-5L index scores[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2024, 32(11): 2830-2839.
- [7] Dai R, Wu Y, Jiang Y, et al. Epidemiology of lateral patellar dislocation including bone bruise incidence: five years of data from a trauma center[J]. Orthop Surg, 2024, 16(2): 437-443.

- [8] Huntington SL, Webster EK, Devitt MB, *et al.* Factors associated with an increased risk of recurrence after a first-time patellar dislocation: a systematic review and meta-analysis[J]. *Am J Sports Med*, 2020, 48(10): 2552-2562.
- [9] Sanders LT, Pareek A, Hewett ET, *et al.* Incidence of first-time lateral patellar dislocation: a 21-year population-based study[J]. *Sports Health*, 2018, 10(2): 146-151.
- [10] Flores GW, de Oliveira DF, Ramos APS, *et al.* Conservative management following patellar dislocation: a level I systematic review[J]. *J Orthop Surg Res*, 2023, 18(1): 393.
- [11] Parikh NS, Schlechter AJ, Veerkamp WM, *et al.* Consensus-Based guidelines for management of first-time patellar dislocation in adolescents[J]. *J Pediatr Orthop*, 2024, 44(4): e369-e374.
- [12] Smith TO, Gaukroger A, Metcalfe A, *et al.* Surgical versus non-surgical interventions for treating patellar dislocation[J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2023, 1(1): CD008106.
- [13] Lee DY, Kang DG, Jo HS, *et al.* A systematic review and meta-analysis comparing conservative and surgical treatments for acute patellar dislocation in children and adolescents[J]. *Knee Surg Relat Res*, 2023, 35(1): 18.
- [14] Sheehan FT, Shah P, Boden BP. The importance of medial patellar shape as a risk factor for recurrent patellar dislocation in adults[J]. *Am J Sports Med*, 2024, 52(5): 1282-1291.
- [15] Chen JM, Wang CY, Ma CQ, *et al.* 4in1 procedure in treating congenital dislocation of patella in children[J]. *Orthop Surg*, 2025, 17(9): 2647-2652.
- [16] Wright ML, Paul RW, Freedman KB. Medial patellofemoral ligament reconstruction[J]. *Video J Sports Med*, 2021, 1(5): 26350254211040821.
- [17] Zhang YQ, Zhang Z, Wu M, *et al.* Medial patellofemoral ligament reconstruction: a review[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2022, 101(1): e28511.
- [18] Migliorini F, Oliva F, Maffulli GD, *et al.* Isolated medial patellofemoral ligament reconstruction for recurrent patellofemoral instability: analysis of outcomes and risk factors[J]. *J Orthop Surg Res*, 2021, 16(1): 239.
- [19] Anderson G, Diduch DR. Medial Patellofemoral Ligament Reconstruction: Tips and tricks to get it right[J]. *Clin Sports Med*, 2022, 41(1): 89-96.
- [20] Izadpanah K, Meine H, Kubosch J, *et al.* Fluoroscopic guided tunnel placement during medial patellofemoral ligament reconstruction is not accurate in patients with severe trochlear dysplasia[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2020, 28(3): 759-766.
- [21] Duchman KR. Editorial commentary: the medial patellofemoral ligament is not isometric and anatomic reconstruction is important, but just a small piece of the patellar instability puzzle[J]. *Arthroscopy*, 2022, 38(5): 1568-1570.
- [22] Martin H, Milbrandt TA, Shah V, *et al.* Medial patellofemoral ligament reconstruction using allografts in skeletally immature patients[J]. *Am J Sports Med*, 2023, 51(6): 1513-1524.
- [23] Filippo M, Nicola M, Stefan S, *et al.* Allografts for medial patellofemoral ligament (MPFL) reconstruction in adolescent patients with recurrent patellofemoral instability: a systematic review[J]. *Children (Basel, Switzerland)*, 2023, 10(5): 840.
- [24] Hidalgo Perea S, Shannon SR, Green DW. Medial patellofemoral ligament reconstruction with open physes[J]. *Clin Sports Med*, 2022, 41(1): 97-108.
- [25] Yang GM, Wang YY, Zuo LX, *et al.* Good outcomes of combined femoral derotation osteotomy and medial retinaculum plasty in patients with recurrent patellar dislocation[J]. *Orthop Surg*, 2019, 11(4): 578-585.
- [26] Ahrend M, Eisenmann T, Herbst M, *et al.* Increased tibial tubercle-trochlear groove and patellar height indicate a higher risk of recurrent patellar dislocation following medial reefing[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2022, 30(4): 1404-1413.
- [27] Julien R, Sébatien L, Simone C, *et al.* Short lateral posterior condyle is associated with trochlea dysplasia and patellar dislocation[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2018, 27(3): 731-739.
- [28] Grisdelà PT, Paschos N, Tanaka MJ. Fixed (congenital) patellar dislocation[J]. *Clin Sports Med*, 2022, 41(1): 123-136.
- [29] Liebensteiner M, Keiler A, El Attal R, *et al.* Conservative versus tailored surgical treatment in patients with first time lateral patella dislocation: a randomized-controlled trial[J]. *J Orthop Surg Res*, 2021, 16(1): 378-378.
- [30] Hao K, Li Z, Wang J, *et al.* Morphological improvement of the epiphyseal plate and trochlea after surgical correction in skeletally immature patients with patellar dislocation and trochlear dysplasia [J]. *Am J Sports Med*, 2025, 53(2): 372-384.
- [31] Dejour DH, Deroche É. Trochleoplasty: indications in patellar dislocation with high-grade dysplasia. Surgical technique[J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2021, 108(1S): 103160-103160.
- [32] Bram TJ, Lijesen E, Green WD, *et al.* The number of patellar dislocation events is associated with increased chondral damage of the trochlea[J]. *Am J Sports Med*, 2024, 52(10): 2541-2546.
- [33] Xu Z, Zhang H, Fu B, *et al.* Tibial tubercle-roman arch distance: a new measurement of patellar dislocation and indication of tibial tubercle osteotomy[J]. *Orthop J Sports Med*, 2020, 8(4): 2325967120914872-2325967120914872.
- [34] Zhang Y, Nan K, Zhao Y, *et al.* Addition of tibial tubercle osteotomy to combined MPFL reconstruction and lateral retinacular release not recommended for recurrent patellar dislocation in patients with 15 to 20 mm TT-TG[J]. *J Knee Surg*, 2023, 36(13): 1349-1356.
- [35] Fan YS, Jun HW, Xin Y, *et al.* Tibial tubercle osteotomy may not provide additional benefit in treating patella dislocation with increased tibial tuberosity-trochlear groove distance: a systematic review[J]. *Arthroscopy*, 2020, 37(5): 1670-1679.
- [36] Wagner D. Der tuberositas-transfer im kindlichen alter[J]. *Sportverletz Sportschaden*, 2021, 35(4): 194-201.
- [37] Naveed MA, Ackroyd CE, Porteous AJ. Long-term (10- to 15-year) outcome of arthroscopically assisted Elmslie-Trillat tibial tubercle osteotomy[J]. *Bone Joint J*, 2013, 95-B(4): 478-485.
- [38] Imhoff FB, Trierweiler M. Single-cut-Derotationsosteotomie am distalen Femur zur Korrektur von Torsion und frontaler Achse[J]. *Oper Orthop Traumatol*, 2024, 36(2): 96-104.
- [39] Hart R, Náhlík D, Paša L. Derotational intertrochanteric osteotomy in habitual dislocation of the patella[J]. *Acta Chir Orthop Traumatol Cech*, 2020, 87(6): 404-408.
- [40] Hall MJ, Mandalia VI. Tibial tubercle osteotomy for patello-femoral joint disorders[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2016, 24(3): 855-861.
- [41] Drapeau-Zgoralski V, Swift B, Caines A, *et al.* Lateral patellar instability[J]. *J Bone Jt Surg*, 2023, 105(5): 397-409.
- [42] Hevesi M, Sivasundaram L, Meeker ZD, *et al.* Tibial tubercle osteotomy with concomitant medial patellofemoral ligament

- reconstruction[J]. *Video J Sports Med.* 2023, 3(1): 6350254221131588.
- [43] 闫鹏安, 路凡, 蔡逸帆, 等. 内侧髌股韧带重建术中股骨侧定位点研究进展[J]. *中国修复重建外科杂志*, 2024, 38(10): 1276-1282.
- [44] Fulkerson J, Park N, Manafzadeh RA, *et al.* Three-dimensional tibial tubercle transfer planning[J]. *Video J Sports Med*, 2025, 5(5): 26350254251342819.
- [45] Yu KE, Wentworth AJ, Morris JM, *et al.* 3D printed models of trochlear dysplasia and trochleoplasty simulation for trainee education[J]. *Arthrosc Tech*, 2023, 12(5): e757-e761.
- [46] Chen J, Ma J, Wang Y, *et al.* Retracted article: computer-aided design combined with 3D-printed osteotomy guide-assisted derotational distal femoral osteotomy for treating recurrent patellar dislocation with increased femoral anteversion angle: a retrospective study[J]. *International Orthopaedics (SICOT)*. 2023, 47, 2197-2205.
- [47] 杨佳乐, 刘峰, 高林, 等. 儿童及青少年患者首次髌骨脱位的治疗进展[J/OL]. *中国骨伤*, 2025.
- [48] Takagawa S, Kobayashi N, Yukizawa Y, *et al.* Preoperative soft tissue laxity around knee was associated with less accurate alignment correction after hybrid closed-wedge high tibial osteotomy[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2020, 28(9): 3022-3030.
- [49] Liu DJ, Li YL, Li T, *et al.* The use of a 3D-printed individualized navigation template to assist in the anatomical reconstruction surgery of the anterior cruciate ligament[J]. *Ann Transl Med*, 2020, 8(24): 1656.
- [50] Tan AKS, Chua SKK, Koh DTS, *et al.* Patient-specific 3-dimensional surgical guide for anteriorizing tibial tubercle osteotomy to treat patellofemoral osteoarthritis[J]. *Arthrosc Tech*, 2025, 14(12): 103899.
- [51] Micicoi G, Corin B, Argenson JN, *et al.* Patient specific instrumentation allow precise derotational correction of femoral and tibial torsional deformities[J]. *Knee*, 2022, 38: 153-163.
- [52] 吕乐, 白云召, 李鹏举, 等. EOSTM3D影像系统诊断复发性髌骨脱位的可靠性和稳定性[J]. *骨科*, 2024, 15(2): 104-108.
- [53] 洪庆南, 王鸿泰, 卢宜哲, 等. 3D打印技术辅助微创经皮钢板固定术治疗复杂胫骨平台骨折[J]. *中国临床医生杂志*, 2025, 53(9): 1146-1150.
- [54] Yu KE, Cooperman DR, Schneble CA, *et al.* Reconceptualization of trochlear dysplasia in patients with recurrent patellar dislocation using 3-dimensional models[J]. *Orthop J Sports Med*, 2022, 10(11): 23259671221138257.
- [55] 徐彪, 路坦. 不同手术方式治疗复发性髌骨脱位对半月板及髌股关节应力影响的三维有限元分析[J]. *中国运动医学杂志*, 2025, 44(7): 521-529.
- [56] Degen N, Daniel T, Sass J, *et al.* A new 3D software for analysis and planning of lower limb and patellofemoral alignment: reliability and accuracy[J]. *Knee*, 2022, 34: 1-8.
- [57] Michaud F, Luaces A, Mouzo F, *et al.* Use of patellofemoral digital twins for patellar tracking and treatment prediction: comparison of 3D models and contact detection algorithms[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2024, 12: 1347720.
- [58] Cuadrado J, Michaud F, Lugiur U, *et al.* Using accelerometer data to tune the parameters of an extended kalman filter for optical motion capture: preliminary application to gait analysis[J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21(2): 427.
- [59] Michaud F, Mouzo F, Dopico D, *et al.* A sensorized 3D-printed knee test rig for preliminary experimental validation of patellar tracking and contact simulation[J]. *Sensors (Basel)*, 2024, 24(10): 3042.
- [60] 蔡国锋, 王旭, 宁梓文, 等. 伸膝装置联合重排治疗复发性髌骨脱位的三维有限元分析[J]. *中国修复重建外科杂志*, 2022, 36(5): 573-581.
- [61] Yuan M, Tian W, Sheng B, *et al.* Correlation between tibial tubercle-trochlear groove and 3D shiftactive extension in patellar dislocation: an active extension analysis based on three-dimensional measurements[J]. *Eur J Radiol*, 2025, 185: 111999-111999.
- [62] Zhang X, Zhao B, Zheng J, *et al.* Reliability and reproducibility of the EOS 3D imaging system in measuring TT-TG distance in patients with recurrent patellar dislocation[J]. *Orthop J Sports Med*, 2025, 13(8): 23259671251361493.
- [63] Du H, Tian XX, Guo FQ, *et al.* Evaluation of different surgical methods in treating recurrent patella dislocation after three-dimensional reconstruction[J]. *Int Orthop*, 2017, 41(12): 2517-2524.
- [64] Yu KE, Beitler B, Cooperman DR, *et al.* Three-dimensional reproductions for surgical decision-making in the treatment of recurrent patella dislocation[J]. *Arthrosc Tech*, 2023, 12(6): e807-e811.
- [65] Pérez MES, Pérez MMI, Suárez MR, *et al.* The validation of the tanner-whitehouse 3 method for radiological bone assessments in a pediatric population from the Canary Islands[J]. *Osteology*, 2025, 5(1): 6-6.
- [66] Lucie H, Jana H, Stefan DV, *et al.* Influence of tension-band plates on the mechanical loading of the femoral growth plate during guided growth due to coronal plane deformities[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2023, 11:1165963.
- [67] Márquez Gómez M, Castaño Zapatero CM, Mediavilla Santos L, *et al.* Femoral extra-articular deformity in the context of prosthetic knee surgery and application of customized treatment using 3D planning and printing techniques[J]. *J Orthop Case Rep*, 2024, 14(12): 78-82.
- [68] Wei D, Zhou W, Huang J, *et al.* Application of a customized 3D-printed osteotomy guide plate for tibial transverse transport[J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 22771.
- [69] Meng M, Jinzuo W, Tianze S, *et al.* Clinical applications and prospects of 3D printing guide templates in orthopaedics[J]. *J Orthop Translat*, 2022, 34: 22-41.
- [70] Sieberer J, Rancu A, Park N, *et al.* Patellar tilt calculation utilizing artificial intelligence on CT knee imaging[J]. *Knee*, 2025, 54: 217-221.
- [71] 王萌. 三维数字化膝关节外科手术规划研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2019.
- [72] Hall EL, Baines S, Bilmont A, *et al.* Accuracy of patient-specific three-dimensional-printed osteotomy and reduction guides for distal femoral osteotomy in dogs with medial patella luxation[J]. *Vet Surg*, 2019, 48(4): 584-591.
- [73] Jeong SH, Samuel LT, Acuña AJ, *et al.* Patient-specific high tibial osteotomy for varus malalignment: 3D-printed plating technique and review of the literature[J]. *Eur J Orthop Surg Traumatol*, 2021, 32(5): 845-855.
- [74] Jin L, Jing W, Saroj R, *et al.* 3D-printed model and osteotomy template technique compared with conventional closing-wedge

- osteotomy in cubitus varus deformity[J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 6762-6762.
- [75] Jin C, Chao G, Hua JS, *et al*. Effect of 3D printing technology in proximal femoral osteotomy in children with developmental dysplasia of the hip[J]. *Dis Markers*, 2022, 2022: 1291996.
- [76] Cao J, Zhang Y, Wang X, *et al*. Comparative analysis of triplanar Chevron osteotomy (TCO) and Chevron osteotomy (CO) for treating mild to moderate hallux valgus *via* computer simulation and 3D printing: An observational study[J]. *Medicine*, 2024, 103(48): e40643.
- [77] 张艳. 3D打印导板辅助股骨隧道定位行内侧髌股韧带重建的临床疗效及运动学分析[D]. 昆明医科大学, 2021.
- [78] 李振伟, 韩冠生, 牛国旗, 等. 3D打印个性化胫骨结节截骨在治疗复发性髌骨脱位中的应用效果[J]. *安徽医学*, 2020, 41(8): 911-913.
- [79] Matthias J, Rozbruch SR, Fragomen AT, *et al*. Accuracy of lower extremity alignment correction using patient-specific cutting guides and anatomically contoured plates[J]. *J Pers Med*, 2025, 15(7): 289.
- [80] Lan X, Huang J, Tian F, *et al*. Application of 3D-printed personalized guide for lateral femoral positioning in anterior cruciate ligament reconstruction of the knee[J]. *Altern Ther Health Med*, 2023, 29(7): 360-364.
- [81] Chen TZ, Chen JJ, Li XS, *et al*. A comparative study on 3D printing-assisted arthroscopic IDEAL point femoral tunnel positioning for anterior cruciate ligament reconstruction *versus* conventional arthroscopic positioning[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2024, 25(1): 481.
- [82] Zhang WH, Mou LM, Zhang SP, *et al*. 3D-printed individualized navigation template *versus* the fluoroscopic guide to defining the femoral tunnel for medial patellofemoral ligament reconstruction: a retrospective study[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2023, 102(4): e32729.
- [83] Ikenaka R, Koizumi S, Park H, *et al*. Accuracy of orthodontic anchor screw placement using a 3D-printed surgical guide[J]. *Cureus*, 2024, 16(8): e67431.
- [84] Öztürk Y, Ayazoğlu M, Öztürk Ç, *et al*. A new patient-specific overformed anatomical implant design method to reconstruct dysplastic femur trochlea[J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 3204.
- [85] Sporer S, MacLean L, Burger A, *et al*. Evaluation of a 3D-printed total knee arthroplasty using radiostereometric analysis: assessment of highly porous biological fixation of the tibial baseplate and metal-backed patellar component[J]. *Bone Joint J*, 2019, 101-B(7\_Supple\_C): 40-47.
- [86] Xie Y, Tan J, Fang S, *et al*. A biodegradable, osteo-regenerative and biomechanically robust polylactide bone screw for clinical orthopedic surgery[J]. *Int J Biol Macromol*, 2024, 283(P1): 137477.
- [87] Jin B, Zhang C, Zhong Z, *et al*. A novel degradable PCL/PLLA strapping band for internal fixation of fracture[J]. *J Mater Sci Mater Med*, 2023, 34(11): 57.
- [88] Kolevar P M, Koshar A, Hirsch J, *et al*. Development of a patient specific cartilage graft using magnetic resonance imaging and 3D printing[J]. *J ISAKOS*, 2024, 9(4): 519-525.
- [89] Li SH, He Y, Li J, *et al*. Titanium scaffold loaded with strontium and copper double-doped hydroxyapatite can inhibit bacterial growth and enhance osteogenesis[J]. *J Biomater Appl*, 2022, 37(2): 195-203.
- [90] Calderone D, Cesarelli G, Ricciardi C, *et al*. 3D printing application for orthopedic pediatric surgery – a systematic review[J]. *Rapid Prototyping J*, 2024, 30(11): 276-288.
- [91] Tsuda Y, Nishida Y, Sakamoto A, *et al*. Long-term functional and quality of life outcomes after cementless minimally invasive extendable endoprosthesis replacement in skeletally immature patients with bone sarcomas at the lower limb: a Japanese Musculoskeletal Oncology Group (JMOG) study[J]. *Bone Jt Open*, 2025, 6(8): 954-963.
- [92] Jääskelä M, Perhomaa M, Lempainen L, *et al*. MPFL reconstruction *vs*. Insall procedure for adolescent patellar instability: nine-year follow-up on osteoarthritis, redislocations, and return to sports[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2025, 26(1): 749-749.
- [93] Liu YY, Rendón EM. 3D-printed biodegradable polymer scaffolds for tissue engineering: An overview, current stage and future perspectives[J]. *Next Mater*, 2025, 8: 100647-100647.
- [94] Jonathan EM, Oghama OE, Ifijen IH, *et al*. Biodegradable polymers for 3D printing of tissue engineering scaffolds: challenges and future directions[A]. TMS 2024 153rd Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings[C]. Cham: Springer, 2024: 469-483.

(责任编辑: 纪方方)