

· 综述 ·

# 数字化医疗与三维打印技术在足踝外科的应用<sup>△</sup>

王嘉正, 施忠民\*

(上海交通大学医学院附属第六人民医院, 上海 200233)

**摘要:** 数字医学是近年来出现的一门借助信息技术并结合现代医学的研究与实践而形成的集数字医学诊断、治疗和检测技术于一体的新兴前沿科学。数字医学包括三维模型重建、手术导航系统、3D打印技术及个性化手术导板和手术机器人等。三维打印, 又称3D打印, 是一种快速成型技术, 以数字模型文件为基础, 运用可粘合材料, 通过逐层打印的方式构造物体。从个性化定制型足踝部矫形器, 到定制手术截骨导板和螺钉导向器, 3D打印技术在足踝外科领域的应用已经逐渐深入; 从术前规划和宣教、医学教育, 再到临床医学实践中的应用, 3D打印技术的优势涉及各个方面。3D打印技术利于更细致的术前规划、更精简的手术过程、更高效的医患交流, 对实施精准医疗的贡献是显著的。目前研究表明, 3D打印技术有可能显著提高足踝外科医生的临床技能、优化手术过程、增进医患关系、改善医患沟通, 提高患者对所患疾病的认知, 对改善整体医疗行为有着不可忽视的积极作用。

**关键词:** 数字医学, 3D打印, 踝关节, 足踝外科

**中图分类号:** R687      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-8478 (2025) 04-0329-06

**Application of digital medicine and three-dimensional printing technology in foot and ankle surgery // WANG Jia-zheng, SHI Zhong-min. Department of Orthopedics, Shanghai Sixth People's Hospital, Shanghai JiaoTong University School of Medicine, Shanghai 200233, China**

**Abstract:** Digital medicine is an emerging frontier science that combines digital medical diagnosis, treatment and detection technology with the help of information technology and modern medical research and practice in recent years. Digital medicine includes 3D model reconstruction, surgical navigation systems, 3D printing technology, personalized surgical guides and surgical robots. Three dimensional printing, also known as 3D printing, is a rapid prototyping technology that constructs objects by printing them layer by layer, based on digital model files and using adhesive materials. From customized foot and ankle orthotics to customized osteotomy guides and screw guides, 3D printing technology has been gradually applied in the field of foot and ankle surgery. From preoperative planning and education, medical education, and then to the application of clinical medical practice, the advantages of 3D printing technology involve various aspects. With more detailed preoperative planning, more streamlined surgical procedures, and more efficient doctor-patient communication, the contribution of 3D printing technology to the implementation of precision medicine is significant. Current research shows that 3D printing technology may significantly improve the clinical skills of foot and ankle surgeons, optimize the surgical process, enhance the doctor-patient relationship, improve doctor-patient communication, build up patients' cognition of the disease, and have a positive role in improving the overall medical behavior.

**Key words:** digital medicine, 3D printing, ankle joint, foot and ankle surgery

数字医学 (digital medicine, DM) 是一门借助信息技术, 结合现代医学的研究与实践而形成的集数字医学诊断、治疗和检测技术于一体的新兴前沿科学。DM 包括三维模型重建、手术导航系统、3D打印技术及个性化手术导板和手术机器人等<sup>[1]</sup>。三维打印,

又称3D打印 (3D-printing, 3DP), 是一种快速成型技术, 属于增材制造。3DP以数字模型文件为基础, 运用粉末状金属或塑料等可粘合材料, 通过逐层打印的方式构造物体。

3DP通常采用数字技术材料打印机实现。3DP已

DOI:10.20184/j.cnki.Issn1005-8478.110462

<sup>△</sup>基金项目: 上海交通大学“交大之星”计划医工交叉研究基金项目 (编号: YG2022ZD018); 上海市科学技术委员会科技计划项目 (编号: 23015820500)

作者简介: 王嘉正, 在读硕士, 研究方向: 足踝外科, (电子信箱) wangjia\_zheng1998@126.com

\* 通信作者: 施忠民, (电子信箱) 18930177323@163.com

经逐渐走入临床医学，在骨科的应用更为广泛，例如在骨恶性肿瘤的保肢治疗中，使用个性化定制的3DP假体，极大限度地保留了患肢外观的完整性及功能。在足踝外科领域中，3DP在术前、术中及医学教育等场景都有多样的应用前景，为足踝疾病的诊治带来更多可能。3DP技术有可能显著提高目前足踝外科医生的临床技能，增进医患关系，改善医患沟通，提高患者对所患疾病的认识。同时，3DP可以针对患者个性化定制的置入器械和手术工具，优化手术过程<sup>[2]</sup>。

## 1 3DP技术在患者宣教、医学教育中的应用

### 1.1 患者宣教

除足踝部创伤及骨折外，足踝外科常见的疾病还包括各种部位的畸形，例如马蹄内翻足、足跗外翻、扁平足等。这些疾病往往涉及到复杂的解剖结构。虽然CT检查提供了3D重建模型，但二维平面（显示器）对于描绘和展示3D结构始终是一个限制<sup>[3]</sup>。

如何向患者清晰地展示解剖关系和手术过程，一直是足踝外科医师临床实践中的难题。3DP技术的出现使得这一难题得到初步解决。在术前检查中，医生可以获取病变部位影像学资料，并导入3DP程序打印，最终可以获得所需的患者3D解剖物理模型，更好地剖析每个病例可能出现的复杂解剖结构<sup>[2, 4]</sup>。

患者可以通过观察模型，在不具备医学基础的前提下提升对病情的了解，从而提高依从性，对患者满意度有积极影响<sup>[2, 5-7]</sup>。复杂、抽象的解剖结构和骨与关节空间位置关系可以通过3D模型得到充分的展示；骨折、畸形和骨赘等病理表现也可被细致地观察到，这些都极大地改善了医患沟通，为治疗及预后打下良好基础。

### 1.2 医学教育

3DP技术在医学教育，尤其是对年轻的足踝外科医师有着显著的作用<sup>[5, 8]</sup>。3D模型直接复制了患者的解剖结构，不仅可以完整保留足踝部疾病的病理解剖<sup>[9]</sup>，也可以体现不同个体之间的解剖变异。

3D模型在医师技能培训中的作用也不容忽视。在住院医师手术技能培训中，可以通过各种疾病模型练习关键手术步骤，进行模拟手术，本质上有助于年轻医生更快成长，提高临床医生的理论知识和实践技能，减少学习曲线，降低真正手术过程中可被预知的风险发生率。由于3D模型对于身体解剖结构的可重复性，不同中心之间可以共享这些模型与3D建模原

始图像数据，用大样本来增强和改善医学教育<sup>[2, 3, 10]</sup>。

## 2 3DP技术在临床中的应用

### 2.1 术前规划

3DP可以基于患者特定的解剖结构定制所需假体或手术器械，并对手术过程及术中可能出现的问题进行模拟和预判，从而实现精准医疗。

3DP解剖模型可以增强医生对患者疾病病理解剖细节的精细识别和认知，直观地展现了手术计划<sup>[9]</sup>。国外一团队采集患者三维图像数据并使用3DP技术获得踝关节骨折实体模型，模拟手术过程，更好地指导了手术规划<sup>[6]</sup>；朱仲廉等<sup>[11]</sup>在术前使用3DP骨折模型进行模拟，多角度分析骨折移位情况，并进行模拟复位。对于距跟联合切除术，术前使用3DP建模分析距跟联合的几何形状、体积和与正常组织的关系，有助于节省手术时长，提高切除的准确性<sup>[12]</sup>。Shi等<sup>[13]</sup>认为依照3DP技术辅助制定的术前规划实施手术，可以显著减少术后并发症的发生率。另一研究团队通过3DP技术打印患者跟骨骨折模型，术前规划跟骨内固定钢板和空心螺钉置入角度，减少了术中切割钢板的概率，避免了置钉过程中空心螺钉与锁定螺钉的碰撞。虽然与不使用3DP技术辅助组相比，骨折整复质量相似，但经过严密的术前规划，使用3DP技术辅助组不仅手术时间更短，更实现了术后早期负重，未出现骨折块下沉或复位失败等并发症<sup>[14]</sup>。

3DP模型假体经过消毒灭菌后，可在手术过程中使用。例如在模型假体上可以标记关键的解剖部位，供术中参考，以降低手术过程中可能出现的术野模糊、暴露不充分等影响<sup>[10]</sup>。

### 2.2 3DP导板

在手术过程中，螺钉能否置入到合适的位置、截骨的部位是否准确，是建立在导针或摆锯精确定位钻孔的基础上的。以往这一过程是由足踝外科医生根据丰富的临床经验完成的，并且术中还需对手术部位进行多次C形臂X线机透视以确定导针位置，这会延长手术时间，而且电离辐射也不容忽略<sup>[15]</sup>。3DP技术的辅助，可以极大程度降低这些影响。在术前通过三维重建患者模型，规划截骨或螺钉置入的部位及角度、设计手术入路，模拟手术，并最终依据规划，打印并使用特定的截骨导板或螺钉导向器。国内外学者研究发现，运用3DP技术和导板或导向器辅助进行

截骨或置入螺钉，可以显著提高手术精确度、缩短手术时间，减少术中出血量和透视次数及时长<sup>[2-6, 8, 13, 16-22]</sup>，改善预后。

### 2.2.1 3DP 截骨导板

Sobron 等<sup>[20]</sup>认为 3DP 患者特定截骨导板提高中足截骨的准确性，降低人为因素导致的风险；Liu 等<sup>[23]</sup>设计了一种 3DP 患者专用截骨导板 (patient-specific instrument, PSI)，用以辅助足三关节融合术治疗僵硬性马蹄内翻足。使用 PSI 进行截骨克服了传统截骨方式所不可避免的足部长度丢失等问题，保持了足部的整体美观。施忠民等<sup>[24]</sup>使用 3DP 个性化截骨导板辅助踝上截骨术治疗内翻性踝关节炎，虽与传统开放截骨手术相比矫正效果无显著差异，但使用 3DP 导板可以减少术中盲目摸索，提高手术安全性和效率。张宇航等<sup>[25]</sup>使用 3DP 技术辅助踇外翻 Chevron 截骨术，实现了更精确的截骨，纠正 IMA 的精度更高。

### 2.2.2 3DP 置钉导板

在 3DP 置钉导板的辅助下，可以实现更加精准的置钉过程。Ferreira 等<sup>[26]</sup>使用 3DP 技术打印了两个微创踇外翻截骨和置钉导向器，一个用于贴合患者皮肤表面确定截骨部位；另一个用于确定截骨后螺钉置入的角度和部位，辅助螺钉置入。李广翼等<sup>[27]</sup>使用三维打印导板辅助关节镜进行踝关节融合术，在术前获取踝关节及软组织的三维数据并打印一体化导板。导板可包绕踝关节内外侧及后侧，含 3 组导向钉道模块，模块在置入导钉后可与导板拆卸。虽相较于开放式手术组而言，手术时间略长，但可明显减少术中透视次数、减轻术后疼痛、减少并发症、感染及二次手术率和缩短住院天数等。尽管该方法创伤小，但对主刀医师的经验和资质要求较高。

### 2.2.3 3DP 踝关节置换导板

全踝关节置换术 (total ankle replacement, TAR) 一直以来是足踝外科领域研究的热门话题。传统 TAR 多采用厂家配套的标准化截骨定位杆，距骨假体与距骨之间的多个截骨面需采用 3~4 个截骨导引器。截骨角度容易受到主刀医师经验或患者骨解剖变异的影响，从而导致踝关节假体匹配度下降。对线不良、骨质差以及距骨旋转可能导致人工踝关节衬垫磨损增加，引起距骨假体松动，所以最终 TAR 效果与术中截骨过程息息相关<sup>[28]</sup>。刘辉亮等<sup>[28]</sup>使用计算机辅助设计 (computer aided design, CAD) 软件结合 3DP 技术，将患者图像数据导入 CAD 等图像处理软件进行图像后处理，并通过计算机模拟手术以选择最

佳适配度假体型号。同时，距骨和胫骨精确截骨可以有效提高假体吻合度，降低假体松动发生率和术中及术后医源性骨折风险。

CT 三维重建和 3DP 导板在辅助手术方面有极高的应用价值，但随着负重 CT 扫描 (weight-bearing CT scan, WBCT) 应用逐渐普及，不建议根据 WBCT 三维重建模型制造截骨导板<sup>[29]</sup>。由于术中足部处于非负重状态，使用负重位模型可能会改变足部解剖标志，降低匹配度。由于 3DP 无法反映有关骨折部位周围的软组织情况，但软组织在骨折复位的过程中也非常重要，所以 3DP 不适用于有软组织卡压或严重的粉碎性骨折<sup>[3]</sup>。

### 2.3 3DP 定制假体

距骨缺血性坏死 (talus avascular necrosis, TAVN) 的治疗是近年来热烈讨论的话题。对于 TAVN 的治疗往往选择踝关节融合术 (ankle arthrodesis, AA) 或胫距跟融合术 (tibio-talo-calcaneal arthrodesis, TTCA)，术后患者在功能评分方面有所改善，但骨不连和二次手术率居高不下<sup>[30]</sup>，并且融合术后踝关节功能的丧失会引起步态的改变，可能会导致相邻关节的压力增加<sup>[31]</sup>。基于同侧或对侧的距骨 CT 平扫，全距骨置换术 (total talus replacement, TTR) 的可行性有所提升。Mu 等<sup>[32]</sup>基于双侧距骨的 X 线、CT 和 MRI 图像数据，使用 3DP 距骨假体治疗距骨坏死合并塌陷 (talar necrosis and collapse, TNC)，既保证了距骨假体的完全匹配，又保证了手术的可行性，3DP 假体的置入为患者提供了距骨的解剖重建。相较于 TTCA，3DP 辅助 TTR 术在解决患者疼痛的同时，保留了关节的活动度，不失为 TAVN 或 TNC 患者的另一种选择<sup>[31]</sup>。3DP 假体精度高，可满足精密修复的要求，并且对于承重关节，例如髋、膝关节等，传统假体无法根据需要提供螺钉或软组织固定孔，而 3DP 还可实现该部分的个性化设计，提高假体置入后的稳定性<sup>[33]</sup>。Akoh 等<sup>[34]</sup>为 1 例 59 岁女性、同时出现胫距、距下及距舟三关节退变的患者，实施了全踝全距骨置换术 (total ankle and total talus replacement, TATTR)，患者预后良好。3DP 距骨假体的穹窿圆顶可以与 TAR 踝关节聚乙烯衬垫完美匹配；并且由于使用 3DP 技术，术中定位时间大幅减少，极大降低了术中重要神经血管肌腱损伤的发生率。而在以往，此类患者通常只能接受环距骨融合术或结构性植骨融合术作为挽救方法。

### 2.4 3DP 骨缺损假体

踝关节和后足的大型骨缺损 (large osseous de-

fects, LOD)是由多种原因引起的,常见的原因包括大型关节融合术或置换手术(例如TTCA、AA、TAR等)翻修、严重创伤、感染和夏科氏关节病等。手术过程中需要种植大量同种异体骨或自体髂骨、带血管蒂腓骨等<sup>[35]</sup>。当患者骨缺损较多时,需要种植的骨量也多,高昂的费用或自体骨供区问题不容小觑,对恢复肢体长度存在一定的考验。3DP技术可以使置入物在设计时有更多的可能性,根据患者骨缺损的体积和形状设计的置入物,其稳定性将会比传统的结构性植骨更有优势,也减少了移植骨数量。Strydom等<sup>[35]</sup>设计并使用一种3D打印多孔钛置入物治疗踝关节LOD。根据患者骨缺损形状设计出异形中空多孔钛合金材料,取患者髂后上嵴处自体骨粉碎后填入假体,最后依靠定位器置入患者体内。通过中空部分自体骨愈合,确保了假体与周围骨组织交界处结合的稳定性和降低假体松动概率,对恢复肢体长度和稳定性具有显著优势。

### 2.5 3DP个性化足踝矫正器

通过3DP技术制作的足踝矫正和康复器械能够实现与患肢的完美匹配,材料成本较低,能满足个体化及个性化的需求<sup>[36, 37]</sup>。一部分足踝术后的患者,可搭配使用个性化足踝部矫正器(ankle-foot orthosis, AFO),维持矫形效果;另一部分患者由于术后骨性结构和足踝部诸骨解剖关系发生改变,使用AFO可以帮助其正常穿鞋、行走等。有研究表明,结合3DP技术打造的患者AFO,可以更有效地减少与足底病变有关的损害,提高跖筋膜炎患者的舒适度<sup>[38]</sup>;通过采集经手法整复后的小儿扁平足足底压力数据,使用3DP定制鞋垫,更能贴合足弓矫形后的状态,患儿适应更快<sup>[39]</sup>。然而,部分康复器械的设计和组装仍较复杂,在制造零部件时成本较高<sup>[36]</sup>。

## 3 3D生物打印的应用

3D生物打印(3D bio-printing, 3DBP)是3DP技术中重要的分支,是指将细胞、生长因子及支架结合在一起形成完整的整体结构,并实现不同种类细胞在支架内部的准确定位,通过相互作用制造出个性化医疗器械、组织器官乃至生命体等。3DBP有诸多优势,例如:(1)可以快速构建宏观或微观结构仿生组织工程支架;(2)构建三维“多细胞/材料”体系;(3)构建仿生细胞外基质环境等<sup>[40]</sup>。

### 3.1 类器官

类器官具有来源组织或器官的部分关键结构和功

能特征。通过干细胞自组织方式,在体外3D培养条件下诱导分化形成有功能的组织复合体,在构造与功能上同人体真实器官高度相似,且可在体外持续稳定传代培养。为初步应对骨与软骨疾病治疗这一难点,骨/软骨类器官(bone/cartilage organoids, BO/CO)概念应运而生。BO/CO基于3D体外细胞培养系统建立、含有一种以上细胞类型的微型组织,与体内骨/软骨结构高度相似,可复制出骨/软骨的复杂空间形态和功能,表现出骨/软骨的某些生理特征。BO/CO能够模拟体内代谢和再生修复过程,有助于阐明骨/软骨在病理状态下的修复机制;与体内骨/软骨具有相似生理反应,亦可直接用于组织修复再生,用于缺损原位修复。BO/CO在体内可以实现自我更新和自我组织,这是区别于传统体外组织培养的关键<sup>[41]</sup>。

### 3.2 3DBP软骨细胞外基质

距骨骨软骨损伤的治疗一直是一大难题。由于软骨组织缺乏血供,损伤很难有效治愈。常规的软骨修复办法由于缺乏软骨生长支架及生长因子,其再生效果往往不尽如人意。

3DBP技术可将软骨细胞外基质、支架材料整合,置入患者软骨缺损部位,为软骨修复再生提供了有序生长空间。Chen等<sup>[42]</sup>使用3DP技术打印了一种整合了软骨细胞外基质、明胶甲基丙烯酸酯、外分泌体的支架,促进了软骨细胞迁移和动物模型的软骨再生,可能是早期治疗骨关节炎的一种有效策略。也有学者使用甲基丙烯酸基团修饰支链多糖,开发支链多糖水凝胶,用于创伤后软骨损伤的治疗<sup>[43]</sup>。

## 4 结语

未来骨科的发展方向将是精确化、个性化、微创化与数字化。从定制AFO,到特制手术截骨导板、置钉导向器和骨缺损填充假体,再到3D生物打印骨类器官、水凝胶,3DP技术在足踝外科领域的应用逐渐深入;从术前规划和宣教、医学教育,再到临床医学实践中的应用,3DP技术的优势涉及各个方面,对实施精准医疗的贡献是显著的。随着研究的不断深入,期待实现3DP技术与临床治疗结合的多样化,为临床医学带来更有前景的未来。

**利益冲突声明** 所有作者声明不存在利益冲突

**作者贡献声明** 王嘉正:文章撰写、文献收集;施忠民:文章审阅、获取研究经费、指导、支持性贡献

### 参考文献

[1] 龚翼星,毛晓芬,杨波,等.数字医学在骨科中的应用进展[J].

- 中华关节外科杂志, 2018, 12 (2) : 266-270. DOI: 10.3877/cma.j.issn1674-134X.2018.02.021.
- Gong YX, Mao XF, Yang B, et al. Application progress of digital medicine in orthopedic surgery [J]. Chinese Journal of Joint Surgery, 2018, 12 (2) : 266-270. DOI: 10.3877/cma.j.issn1674-134X.2018.02.021.
- [2] Aimar A, Palermo A, Innocenti B. The role of 3D printing in medical applications: a state of the art [J]. J Healthc Eng, 2019, 2019 : 5340616. DOI: 10.1155/2019/5340616.
- [3] Ozturk AM, Ozer MA, Suer O, et al. Evaluation of the effects of using 3D-patient specific models of displaced intra-articular calcaneal fractures in surgery [J]. Injury, 2022, 53 (Suppl 2) : S40-S51. DOI: 10.1016/j.injury.2020.04.057.
- [4] Ozturk AM, Suer O, Coban I, et al. Three-dimensional printed anatomical models help in correcting foot alignment in hallux valgus deformities [J]. Indian J Orthop, 2020, 54 (Suppl 1) : 199-209. DOI: 10.1007/s43465-020-00110-w.
- [5] Rodriguez Colon R, Nayak VV, Parente PEL, et al. The presence of 3D printing in orthopedics: A clinical and material review [J]. J Orthop Res, 2023, 41 (3) : 601-613. DOI: 10.1002/jor.25388.
- [6] Zheng H, Xia Y, Ni X, et al. Clinical effects of 3D printing-assisted posterolateral incision in the treatment of ankle fractures involving the posterior malleolus [J]. Front Surg, 2023, 10: 1176254. DOI: 10.3389/fsurg.2023.1176254.
- [7] Montgomery SJ, Kooner SS, Ludwig TE, et al. Impact of 3D printed calcaneal models on fracture understanding and confidence in orthopedic surgery residents [J]. J Surg Educ, 2020, 77 (2) : 472-478. DOI: 10.1016/j.jsurg.2019.10.004.
- [8] Thomas CN, Mavrommatis S, Schroder LK, et al. An overview of 3D printing and the orthopaedic application of patient-specific models in malunion surgery [J]. Injury, 2022, 53 (3) : 977-983. DOI: 10.1016/j.injury.2021.11.019.
- [9] Fang C, Cai L, Chu G, et al. 3D printing in fracture treatment: Current practice and best practice consensus [J]. Unfallchirurgie (Heidelb), 2022, 125 (Suppl 1) : 1-7. DOI: 10.1007/s00113-022-01159-y.
- [10] Yang L, Grottkau B, He Z, et al. Three dimensional printing technology and materials for treatment of elbow fractures [J]. Int Orthop, 2017, 41 (11) : 2381-2387. DOI: 10.1007/s00264-017-3627-7.
- [11] 朱仲廉, 吴敏, 胡海贝, 等. 3D 打印辅助钢板固定术治疗复杂踝关节骨折的临床效果观察 [J]. 中国矫形外科杂志, 2018, 26 (20) : 1835-1839. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2018.20.03.
- Zhu ZL, Wu M, Hu HB, et al. Three-dimensional printing-assisted plate fixation versus conventional surgery for complex ankle fractures [J]. Orthopedic Journal of China, 2018, 26 (20) : 1835-1839. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2018.20.03.
- [12] Sobrón FB, Benjumea A, Alonso MB, et al. 3D Printing surgical guide for talocalcaneal coalition resection: technique tip [J]. Foot Ankle Int, 2019, 40 (6) : 727-732. DOI: 10.1177/1071100719833665.
- [13] Shi G, Liu W, Shen Y, et al. 3D printing-assisted extended lateral approach for displaced intra-articular calcaneal fractures: a systematic review and meta-analysis [J]. J Orthop Surg Res, 2021, 16 (1) : 682. DOI: 10.1186/s13018-021-02832-5.
- [14] Park HJ, You KH, Huang B, et al. Can 3-dimensional printing for calcaneal fracture surgery decrease operation time and improve quality of fracture reduction [J]. J Foot Ankle Surg, 2023, 62 (1) : 21-26. DOI: 10.1053/j.jfas.2022.03.004.
- [15] Duan X, He P, Fan H, et al. Application of 3D-printed personalized guide in arthroscopic ankle arthrodesis [J]. Biomed Res Int, 2018, 2018: 3531293. DOI: 10.1155/2018/3531293.
- [16] Meng M, Wang J, Sun T, et al. Clinical applications and prospects of 3D printing guide templates in orthopaedics [J]. J Orthop Translat, 2022, 34: 22-41. DOI: 10.1016/j.jot.2022.03.001.
- [17] Mok SW, Nizak R, Fu SC, et al. From the printer: Potential of three-dimensional printing for orthopaedic applications [J]. J Orthop Translat, 2016, 6: 42-49. DOI: 10.1016/j.jot.2016.04.003.
- [18] Wu Q, Yu T, Lei B, et al. A new individualized three-dimensional printed template for lateral ankle ligament reconstruction [J]. Med Sci Monit, 2020, 26: e922925. DOI: 10.12659/MSM.922925.
- [19] Liu D, Li Y, 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. DOI: 10.21037/atm-20-7515.
- [20] Sobrón FB, Dos Santos-Vaquinhas A, Alonso B, et al. Technique tip: 3D printing surgical guide for pes cavus midfoot osteotomy [J]. Foot Ankle Surg, 2022, 28 (3) : 371-377. DOI: 10.1016/j.fas.2021.05.001.
- [21] Duan XJ, Fan HQ, Wang FY, et al. Application of 3D-printed customized guides in subtalar joint arthrodesis [J]. Orthop Surg, 2019, 11 (3) : 405-413. DOI: 10.1111/os.12464.
- [22] Xu J, Zhang G, He Z, et al. Anatomical reduction and precise internal fixation of intra-articular fractures of the distal radius with virtual X-ray and 3D printing [J]. Australas Phys Eng Sci Med, 2019, 43 (1) : 35-47. DOI: 10.1007/s13246-019-00795-w.
- [23] Liu W, Zhang S, Zhang W, et al. Clinical application of 3D printing-assisted patient-specific instrument osteotomy guide in stiff clubfoot: preliminary findings [J]. J Orthop Surg Res, 2023, 18 (1) : 843. DOI: 10.1186/s13018-023-04341-z.
- [24] 施忠民, 王晓康, 蒋剑涛, 等. 3D 打印个性化截骨导板与传统截骨方法在内翻性踝关节炎踝上截骨术中的应用比较 [J]. 中华创伤骨科杂志, 2019, 21 (11) : 978-985. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-7600.2019.11.009.
- Shi ZM, Wang XK, Jiang JT, et al. Instrumentation with 3D printed patient-specific guides versus conventional techniques in supramalleolar osteotomy for varus ankle osteoarthritis [J]. Chinese Journal of Orthopaedic Trauma, 2019, 21 (11) : 978-985. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-7600.2019.11.009.
- [25] 张宇航, 毕大卫, 陈亿民, 等. 3D 打印技术制定个体化截骨角在踝外翻 Chevron 截骨矫形术中的应用 [J]. 中国骨伤, 2018, 31 (3) : 203-207. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0034.2018.03.002.
- Zhang YH, Bi DW, Chen YM, et al. Application of three-dimensional printing technology to design individual angle section on

- Chevron of hallux valgus [J]. *China Journal of Orthopaedics and Traumatology*, 2018, 31 (3) : 203-207. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0034.2018.03.002.
- [26] Ferreira GF, Nunes GA, Banca V, et al. Minimally invasive hallux valgus surgery using 3D printed patient specific instrumentation [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2024, 144 (6) : 2553-2559. DOI: 10.1007/s00402-024-05383-6.
- [27] 李广翼, 王诚, 王嘉正, 等. 三维打印导板辅助关节镜下微创踝关节融合术治疗晚期踝关节炎的临床效果 [J]. *中华外科杂志*, 2024, 62 (6) : 572-580. DOI: 10.3760/cma.j.cn112139-20240229-00096.
- Li GY, Wang C, Wang JZ, et al. Application three dimensional printed personalized guide plate assisted arthroscopic ankle arthrodesis in the treatment of ankle arthritis [J]. *Chinese Journal of Surgery*, 2024, 62 (6) : 572-580. DOI: 10.3760/cma.j.cn112139-20240229-00096.
- [28] 刘辉亮, 丁煥文, 黄敏强, 等. CAD结合3D打印技术在踝关节置换中的应用 [J]. *中国骨科临床与基础研究杂志*, 2017, 9 (3) : 155-161. DOI: 10.3969/j.issn.1674-666X.2017.03.004.
- Liu HL, Ding HW, Huang MQ, et al. Application of CAD combined with 3D printing technique in ankle joint replacement [J]. *Chinese Orthopaedic Journal of Clinical Basic Research*, 2017, 9 (3) : 155-161. DOI: 10.3969/j.issn.1674-666X.2017.03.004.
- [29] Dagneaux L, Canovas F. 3D printed patient-specific cutting guide for anterior midfoot tarsectomy [J]. *Foot Ankle Int*, 2020, 41 (2) : 211-215. DOI: 10.1177/1071100719882723.
- [30] Jennison T, Dalgleish J, Sharpe I, et al. Total talus replacements [J]. *Foot Ankle Orthop*, 2023, 8 (1) : 24730114221151068. DOI: 10.1177/24730114221151068.
- [31] Kadakia RJ, Akoh CC, Chen J, et al. 3D printed total talus replacement for avascular necrosis of the talus [J]. *Foot Ankle Int*, 2020, 41 (12) : 1529-1536. DOI: 10.1177/1071100720948461.
- [32] Mu MD, Yang QD, Chen W, et al. Three dimension printing talar prostheses for total replacement in talar necrosis and collapse [J]. *Int Orthop*, 2021, 45 (9) : 2313-2321. DOI: 10.1007/s00264-021-04992-9.
- [33] 赵巍, 米尔阿地力·麦提依明, 宝尔江·阿斯哈尔, 等. 3D打印导航模板与个性化定制假体在3例复杂关节置换术中的应用 [J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2021, 36 (8) : 882-884. DOI: 10.7531/j.issn.1672-9935.2021.08.033.
- Zhao W, Maimaitiyiming M, Asihaer B, et al. Application of 3D printed navigation templates and personalized prostheses in 3 cases of complex joint replacement surgery [J]. *Chinese Journal of Bone and Joint Injury*, 2021, 36 (8) : 882-884. DOI: 10.7531/j.issn.1672-9935.2021.08.033.
- [34] Akoh CC, Chen J, Adams SB. Total ankle total talus replacement using a 3d printed talus component: a case report [J]. *J Foot Ankle Surg*, 2020, 59 (6) : 1306-1312. DOI: 10.1053/j.jfas.2020.08.013.
- [35] Strydom A, Saragas NP, Ferrao PN. The use of a 3D printed titanium implant for arthrodesis in the management of large osseous defects in the ankle [J]. *Foot Ankle Surg*, 2023, 29 (8) : 576-583. DOI: 10.1016/j.fas.2023.05.005.
- [36] 米发樑, 杨如意, 赵天宝, 等. 3D打印技术在骨科临床与基础研究应用的现状 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2022, 30 (9) : 810-814. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.09.09.
- Mi FD, Yang RY, Zhao TB, et al. Current application of 3D printing technique in orthopaedic clinical practice and basic research [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2022, 30 (9) : 810-814. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.09.09.
- [37] 阮贝特, 颜威, 马泓泓, 等. 3D打印个性化矫形器制作技术发展 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2024, 32 (2) : 162-166. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2024.02.12.
- Ruan BT, Yan W, Ma HH, et al. Development of 3D printing personalized orthoses manufacturing technology [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2024, 32 (2) : 162-166. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2024.02.12.
- [38] Xu R, Wang Z, Ma T, et al. Effect of 3D printing individualized ankle-foot orthosis on plantar biomechanics and pain in patients with plantar fasciitis: a randomized controlled trial [J]. *Med Sci Monit*, 2019, 25: 1392-1400. DOI: 10.12659/MSM.915045.
- [39] 黄昭, 曲军杰, 孙德麟, 等. 3D打印定制鞋垫治疗儿童扁平足的初步结果 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2023, 31 (5) : 471-475. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2023.05.18.
- Huang Z, Qu JJ, Sun DL, et al. Preliminary results of 3D printed corrective insoles for the treatment of flat feet in children [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2023, 31 (5) : 471-475. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2023.05.18.
- [40] 谭嘉, 陈国平, 郝永强. 生物3D打印的关键技术及骨科应用进展 [J]. *中华骨科杂志*, 2020, 40 (2) : 110-118. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-2352.2020.02.007.
- Tan J, Chen GP, Hao YQ. Key technology of 3D bio-printing and its application in orthopedics [J]. *Chinese Journal of Orthopaedics*, 2020, 40 (2) : 110-118. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-2352.2020.02.007.
- [41] 白龙, 苏佳灿. 骨/软骨类器官构建策略及应用前景 [J]. *上海大学学报 (自然科学版)*, 2023, 29 (2) : 185-199. DOI: 10.12066/j.issn.1007-2861.2458.
- Bai L, Su JC. Construction strategies and application prospects for bone/cartilage organoids [J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2023, 29 (2) : 185-199. DOI: 10.12066/j.issn.1007-2861.2458.
- [42] Chen P, Zheng L, Wang Y, et al. Desktop-stereolithography 3D printing of a radially oriented extracellular matrix/mesenchymal stem cell exosome bioink for osteochondral defect regeneration [J]. *Theranostics*, 2019, 9 (9) : 2439-2459. DOI: 10.7150/thno.31017.
- [43] Chen Y, Le Y, Yang J, et al. 3D bioprinted xanthan hydrogels with dual antioxidant and chondrogenic functions for post-traumatic cartilage regeneration [J]. *ACS Biomater Sci Eng*, 2024, 10 (3) : 1661-1675. DOI: 10.1021/acsbmaterials.3c01636.

(收稿:2024-06-13 修回:2024-09-02)

(同行评议专家: 杨云峰, 刘华, 张晖)

(本文编辑: 宁桦)