

儿童肢体骨肉瘤切除后骨缺损重建策略

刘蓓蓓^{1,2}, 宿玉玺^{1,2*}

¹重庆医科大学附属儿童医院, 重庆

²重庆医科大学附属儿童医院骨科, 重庆

收稿日期: 2026年4月7日; 录用日期: 2026年4月28日; 发布日期: 2026年5月8日

摘要

骨肉瘤(Osteosarcoma, OS)是儿童和青少年中最常见的原发性恶性骨肿瘤, 通常好发于长骨干骺端, 最常见于膝关节周围。近年来, 随着新辅助化疗、计算机导航技术及3D打印技术的飞速发展, 保肢手术已取代截肢, 成为临床标准治疗方案。保肢手术治疗中最关键的环节即为肿瘤骨的完全切除及骨缺损的重建。在骨缺损重建中, 由于儿童处于生长发育期, 保肢手术面临着维持肢体生长潜能、减少双下肢不等长以及满足高活动量需求等特有挑战。在目前的医疗条件下, 重建方式有多种选择, 但仍存在着许多临床难题。本文回顾了近五年的文献, 对儿童下肢骨肉瘤保肢手术中的主要重建方式进行综述, 以期为临床个体化治疗提供参考。

关键词

儿童骨肉瘤, 保肢手术, 假体重建, 生物重建, 复合重建

Strategies for Bone Defect Reconstruction Following Resection of Extremity Osteosarcoma in Pediatric Patients

Beibei Liu^{1,2}, Yuxi Su^{1,2*}

¹Children's Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

²Department of Bone, Children's Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: April 7, 2026; accepted: April 28, 2026; published: May 8, 2026

Abstract

Osteosarcoma (OS) is the most common primary malignant bone tumor in children and adolescents,

*通讯作者。

文章引用: 刘蓓蓓, 宿玉玺. 儿童肢体骨肉瘤切除后骨缺损重建策略[J]. 临床医学进展, 2026, 16(5): 431-442.

DOI: 10.12677/acm.2026.1651833

predominantly arising in the metaphyseal regions of long bones, most frequently around the knee joint. In recent years, driven by rapid advancements in neoadjuvant chemotherapy, computer-assisted navigation, and 3D printing technologies, limb-salvage surgery has replaced amputation to become the standard of care in clinical practice. The most critical components of limb-salvage surgery are the complete resection of the osseous tumor and the subsequent reconstruction of the bone defect. Because pediatric patients are still undergoing skeletal growth and development, reconstructing these bone defects presents unique challenges, including the preservation of limb growth potential, the minimization of limb-length discrepancy (LLD), and the accommodation of high functional activity levels. Although various reconstruction modalities are available under current medical conditions, numerous clinical dilemmas persist. This article reviews the literature over the past five years to comprehensively summarize the principal reconstruction strategies employed in limb-salvage surgery for pediatric lower extremity osteosarcoma, aiming to provide a valuable reference for individualized clinical decision-making.

Keywords

Pediatric Osteosarcoma, Limb-Salvage Surgery, Prosthetic Reconstruction, Biological Reconstruction, Composite Reconstruction

Copyright © 2026 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. 引言

骨肉瘤的治疗在过去几十年中取得了里程碑式的进步, 研究表明, 在广泛切除安全边界的前提下, 保肢手术的5年和10年生存率分别为50%~80%和30%~70%, 与传统截肢手术无显著差异, 但患者的生活质量和心理预后大幅提高[1]。然而, 儿童四肢骨肉瘤保肢手术和骨缺损重建难度极高。儿童骨骼尚未发育成熟, 直接使用成人常规假体不仅会导致术后严重的双下肢不等长, 还易因儿童运动量大而诱发假体松动或机械性疲劳。因此, 如何在彻底切除肿瘤的同时, 最大程度保留骨生长潜能, 是当前小儿骨肿瘤学界的研究重点[2]。我们回顾相关文献, 对儿童保肢手术的方式及重建策略进行综述, 报告患儿生存情况、功能预后及手术并发症情况, 为儿童骨肉瘤手术治疗选择提供参考。

2. 文献检索和选择

本综述综合了已发表的关于儿童四肢恶性骨肿瘤保肢和重建策略的研究。使用电子数据库进行全面搜索, 包括PubMed, Google Scholar, Web of Science, 知网。检索词包括“儿童骨肉瘤”“儿童尤文肉瘤”“肢体重建”“旋转成形术”“生物重建”“骨搬运牵张成骨”“假体内重建儿童”“可延长假体儿童”“3D打印假体儿童”及其组合。对入选文献中的参考文献进行人工筛选, 优先考虑了涉及骨骼未成熟患者的临床结果研究(前瞻性或回顾性队列、病例系列和临床试验), 排除了单纯的生物力学、材料学与动物研究。

3. 生物重建方式

骨肉瘤切除后的生物重建是通过组织原本的生物活性实现骨整合, 临床中主流类型包括: 同种异体骨关节移植, 肿瘤骨灭活再植; 自体腓骨移植; 诱导膜技术联合植骨等。与机械型假体相比, 生物重建方式的骨重建以及骨诱导能力较强, 且移植物的长期存活能力较强。但术后短期支撑性不如机械性假体[3]。

3.1. 同种异体骨移植

同种异体骨移植是使用捐赠的冰冻供体骨重建骨或关节缺损, 主要应用于长骨干肿瘤切除后大段骨缺损的重建, 常用钢板螺钉或髓内钉与剩余宿主骨固定[4]。也可以直接利用供体骨的软骨面来替代切除的关节面, 用于关节的重建, 但使用场景和固定方式的选择会更为严苛, 且功能恢复和并发症发生情况不如骨干重建[5]。

在肿瘤学安全性方面, 局部复发通常与肿瘤的外科边界有关, 而与移植物的选择没有直接关联, 使用同种异体骨并不会增加肿瘤局部复发或远处转移的风险[3]。对于患儿术后的肢体功能, 异体骨与自体骨成功愈合后即可获得优秀的 MSTs (The Musculoskeletal Tumor Society) 评分, 术后的关节活动度、肢体感觉以及负重能力都可以达到令人满意的效果[3] [6]。但这种重建方式最常要面临的是术后并发症的挑战, 最常见的是异体骨不连、异体骨骨折、免疫排斥和深部感染。感染的发生率从 0% 到 18% 不等, 骨折 0% 到 30% 不等, 延迟愈合或不愈合的发生率从 15% 到 55% 不等[7]。

大量的长期随访数据表明, 大部分的结构性失败和严重并发症倾向于发生在术后的前 3 到 5 年内[4]。Aponte-Tinao 等对大段异体骨进行了超过 10 年的超长期随访研究, 证实了虽然异体骨骨折和骨不连的风险较高, 但只要移植体能在最初的几年内存活下来, 其在未来十年甚至更长时间内的保留率非常高, 其长期使用的持久性得到证明[4]。Liu 等回顾性分析了单中心异体骨移植的疗效, 认为坚强的内固定是降低骨折等并发症的有效方式, 建议使用髓内钉结合钢板的固定方式来降低早期的机械性失败率[3]。

同种异体骨移植能够实现宿主与移植物的生物学融合, 可以极大地恢复患者自身的骨量储备, 特别适合生长潜力高的儿童患者[4] [8], 但其生物愈合周期长, 患者早期需要严格限制负重, 如果发生相关并发症则需要多次额外的手术干预。

3.2. 肿瘤骨灭活再植

肿瘤骨灭活再移植是指在完整切除恶性骨肿瘤后, 将携瘤骨段通过物理或化学方法在体外或原位进行灭活处理, 彻底杀灭肿瘤细胞后, 将其作为生物支架重新植回体内以重建骨缺损的一种经典保肢技术[9] [10]。该技术的核心理念在于利用患者自身的原生骨提供匹配的解剖形态和骨传导支架。

临床中常用的骨灭活方式主要包括液氮深低温冷冻灭活、巴氏消毒法、高压灭菌法以及体外辐照灭活[9] [11]。近年来, 为了更好地保护软组织血供并简化手术步骤, 原位带蒂液氮冷冻灭活技术也逐渐兴起, 外科医生只需进行单侧截骨, 在保持患骨一端连续性的情况下即可完成彻底的液氮冷冻灭活[12] [13]。

规范的灭活骨移植在肿瘤学上被证实是安全的, 多中心大样本的长期随访证实, 将灭活后的骨组织回植并不会增加局部肿瘤复发或远处转移的风险[11] [13], 骨愈合后也能提供良好的远期肢体功能。但并发症发生率较高仍是其亟待解决的临床难题, 常包括深部感染、疲劳性骨折、骨吸收和骨不连[9] [11] [14]。感染率约为 10.8%, 骨不连发生率约为 21%, 通过使用抗生素骨水泥或联合血管化移植可以降低风险[2]。

自体骨灭活移植可以最好地匹配自身骨缺损, 同时其表面保留了原生韧带和肌肉的附着点, 有利于术后软组织的锚定和愈合, 也避免了异体骨带来的疾病传播风险和免疫排斥反应, 在经济成本方面也明显低于人工假体[9] [11] [13] [15]。但无论采用何种物理或化学灭活方式, 原位骨组织生物活性和机械强度均会受到不同程度的破坏, 术后骨愈合周期漫长, 需要患儿在较长时间内严格限制患肢负重[13] [15]。远期的深部感染、骨吸收以及疲劳性骨折发生率同样居高不下, 相当一部分患儿在成年后仍可能需要面临二次翻修手术[11] [14]。

3.3. 自体骨重建: 带血管/不带血管腓骨移植(VFG/NVFG)

腓骨移植是肿瘤切除后重建节段性缺损的常用方式, 指的是在骨肿瘤大段切除后, 将自身的腓骨段

移植至骨缺损区, 腓骨既可以作为非血管化的腓骨移植物, 也可以作为游离血管化的腓骨移植物。随着显微外科技术的进步, 带有营养血管蒂的骨移植已成为一种可行且常用的选择。与无血管化移植物相比, 由于移植物的供血动脉与宿主动脉的连接可以保留血供, 普遍认为有血管的腓骨移植可以增强生物整合[16]。

不带血管的腓骨移植优势在于手术难度较低, 且供区并发症少。Sheridan 等报道了 10 例经 NVFG 重建的儿童恶性骨肿瘤。16 例患儿平均随访 56 个月, 骨愈合率 100%, 无移植物失败, 功能评分良好[17]。Lenze 等的研究结果表明缺损长度是延迟或未能巩固的主要决定因素[18]。证明了在骨缺损较小(小于 6 cm)的情况下不带血管的腓骨移植同样是可行的选择。

腓骨移植最初应用于胫骨大段缺损的重建, 后逐步应用于上肢骨缺损重建。对于非承重骨, 带血管的腓骨移植即可取得良好的骨桥接效果[19]; 而对于主要承重的下肢骨来说, 临床上更倾向于采用同种异体骨-带血管腓骨复合体等更强的支撑结构来进行重建, 以防术后发生内固定失效[20][21]。带血管腓骨移植具有极强的抗感染能力和愈合潜能。由于吻合了血管, 即使在术后接受化疗或局部放疗导致软组织床条件较差的情况下, 腓骨瓣仍能保持极高的存活率, 并在平均几个月内实现早期的移植物-宿主骨愈合[19][22]。大部分患儿在骨愈合和骨肥大完成后, 下肢可恢复完全负重行走, MSTs 评分通常可达到优良水平, 表现出较高的长期生活质量[22][23]。

与人工假体相比, 移植腓骨可以随着肢体负重和机械应力刺激, 直径逐渐增粗至接近原宿主骨, 能够提供长期甚至终身生物力学支持, 这是在儿童患者中最大的优势。并且在抗感染及软组织缺损覆盖方面优于金属假体或大段异体骨。但其弊端在于切取腓骨可能带来小腿供区的问题, 如外踝关节不稳、腓总神经损伤或供区疼痛等[21]。在移植后的前 1~2 年内, 单纯腓骨的抗折断能力较差, 容易发生应力性骨折或内固定失效, 术后需要较长时间的避免负重[23][24]。

4. 假体重建方式

儿童骨肉瘤切除后骨缺损的非生物重建核心是采用人工合成的非生物源性植入物修复骨与关节缺损, 通过人工植入物的力学支撑实现早期功能恢复, 同时通过针对性的假体设计适配儿童的生长发育需求。临床常见类型包括: 组配式假体、可延长假体: 半关节假体、3D 打印假体等。

4.1. 组配式假体

组配式假体是一种主要用于修复大段骨关节缺损的重建植入物。通常由多个可互换的标准化部件组装而成, 外科医生可以在手术中根据肿瘤实际切除的长度进行调整与拼接[25][26]。常用类型可以按关节适配部位、假体结构特点划分, 最常应用于儿童骨肉瘤高发的膝关节周围, 同时也拓展应用于上肢部分长骨区域。临床主流组配式假体主要分为铰链型组配式假体、保留骨骺型组配式假体、干骺端/骨干间充型组配式假体几大类。组配式假体最常应用于股骨远端和胫骨近端[27], 在切除股骨远端肿瘤时, 这种假体的光滑细柄可以直接穿过胫骨近端骨骺, 从而最大程度保留患儿患侧胫骨的生长潜能[28]。

既往多项长期随访显示, 使用组配式假体进行保肢手术术后的肢体功能恢复情况良好。患者的 MSTs 评分平均可达到 26 分以上。超过 70% 的患者膝关节屈曲度能大于 90 度。在生存率方面, 5 年和 10 年的保肢率均可高达 88% 至 98.8% 左右[26][27]。无菌性松动与感染是导致假体翻修的最常见原因。远期随访中无菌性松动的发生率可达 19.5% [26]。假体周围深部感染率也相对较高, 文献报道在 15.9% 至 23.6% 之间[26]。并且 El Ghoneimy 等在其 15 年的随访数据调查研究中表明, 机械性失效的累积发生率可接近 37.9% [29]。

组配式假体的优点在于手术后早期稳定性极佳, 允许患儿术后早期下地负重, 肢体功能恢复迅速。

且其模块化设计能灵活匹配各类不规则的大段骨缺损, 早期并发症相对较低。其缺点在于假体有使用寿命限制, 无法达到终身使用的目的。且远期并发症发生率较高, 主要是是无菌性松动、深部感染等, 并且针对高活跃度未成年人的假体铰链断裂及应力遮挡风险。这导致很大一部分患儿在成年后面临假体翻修的风险。

4.2. 可延长假体

可延长假体是专为骨骼发育未成熟儿童设计的一种特殊重建植入物。其内部包含可相对滑动的套筒或机械延伸结构, 能够随着患儿健侧肢体的生长而逐渐延长, 从而有效解决因肿瘤切除骨骺所导致的双下肢不等长问题[30]。

可延长假体的延长机制也在不断经历技术变革: 有创延长假体需要通过切开暴露假体进行手动延长, 创伤大且易引发术后感染。微创可延长假体可通过微小切口操作机械齿轮, 但患儿仍需反复接受全身麻醉和手术刺激。目前临床的主流选择则是无创可延长假体, 通过体外电磁场或机械驱动的方式实现无切口、无麻醉的假体延长。患儿可以在门诊通过外部旋转电磁场进行假体延长, 避免了多次手术的切口愈合不良风险以及麻醉风险[31]。

可延长假体最常应用于儿童骨肉瘤好发的股骨远端和胫骨近端, 因为这些区域的肿瘤切除通常会切除儿童下肢骨骺。随着技术的发展, 该技术也可应用于保留关节的股骨或胫骨干间大段骨缺损的修复。在临床决策中, 通常在年龄在 6 至 12 岁之间、预期骨骼成熟时下肢长度差异超过 3 至 4 cm 的患儿采用此种重建方式, 以最大程度实现保肢手术后的肢体对称性[32]。

Tsuda 等[33]的超长期随访证实, 10 年总保肢生存率为 93%, 86% 的患者达到目标肢体长度, 平均 MSTS 评分为 82%。然而, 几乎所有接受可延长型假体置换术治疗的儿童都经历了多种并发症, 且大部分患儿不可避免地面临平均近 3 次的额外翻修手术, 但在多学科持续干预下, 最终高达 91% 的患儿成功实现了长期保肢, 且平均下肢长度差异仅为 1 cm。患儿在达到骨骼发育成熟时, 平均双下肢长度差异仅为 1 cm, 极大地改善了患儿的步态。

可延长假体主要的安全性问题集中在关节僵硬等软组织并发症、假体无菌性松动以及机械性结构失效等方面。随着随访时间的延长, 假体的失败率会显著升高。多项研究表明, 接受可延长假体的患者需要多次手术。其中 5/6 例和 25/54 例患儿接受多次手术, 分别为肢体延长和假体翻修手术、假体置换失败、较大假体置换、假体无菌性松动和感染等原因。一半至三分之二的患者需要至少 1 次非计划再次手术而非计划延长[2]。

4.3. 半关节假体

半关节假体是一种在肿瘤切除后, 仅置换关节单侧髁部或单一关节面的手术方式。由于儿童骨骼尚未发育成熟, 传统的全关节肿瘤假体置换往往会破坏关节对侧正常的骨骺, 导致严重的远期双下肢不等长。与全关节假体相比, 其核心特点是保留患者自身关节的部分正常结构。

半关节假体早期多为定制一体化设计, 仅适用于局限型骨缺损, 要求对侧骨与关节结构完整; 而新型儿童半关节假体将缺损段改为模块化组件, 既保留了对侧的天然骨骺与关节面, 又实现了术中长度可调、术后翻修便利, 同时可搭配 LARS 韧带重建关节稳定性, 弥补了传统半关节不稳的缺陷, 成为儿童保肢的主流方案之一[1]。随着技术的不断发展, 也有 3D 打印半关节假体、可延长型半关节假体、临时性半关节占位器等新技术的出现。

Ippolito 等[34]的研究中展示了 3 例病灶局限于单一股骨髁的患者, 通过定制假体, 在彻底切除肿瘤的同时, 保留了对侧健康的软骨面及核心韧带群。术后患儿早期即可实现完全负重和全关节活动度恢复,

MSTS 评分高达 25~28 分。Li 等[35] [36]的研究回顾了北京积水潭医院骨肿瘤团队近 20 年间使用近端胫骨半关节假体治疗儿童骨肉瘤的经验。该团队使用了补片重建技术,应用聚丙烯人工补片来重建关节囊及内、外侧副韧带,使用高强度不可吸收缝线穿过假体孔洞重建交叉韧带。该研究证实一期行半关节假体置换保留生存潜能,二期行常规铰链假体翻修或下肢延长术来维持关节稳定,是一种新的有效解决方案。

由于新技术的普遍开展,半关节假体的预后及肢体功能情况并不完全统一,但报道的结果普遍较好,其 5 年假体保留率可高达 87.4%,10 年假体无翻修生存率约为 68%,10 年免于假体移除的生存率高达 85%。患儿的 MSTS 评分平均可达到 83%,不仅能够恢复正常步态,部分患者甚至能参与轻度运动。由于保留了股骨远端骨骺,患儿成年后的平均双下肢长度差异可控制在 29 mm 至 33 mm 左右,绝大多数患儿仅需垫高鞋垫即可恢复正常生活[34]-[36]。

由于半关节假体缺乏机械铰链的硬性连接,关节半脱位是其最典型的特有并发症,发生率约为 8%~9%,深部感染的发生率在 9%左右,而远期的无菌性松动发生率极低[36]。

4.4. 3D 打印假体

3D 打印假体是指利用增材制造技术,根据患者术前的影像学数据定制的骨缺损重建植入物,与传统的假体相比,3D 打印不仅能在宏观形态上匹配肿瘤切除骨缺损,其主要优势在于能够在微观层面制造出类似天然松质骨的仿生多孔结构。这种设计能够促进宿主骨细胞的长入,可以很大程度上实现骨整合,为假体提供长久且坚固的生物性固定[37] [38]。

3D 打印技术几乎打破了假体形态的限制,可应用于全身各个部位的骨缺损重建。在儿童骨肉瘤等恶性肿瘤中,其适用于膝关节周围、长骨骨干,以及骨盆、足踝等解剖形态极复杂的区域[39]。

由于保留了更多的宿主骨和自体关节,患儿术后的本体感觉更好,MSTS 功能评分常可达到良好甚至优秀水平,能够较早恢复负重和日常活动[40] [41]。然而,该技术同样面临一定的安全性挑战,如深部感染、假体周围骨折以及由于应力集中导致的结构性疲劳断裂等并发症,依然是临床随访中需要高度警惕的问题[39]。

该种假体的缺点在于从影像采集、假体设计到最终打印清洗,生产周期较长,且整体造价相对昂贵[38]。另一方面,由于多孔结构已与宿主骨发生了紧密的骨整合,一旦发生严重的深部感染或假体断裂,二次翻修取出假体时的手术创伤极大,且伴随着巨大的骨量丢失[39]。

5. 复合重建方式

复合重建的手术方案整合来生物重建与假体重建的优势,弥补了单纯生物重建早期稳定性差、恢复慢的缺陷,同时解决假体重建软组织附着不足、长期假体松动的问题。该方案的复合方案选择众多,可创新性强,临床主流应用的方案包括:同种异体移植骨-假体复合物(Allograft-Prosthesis Composite, APC)、同种异体骨-带血管腓骨复合物(Capanna 技术)、液氮冷冻灭活自体骨联合带血管游离腓骨复合重建。

5.1. 同种异体移植骨-假体复合物

同种异体移植骨假体复合物重建(APC)是指在骨肿瘤大段切除后,将结构性大段同种异体骨与金属内固定假体或关节假体结合使用的一种复合重建方式[42]。该技术将假体提供的早期机械稳定性与异体骨所具有的生物学整合潜力结合在一起。异体骨表面保留了丰富的肌腱附着点,可以实现宿主周围软组织与移植物的生物愈合,术后患儿的 MSTS 评分通常能达到较高的优良率[43] [44]。然而,APC 的并发症包括深部感染、异体骨-宿主骨不连以及异体骨吸收断裂,是导致其远期翻修的主要原因[42]。

Jamshidi 等[44]对青春期及青春前期股骨近端恶性肿瘤切除后的重建进行了队列研究。其结果表明,

与单纯骨关节异体骨移植相比, APC 不仅能提供出色的早期关节稳定性, 还能带来优秀的 MSTs 功能评分。

Atherley O'Meally 团队[42] [45]对比了组配式假体与 APC 在股骨近端的表现。研究发现, 虽然两者在总体植入物生存率、并发症风险及功能预后上高度相似, 但 APC 在提供骨量储备和软组织附着方面比较组配式假体有着较大优势。

5.2. 同种异体骨 - 带血管腓骨复合物

同种异体骨联合带血管游离腓骨复合移植, 是指在骨肉瘤等恶性肿瘤大段节段性切除后, 将同种异体大段骨与自体带血管游离腓骨结合使用的一种复合重建方案[46]。这种移植方案将异体骨的早期机械支撑力与自体腓骨的生物学活性融为一体。根据手术中腓骨放置位置的不同, 该技术主要分为两类: 一种是经典的髓内复合技术, 即将带血供的游离腓骨像髓内钉一样穿入同种异体骨的髓腔内; 另一类则是针对儿童宿主骨髓腔过于狭窄而改良的“并排或贴附式复合固定” [47] [48]。

Houdek 等[49]对采用 Capanna 技术进行下肢重建的儿童和青少年患者进行了长期随访。研究确认了该技术能取得很高的总体保肢率, 但也证实, 由于儿童极度活跃的生活方式, 术后因骨不连和异体骨折导致的二次翻修率依然较高。Errani 等[50]针对儿童股骨的节段性重建进行了对比研究。他们发现, 在儿童股骨这一特定部位, 添加带血管腓骨与单纯使用大段异体骨相比, 在提升植入物总体生存率和降低骨折率上并没有明显统计学差异。真实疗效有待进一步研究。

但在胫骨重建领域的研究结果却与之不同, Campanacci 等[20]的大样本队列研究指出, 对于胫骨原发肿瘤切除后的缺损区域, 该方式不仅弥补了软组织条件差的劣势, 还能有效促进早期骨性愈合。Elemosho 等[48]的研究全面比较了 Capanna 技术与单纯带血管腓骨移植技术。其结果证实, 复合技术在提供早期机械稳定性上具有明确优势, 能够有效解决单纯腓骨早期强度不足的痛点, 不过在儿童队列研究中, 两种方案在远期腓骨骨折的发生率上表现相似。

综合来看, 使用 Capanna 技术进行重建的特点在于结合了异体骨术后即刻稳定性好的优势且保存了自体腓骨较高的生物学潜能。但同样会存在脚踝不稳等并发症, 且虽然拥有血管化腓骨的支持, 大段异体骨本身的感染及远期断裂风险依然存在, 整体的翻修率较高, 需要患儿家属有长期随访和可能接受二次手术的心理准备。

5.3. 液氮冷冻灭活自体骨联合带血管游离腓骨复合重建

液氮冷冻灭活自体骨联合带血管游离腓骨复合体, 简称灭活骨 - 腓骨复合体, 是近年来骨肿瘤生物复合重建领域的新技术。该技术是将切除的带有肿瘤的自体大段骨骼浸入液氮中来彻底杀灭肿瘤细胞, 同时保留骨骼的三维解剖结构和骨诱导蛋白的活性[51], 随后将患儿自体的带血管游离腓骨植入其中, 以解决单纯灭活死骨缺乏血供、愈合慢的痛点。根据腓骨放置方式的不同, 临床上最常用的是髓内植入法, 即把带血供的腓骨穿入灭活骨的髓腔内[52]。

Lu 等[53]将“液氮灭活骨 + 带血管腓骨”与传统的 Capanna 技术在下肢重建中进行了直接对比。结果发现虽然两者并发症类似, 但液氮冷冻组的平均骨愈合时间仅为 8.4 个月, 显著快于异体骨组的 14.1 个月($p < 0.001$)。证明冷冻保留的成骨诱导活性确实加速了愈合进程。Özger 等[52]评估了该技术在下肢长骨大段缺损中的中长期疗效, 证实该技术在 5 年和 10 年随访中保肢率极高。他们认为该方案无需使用异体供骨, 可以有效降低成本, 减轻患儿家庭负担, 可以作为下肢大段缺损的生物学重建首选。

该方案需要骨肿瘤科与显微外科配合, 手术难度大、时间长, 对于医疗机构及外科医生的要求极高。且要求切除的肿瘤骨结构必须相对完整, 如果肿瘤已经导致极其严重的溶骨性破坏或病理性粉碎骨折,

则无法使用液氮回收。并且灭活的肿瘤骨在术后 1~2 年内内部存在微观层面的坏死及骨吸收, 早期抗折断能力仍不如金属假体, 需要患儿家长严格配合保护性负重。

6. 假体相关并发症

6.1. 深部感染

感染是保肢手术中严重并发症之一, 可能导致保肢失败乃至截肢[54]。金属肿瘤假体重建表面易形成细菌生物膜, 其感染率通常高于常规人工关节置换[55]。大段同种异体骨体积较大且没有血供, 感染率同样居高不下。带有血管蒂的游离腓骨移植或包含血管化骨段的复合重建了局部血流, 抗感染能力和软组织愈合能力提高, 其深部感染率相对最低[56]。除了重建方案的选择, 较长的手术时间、广泛的软组织及肌肉切除导致的软组织覆盖不良、大剂量新辅助化疗引起的免疫抑制及伤口愈合延迟同样会导致感染的发生。

对于假体及大段异体骨的早期感染, 可尝试保留植入物清创联合长期静脉抗生素治疗; 若感染难以控制, 则必须取出假体或异体骨, 采用含抗生素骨水泥占位并进行带蒂或游离皮瓣覆盖, 待感染彻底消除后再行二期重建。

6.2. 无菌性松动与骨不连

连接界面失效在假体重建中主要表现为无菌性松动, 生物重建中表现为宿主骨与移植物的骨不连。儿童活动量大且预期存活寿命长, 假体的远期无菌性松动几乎不可避免。在生物学重建中, 单纯大段同种异体骨与宿主骨的愈合依赖缓慢的爬行替代, 骨不连发生率较高, 可达 15%~30% [57]。而带血管腓骨及包含带血管骨的复合重建, 能够提供丰富的成骨细胞, 截骨端愈合快, 骨不连发生率显著降低。

对于假体的无菌性松动, 远期常需进行翻修手术。对于生物学重建的骨不连, 干预措施包括翻修内固定、局部自体松质骨移植或骨形态发生蛋白诱导成骨[58]。

6.3. 结构力学失败

结构力学主要指金属部件的疲劳断裂或移植物的脆性骨折, 组配式假体主要面临假体柄折断或铰链磨损, 特别是可延长假体内部复杂的延长机制故障率较高[59]。由于异体骨无法进行骨骼微重塑, 晚期折断率高。单纯游离腓骨移植在早期抗折断能力差, 易发生应力性骨折[60]。而复合重建技术中和了两者优缺点, 利用异体骨提供早期机械强度, 带血管腓骨提供远期骨肥大支撑, 有效降低了总体力学失败率[61]。

假体结构损坏通常需更换相应的模块部件。大段异体骨或复合骨的折断通常需重新坚强内固定并植骨; 若远期大面积粉碎性失败, 则常需采用长柄假体翻修或切除后应用诱导膜技术进行补救性重建。

7. 总结与未来展望

儿童下肢骨肉瘤的保肢治疗已经从单纯保留肢体向精细化保留肢体生长潜能与远期功能迈进, 既往研究中重建骨缺损的方法有很多, 包括生物技术和非生物技术。每一种技术都有其优缺点, 手术选择的复杂性和生长特点需要医生、患者及其家属共同参与充分讨论。未来的研究应聚焦于建立标准化的个性化评估模型, 通过精准整合患儿的年龄、骨龄、肿瘤节段切除的生物力学影响范围、软组织受损程度以及预期的远期活动水平, 构建临床决策树或人工智能辅助算法, 为每一位患儿提供假体重建的最优解。并且针对儿童骨肿瘤发病率低、随访周期长的特点, 临床亟需跨区域联合, 开展多中心、前瞻性的队列研究, 以直接比较不同核心技术在儿童群体中的长期优劣。通过更有力的研究进一步明确儿童骨肉瘤的危险因素, 提高临床医师诊治水平, 为患儿带来更长期的生存获益与生活质量提升。

参考文献

- [1] 赵志庆, 郭卫, 燕太强. 儿童膝关节周围骨肉瘤治疗中肢体生长潜能保留的研究进展与展望[J]. 肿瘤防治研究, 2024, 51(11): 898-907.
- [2] Liu, Z., Cai, H., Li, Y. and Wang, Z. (2025) Current Strategies for Limb Salvage and Reconstruction in Pediatric Lower Extremity Malignant Bone Tumors: Focus on Growth Preservation and Functional Outcomes. *Children*, **12**, Article No. 1700. <https://doi.org/10.3390/children12121700>
- [3] Liu, Q., Long, F., Zhang, C., Liu, Y., He, H. and Luo, W. (2023) Biological Reconstruction of Bone Defect after Resection of Malignant Bone Tumor by Allograft: A Single-Center Retrospective Cohort Study. *World Journal of Surgical Oncology*, **21**, Article No. 234. <https://doi.org/10.1186/s12957-023-03121-7>
- [4] Aponte-Tinao, L.A., Ayerza, M.A., Albergo, J.I. and Farfalli, G.L. (2020) Do Massive Allograft Reconstructions for Tumors of the Femur and Tibia Survive 10 or More Years after Implantation? *Clinical Orthopaedics & Related Research*, **478**, 517-524. <https://doi.org/10.1097/corr.0000000000000806>
- [5] Giannini, S., Buda, R., Cavallo, M., Ruffilli, A., Pagliuzzi, G., Luciani, D., et al. (2014) Bipolar Fresh Total Osteochondral Allograft: Why, Where, When: AAOS Exhibit Selection. *Journal of Bone and Joint Surgery*, **96**, e65. <https://doi.org/10.2106/jbjs.m.01160>
- [6] Puerta-GarciaSandoval, P., Lizaur-Utrilla, A., Trigueros-Rentero, M.A. and Lopez-Prats, F.A. (2019) Mid- to Long-Term Results of Allograft-Prosthesis Composite Reconstruction after Removal of a Distal Femoral Malignant Tumor Are Comparable to Those of the Proximal Tibia. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, **27**, 2218-2225. <https://doi.org/10.1007/s00167-018-5110-4>
- [7] Zekry, K.M., Yamamoto, N., Hayashi, K., Takeuchi, A., Alkhoody, A.Z.A., Abd-Elfattah, A.S., et al. (2019) Reconstruction of Intercalary Bone Defect after Resection of Malignant Bone Tumor. *Journal of Orthopaedic Surgery*, **27**. <https://doi.org/10.1177/2309499019832970>
- [8] Hindiskere, S., Staals, E., Donati, D.M. and Manfrini, M. (2021) What Is the Survival of the Telescope Allograft Technique to Augment a Short Proximal Femur Segment in Children after Resection and Distal Femur Endoprosthesis Reconstruction for a Bone Sarcoma? *Clinical Orthopaedics & Related Research*, **479**, 1780-1790. <https://doi.org/10.1097/corr.0000000000001686>
- [9] Kancherla, N.R., Paruchuri, S., Arvind, B., Peddamadyam, S., Eppakayala, S. and Cherukuri, N. (2024) Our Experience with Extracorporeal Irradiation and Reimplantation of the Irradiated Bone for the Reconstruction of Bone Defects Following Tumor Resection. *Cureus*, **16**, e52853. <https://doi.org/10.7759/cureus.52853>
- [10] Dai, Z., Sun, Y., Maihemuti, M. and Jiang, R. (2023) Follow-Up of Biological Reconstruction of Epiphysis Preserving Osteosarcoma around the Knee in Children: A Retrospective Cohort Study. *Medicine*, **102**, e33237. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000033237>
- [11] Takeuchi, A., Tsuchiya, H., Setsu, N., Gokita, T., Tome, Y., Asano, N., et al. (2023) What Are the Complications, Function, and Survival of Tumor-Devitalized Autografts Used in Patients with Limb-Sparing Surgery for Bone and Soft Tissue Tumors? A Japanese Musculoskeletal Oncology Group Multi-Institutional Study. *Clinical Orthopaedics & Related Research*, **481**, 2110-2124. <https://doi.org/10.1097/corr.0000000000002720>
- [12] Hindiskere, S., Doddarangappa, S. and Chinder, P.S. (2020) What Are the Challenges and Complications of Sterilizing Autografts with Liquid Nitrogen for Malignant Bone Tumors? A Preliminary Report. *Clinical Orthopaedics & Related Research*, **478**, 2505-2519. <https://doi.org/10.1097/corr.0000000000001347>
- [13] El Masry, A.M., Azmy, S.I., Rahman Mustafa, M.A. and Abuelhadid, M.A. (2023) Does a Single Osteotomy Technique for Frozen Autograft (Pedicled Freezing) in Patients with Malignant Bone Tumors of the Long Bones Achieve Union and Local Tumor Control? *Clinical Orthopaedics & Related Research*, **482**, 340-349. <https://doi.org/10.1097/corr.0000000000002788>
- [14] Lee, S.Y., Jeon, D., Cho, W.H., Song, W.S. and Kim, B.S. (2018) Are Pasteurized Autografts Durable for Reconstructions after Bone Tumor Resections? *Clinical Orthopaedics & Related Research*, **476**, 1728-1737. <https://doi.org/10.1007/s11999.0000000000000100>
- [15] Yang, J., Li, W., Feng, R. and Li, D. (2022) Intercalary Frozen Autografts for Reconstruction of Bone Defects Following Meta-/Diaphyseal Tumor Resection at the Extremities. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **23**, Article No. 890. <https://doi.org/10.1186/s12891-022-05840-6>
- [16] Yilmaz, S. (2023) A Bibliometric Study of Vascularized Fibular Grafting Technique. *Anatolian Current Medical Journal*, **5**, 217-226. <https://doi.org/10.38053/acmj.1302810>
- [17] Sheridan, G.A., Cassidy, J.T., Donnelly, A., Noonan, M., Kelly, P.M. and Moore, D.P. (2021) Non-Vascularised Fibular Autograft for Reconstruction of Paediatric Bone Defects: An Analysis of 10 Cases. *Strategies in Trauma and Limb Reconstruction*, **15**, 84-90. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10080-1462>
- [18] Lenze, U., Kasal, S., Hefti, F. and Krieg, A.H. (2017) Non-Vascularised Fibula Grafts for Reconstruction of Segmental

- and Hemicortical Bone Defects Following Meta-/Diaphyseal Tumour Resection at the Extremities. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **18**, Article No. 289. <https://doi.org/10.1186/s12891-017-1640-z>
- [19] Campanacci, D.A., Scanferla, R., Innocenti, M., Muratori, F., Puccini, S., Scoccianti, G., *et al.* (2023) Are Vascularized Fibula Autografts a Long-Lasting Reconstruction after Intercalary Resection of the Humerus for Primary Bone Tumors? *Clinical Orthopaedics & Related Research*, **481**, 2185-2197. <https://doi.org/10.1097/corr.0000000000002739>
- [20] Campanacci, D.A., Scanferla, R., Marsico, M., Scolari, F., Scoccianti, G., Beltrami, G., *et al.* (2024) Intercalary Resection of the Tibia for Primary Bone Tumors: Are Vascularized Fibula Autografts with or without Allografts a Durable Reconstruction? *Clinical Orthopaedics & Related Research*, **482**, 960-975. <https://doi.org/10.1097/corr.0000000000003007>
- [21] Kim, M.B., Kim, K.W., Lee, S.H. and Lee, Y.H. (2023) Use of Three-Column Reconstruction and Free Vascularized Fibular Grafts for the Repair of Large Tibial Defects after Tumor Resection. *Clinics in Orthopedic Surgery*, **15**, 1029-1035. <https://doi.org/10.4055/cios22298>
- [22] Gezer, M.C., Karaca, M.O. and Yıldız, H.Y. (2025) Association between Union Time and Clinical and Functional Outcomes Following Reconstruction with Free Vascularized Fibular Graft in Patients with Bone Tumors. *Journal of Orthopaedic Surgery*, **33**. <https://doi.org/10.1177/10225536251345182>
- [23] Xu, L., Wen, L., Qiao, J., Zhu, Z., Qiu, Y., Xiong, J., *et al.* (2020) Clinical Outcome of Free Vascularized Fibula Graft in the Surgical Treatment of Extremity Osteosarcoma. *Orthopaedic Surgery*, **12**, 727-733. <https://doi.org/10.1111/os.12646>
- [24] Crenn, V., Quinette, Y., Bouthors, C., Missenard, G., Viard, B., Anract, P., *et al.* (2022) Intercalary Allograft Reconstruction Following Femoral Tumour Resection: Mid- and Long-Term Results and Benefits of Adding a Vascularised Fibula Autograft. *World Journal of Surgical Oncology*, **20**, Article No. 195. <https://doi.org/10.1186/s12957-022-02650-x>
- [25] Bus, M.P.A., van de Sande, M.A.J., Fiocco, M., Schaap, G.R., Bramer, J.A.M. and Dijkstra, S.P.D. (2017) What Are the Long-Term Results of MUTARS® Modular Endoprostheses for Reconstruction of Tumor Resection of the Distal Femur and Proximal Tibia? *Clinical Orthopaedics & Related Research*, **475**, 708-718. <https://doi.org/10.1007/s11999-015-4644-8>
- [26] Sadek, W.M.S., Ebeid, W.A., Ghoneimy, A.E., Ebeid, E. and Senna, W.G.A. (2023) Functional and Oncological Outcome of Patients with Distal Femoral Osteosarcoma Managed by Limb Salvage Using Modular Endoprosthesis. *Annals of Surgical Oncology*, **30**, 5150-5158. <https://doi.org/10.1245/s10434-023-13679-x>
- [27] Ebeid, W.A. and Hassan, M.H.A. (2023) Functional Outcome Following Proximal Tibial Osteosarcoma Resection and Reconstruction by Modular Endoprosthesis. *Annals of Surgical Oncology*, **30**, 1914-1925. <https://doi.org/10.1245/s10434-022-12788-3>
- [28] 王冀川, 赵志庆, 杨毅, 等. 保留骨骺铰链型膝关节假体治疗儿童股骨远端骨肉瘤的疗效[J]. 中华骨科杂志, 2023, 43(10): 629-636.
- [29] El Ghoneimy, A.M., Shehab, A.M. and Farid, N. (2022) What Is the Cumulative Incidence of Revision Surgery and What Are the Complications Associated with Stemmed Cementless Nonextendable Endoprostheses in Patients 18 Years or Younger with Primary Bone Sarcomas about the Knee. *Clinical Orthopaedics & Related Research*, **480**, 1329-1338. <https://doi.org/10.1097/corr.0000000000002150>
- [30] Huang, J., Cheng, J., Bi, W., Xu, M., Jia, J., Han, G., *et al.* (2023) Neoadjuvant Chemotherapy and Expandable Prosthesis Reconstruction to Treat Osteosarcoma around the Knee in Children. *Orthopaedic Surgery*, **15**, 162-168. <https://doi.org/10.1111/os.13563>
- [31] Pala, E., Trovarelli, G., Angelini, A., *et al.* (2017) Megaprosthesis of the Knee in Tumor and Revision Surgery. *Acta Biomedica*, **88**, 129-138.
- [32] Wirth, T., Manfrini, M. and Mascard, E. (2021) Lower Limb Reconstruction for Malignant Bone Tumours in Children. *Journal of Children's Orthopaedics*, **15**, 346-357. <https://doi.org/10.1302/1863-2548.15.210126>
- [33] Tsuda, Y., Tsoi, K., Stevenson, J.D., Fujiwara, T., Tillman, R. and Abudu, A. (2020) Extendable Endoprostheses in Skeletally Immature Patients: A Study of 124 Children Surviving More than 10 Years after Resection of Bone Sarcomas. *Journal of Bone and Joint Surgery*, **102**, 151-162. <https://doi.org/10.2106/jbjs.19.00621>
- [34] Ippolito, J.A., Campbell, M.L., Siracuse, B.L. and Benevenia, J. (2020) Reconstruction with Custom Unicdylar Hemiarthroplasty Following Tumor Resection: A Case Series and Review of the Literature. *The Journal of Knee Surgery*, **33**, 818-824. <https://doi.org/10.1055/s-0039-1688556>
- [35] Li, Y., Xu, H., Yang, Y., Shan, H., Huang, Z., Ma, K., *et al.* (2024) Survival and Functional Outcomes after Hemiarthroplasty in Children with Proximal Tibial Osteosarcoma. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **19**, Article No. 619. <https://doi.org/10.1186/s13018-024-05103-1>
- [36] Li, Z., Fan, D., Zhao, J., Deng, Z., Yang, Y., Jin, T., *et al.* (2025) Is Proximal Tibial Hemiarthroplasty Reconstruction

- Effective in Minimizing Limb Length Discrepancy among Skeletally Immature Patients with Primary Bone Sarcomas? *Clinical Orthopaedics & Related Research*, **483**, 2163-2174. <https://doi.org/10.1097/corr.0000000000003543>
- [37] Angelini, A., Trovarelli, G., Berizzi, A., Pala, E., Breda, A. and Ruggieri, P. (2019) Three-Dimension-Printed Custom-Made Prosthetic Reconstructions: From Revision Surgery to Oncologic Reconstructions. *International Orthopaedics*, **43**, 123-132. <https://doi.org/10.1007/s00264-018-4232-0>
- [38] Chen, G., Muheremu, A., Yang, L., Wu, X., He, P., Fan, H., *et al.* (2020) Three-Dimensional Printed Implant for Reconstruction of Pelvic Bone after Removal of Giant Chondrosarcoma: A Case Report. *Journal of International Medical Research*, **48**. <https://doi.org/10.1177/0300060520917275>
- [39] Wang, J., An, J., Lu, M., Zhang, Y., Lin, J., Luo, Y., *et al.* (2021) Is Three-Dimensional-Printed Custom-Made Ultra-Short Stem with a Porous Structure an Acceptable Reconstructive Alternative in Peri-Knee Metaphysis for the Tumorous Bone Defect? *World Journal of Surgical Oncology*, **19**, Article No. 235. <https://doi.org/10.1186/s12957-021-02355-7>
- [40] Gong, T., Lu, M., Min, L., Luo, Y. and Tu, C. (2023) Reconstruction of a 3D-Printed Endoprosthesis after Joint-Preserving Surgery with Intraoperative Physcal Distraction for Childhood Malignancies of the Distal Femur. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **18**, Article No. 534. <https://doi.org/10.1186/s13018-023-04037-4>
- [41] Li, Z., Lu, M., Zhang, Y., You, Q., Wang, Y., Li, L., *et al.* (2022) Three-Dimensional Printed Customized Uncemented Unipolar Prosthesis Combined with Ligament Reconstruction for Tumorous Defect of the Distal Femur in Children. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **23**, Article No. 1100. <https://doi.org/10.1186/s12891-022-06053-7>
- [42] Atherley O'Meally, A., Cosentino, M., Aiba, H., Aso, A., Solou, K., Rizzi, G., *et al.* (2024) Similar Complications, Implant Survival, and Function Following Modular Prosthesis and Allograft-Prosthesis Composite Reconstructions of the Proximal Femur for Primary Bone Tumors: A Systematic Review and Meta-Analysis. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology*, **34**, 1581-1595. <https://doi.org/10.1007/s00590-024-03846-5>
- [43] Errani, C., Aiba, H., Atherley, A., Palmas, M., Kimura, H., Donati, D.M., *et al.* (2024) What Is the Revision-Free Survival of Resurfaced Allograft-Prosthesis Composites for Proximal Humerus Reconstruction in Children with Bone Tumors? *Clinical Orthopaedics & Related Research*, **482**, 979-990. <https://doi.org/10.1097/corr.0000000000002969>
- [44] Jamshidi, K., Bagherifard, A., Khabiri, S.S. and Mirzaei, A. (2025) Osteoarticular Allograft versus Prosthetic Allograft Composites: Which Reconstruction Method Results in Superior Outcomes Following the Resection of Proximal Femur Tumor in Adolescent and Preadolescent Patients? *BMC Musculoskeletal Disorders*, **26**, Article No. 323. <https://doi.org/10.1186/s12891-025-08598-9>
- [45] Atherley O'Meally, A., Rizzi, G., Cosentino, M., Aiba, H., Aso, A., Solou, K., *et al.* (2025) What Are the Complications, Reconstruction Survival, and Functional Outcomes of Modular Prosthesis and Allograft-Prosthesis Composite for Proximal Femur Reconstruction in Children with Primary Bone Tumors? *Clinical Orthopaedics & Related Research*, **483**, 455-469. <https://doi.org/10.1097/corr.0000000000003245>
- [46] Capanna, R., Campanacci, D.A., Belot, N., Beltrami, G., Manfrini, M., Innocenti, M., *et al.* (2007) A New Reconstructive Technique for Intercalary Defects of Long Bones: The Association of Massive Allograft with Vascularized Fibular Autograft. Long-Term Results and Comparison with Alternative Techniques. *Orthopedic Clinics of North America*, **38**, 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.ocl.2006.10.008>
- [47] Opyrchał, J., Bula, D., Dowgierd, K., Pachuta, B., Krakowczyk, D., Raciborska, A., *et al.* (2024) Case Series: Fibula Free Flap with Bone Allograft as the Gold Standard in Lower Limb-Salvage Surgery for Adolescent Patients with Primary Bone Tumors Located within Tibial Diaphysis: Technical Modifications and Short-Term Follow-Up. *Journal of Clinical Medicine*, **13**, Article No. 4217. <https://doi.org/10.3390/jcm13144217>
- [48] Elemosho, A., Czerniecki, S., Ramadan, S., Farhan, S., Mitchell, K.S. and Souza, J.M. (2025) Comparative Outcomes of Allograft with Vascularized Fibula Graft vs Vascularized Fibula Graft Alone for Post-Oncologic Lower Extremity Salvage—Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*, **108**, 75-85. <https://doi.org/10.1016/j.bjps.2025.06.026>
- [49] Houdek, M.T., Wagner, E.R., Stans, A.A., Shin, A.Y., Bishop, A.T., Sim, F.H., *et al.* (2016) What Is the Outcome of Allograft and Intramedullary Free Fibula (Capanna Technique) in Pediatric and Adolescent Patients with Bone Tumors? *Clinical Orthopaedics & Related Research*, **474**, 660-668. <https://doi.org/10.1007/s11999-015-4204-2>
- [50] Errani, C., Alfaro, P.A., Ponz, V., Colangeli, M., Donati, D.M. and Manfrini, M. (2021) Does the Addition of a Vascularized Fibula Improve the Results of a Massive Bone Allograft Alone for Intercalary Femur Reconstruction of Malignant Bone Tumors in Children? *Clinical Orthopaedics & Related Research*, **479**, 1296-1308. <https://doi.org/10.1097/corr.0000000000001639>
- [51] Rezende, L.G.R.A., Margatho, G.L., Penno, R.A.L., Mazzer, N. and Engel, E.E. (2021) Devitalized Autograft Associated with the Vascularized Fibula Graft: Irradiation versus Freezing Methods. *Journal of Reconstructive Microsurgery*, **37**, 655-661. <https://doi.org/10.1055/s-0041-1724127>
- [52] Özger, H., Alpan, B., Eralp, L., Valiyev, N., Sungur, M., Aycan, O.E., *et al.* (2023) Is Liquid Nitrogen Recycled Bone and Vascular Fibula Combination the Biological Reconstruction of Choice in Lower Extremity Long Bone Tumor-

- Related Defects? *Journal of Surgical Oncology*, **128**, 902-915. <https://doi.org/10.1002/jso.27385>
- [53] Lu, Y., Zhu, H., Huang, M., Zhang, C., Chen, G., Ji, C., *et al.* (2020) Is Frozen Tumour-Bearing Autograft with Concurrent Vascularized Fibula an Alternative to the Capanna Technique for the Intercalary Reconstruction after Resection of Osteosarcoma in the Lower Limb? *The Bone & Joint Journal*, **102**, 646-652. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.102b5.bjj-2019-1380.r1>
- [54] Kurtz, S., Ong, K., Lau, E., Mowat, F. and Halpern, M. (2007) Projections of Primary and Revision Hip and Knee Arthroplasty in the United States from 2005 to 2030. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, **89**, 780-785. <https://doi.org/10.2106/jbjs.f.00222>
- [55] Jeys, L.M., Kulkarni, A., Grimer, R.J., Carter, S.R., Tillman, R.M. and Abudu, A. (2008) Endoprosthetic Reconstruction for the Treatment of Musculoskeletal Tumors of the Appendicular Skeleton and Pelvis. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, **90**, 1265-1271. <https://doi.org/10.2106/jbjs.f.01324>
- [56] Miclau, T., Schneider, R.A., Frank Eames, B. and Helms, J.A. (2005) Common Molecular Mechanisms Regulating Fetal Bone Formation and Adult Fracture Repair. In: Lieberman, J.R. and Friedlaender, G.E., Eds., *Bone Regeneration and Repair*, Humana Press, 45-55. <https://doi.org/10.1385/1-59259-863-3:045>
- [57] Zekry, K.M., Yamamoto, N., Hayashi, K., Takeuchi, A., Higuchi, T., Abe, K., *et al.* (2017) Intercalary Frozen Autograft for Reconstruction of Malignant Bone and Soft Tissue Tumours. *International Orthopaedics*, **41**, 1481-1487. <https://doi.org/10.1007/s00264-017-3446-x>
- [58] Xu, H., Li, Y., Yu, F., Liu, W., Hao, L., Zhang, Q., *et al.* (2023) GMRS Oncological Prosthesis with a Porous Coating Collar: A Good Option for Revision of Aseptic Loosening in the Lower Extremity. *Journal of Clinical Medicine*, **12**, Article No. 892. <https://doi.org/10.3390/jcm12030892>
- [59] Natera Cisneros, L.G. (2015) Megaprosthesis Revision Caused by Aseptic Loosening and Nonunion of the Structural Allograft in Patients Younger than 40 Years. *Orthopedic Research and Physiotherapy*, **1**, 1-5. <https://doi.org/10.24966/orp-2052/100016>
- [60] Kovoov, C.C., Jayakumar, R., George, V.V., Padmanabhan, V., Guild, A.J. and Viswanath, S. (2011) Vascularized Fibular Graft in Infected Tibial Bone Loss. *Indian Journal of Orthopaedics*, **45**, 330-335. <https://doi.org/10.4103/0019-5413.82337>
- [61] del Piñal, F. and Innocenti, M. (2007) Evolving Concepts in the Management of the Bone Gap in the Upper Limb. Long and Small Defects. *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*, **60**, 776-792. <https://doi.org/10.1016/j.bjps.2007.03.006>