doi:10.11659/jjssx.08E024097

·综 述·

micro-CT和有限元分析技术在手舟骨研究中的应用进展

吕 远[1,2],张德洲[1],钱海龙[2],王思敏[1],王超群[3],李 琨[4,5],陈 杰[4],白 雪[5],赵海龙[5],张少杰[4,5],马 渊[5],李志军[4,5],史 君[6],王 星[4,5]（1.内蒙古医科大学研究生院,内蒙古 呼和浩特 010110;2.包头市肿瘤医院微创肿瘤介入外科,内蒙古 包头 014030;3.内蒙古医科大学附属医院影像科,内蒙古 呼和浩特 010050;4.内蒙古医科大学基础医学院解剖学教研室,内蒙古 呼和浩特 010110;5.内蒙古医科大学基础医学院数字医学中心/内蒙古自治区数字转化医学工程技术研究中心,内蒙古 呼和浩特 010059;6.内蒙古医科大学基础医学院生理学教研室,内蒙古 呼和浩特 010110）

［摘 要］ 手舟骨是手部的重要骨骼之一,在临床上损伤频发且治疗具有一定难度。因此,深入研究手舟骨的微观结构和生物力学特征对了解其损伤机制和优化治疗方案至关重要。微计算机断层扫描(micro-CT)技术提供了高分辨率的骨组织成像,而有限元分析则能帮助模拟手舟骨在不同生理和病理状态下的应力分布和行为模式。通过micro-CT技术获取手舟骨的高分辨率三维图像,能够用于构建手舟骨真实解剖结构的有限元模型,从而实现对手舟骨力学性能的精确模拟。这两种先进技术的融合为揭示手舟骨的结构功能关系及其损伤机制提供了新视角。因此,本文回顾了手舟骨的解剖学特征及其在不同状态下的生物力学行为,并重点讨论了micro-CT和有限元分析技术在手舟骨研究中的具体应用及其优势,通过综述近几年来的研究成果,为手舟骨相关疾病的诊断、治疗及预防提供新的科学依据和方法。

［关键词］手舟骨;微观结构;生物力学;micro-CT;有限元分析;基础研究;临床研究;研究进展
［中图分类号］R687.3 ［文献标志码］A ［收稿日期］2024-08-25

Application progress of micro-CT and finite element analysis techniques in scaphoid bone research

LYU Yuan[1,2], ZHANG De-zhou[1], QIAN Hai-long[2], WANG Si-min[1], WANG Chao-qun[3], LI Kun[4,5], CHEN Jie[4], BAI Xue[5], ZHAO Hai-long[5], ZHANG Shao-jie[4,5], MA Yuan[5], LI Zhi-jun[4,5], SHI Jun[6], WANG Xing[4,5] (1. Graduate School, Inner Mongolia Medical University, Hohhot Inner Mongolia 010110, China; 2. Minimally Invasive Tumor Interventional Surgery, Baotou Cancer Hospital, Baotou Inner Mongolia 014030, China; 3. Department of Imaging, Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Hohhot Inner Mongolia 010050, China; 4. Human Anatomy Teaching and Research Section, School of Basic Medicine, Inner Mongolia Medical University, Hohhot Inner Mongolia 010110, China; 5. Digital Medicine Center, School of Basic Medicine, Inner Mongolia Medical University/Inner Mongolia Autonomous Region Digital Translational Medicine Engineering Technology Research Center, Hohhot Inner Mongolia 010059, China; 6. Physiology Teaching and Research Section, School of Basic Medicine, Inner Mongolia Medical University, Hohhot Inner Mongolia 010110, China)

Abstract: The scaphoid bone is one of the important bone of hand, which is frequently injured and difficult to treat in clinical practice. Therefore, it is very important to deeply study the microstructure and biomechanical characteristics of the scaphoid bone for understanding its injury mechanism and optimizing treatment scheme. Microcomputed tomography (micro-CT) provides high-resolution imaging of bone tissue, while finite element analysis can help to simulate the stress distribution and behavioral patterns of the scaphoid bone under various physiological and pathological states. The high-resolution three-dimensional image of the scaphoid bone obtained by micro-CT technology can be used to construct finite element models of real anatomical structure of the scaphoid bone, thus achieving accurate simulation of the mechanical properties of the scaphoid bone. The fusion of these two advanced technologies provides a new perspective for revealing the structural and functional relationships and injury mechanism of the scaphoid bone. Therefore, this paper reviews the anatomical characteristics of the scaphoid bone and its biomechanical behavior in different states, emphasizing the specific applications and advantages of micro-CT and finite element analysis techniques in the study of the scaphoid bone. By summarizing the research findings in recent years, this paper provides novel scientific basis and methods for the diagnosis, treatment, and prevention of scaphoid bone-related disorders.

Keywords: scaphoid bone; microstructure; biomechanics; micro-CT; finite element analysis; basic research; clinical research; research progress

---

［基金项目］内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划资助(NJYT22009);内蒙古医科大学科研重点项目(YKD2021ZD011);内蒙古自治区卫生健康委医疗卫生科技计划项目(202201217);内蒙古医科大学博士启动基金项目(YKD2023BSQD014);内蒙古医科大学教学创新团队(NYCXTD202406);内蒙古医科大学2024年度“善学”人才(ZY20242104)

［通信作者］王 星,E-mail:wangxing197911@163.com;史 君,E-mail:13948616829@163.com

手舟骨在手部解剖学中占据重要地位,对手部功能的发挥起着关键作用。手舟骨位于腕骨中最内侧,主要参与构成腕关节的近侧列,与桡骨、月骨和三角骨共同作用,维持腕关节的稳定性和灵活性[1-4]。然而,由于手舟骨独特的解剖位置和血供特征,其非常容易发生骨折,且愈合过程复杂,常常导致骨折不愈合或延迟愈合等并发症[5-7]。手舟骨骨折是最常见的腕部骨折之一,约占所有腕部骨折的60%[8-10]。由于手舟骨血供有限,其骨折后容易发生缺血性坏死,导致骨折不愈合或延迟愈合,严重影响患者的手部功能和生活质量[11-12]。近年来,关于手舟骨的微观结构与生物力学特征研究取得了显著进展。手舟骨的微观结构包括骨小梁的排列、骨密度等,这些微观结构直接影响骨的机械性能和愈合能力[13-14]。生物力学特征则涉及骨在不同力学环境下的应力分布、变形和断裂行为,这些特征对于理解手舟骨的损伤机制和制定治疗策略至关重要[15-16]。

微计算机断层扫描(microcomputed tomography, micro-CT)技术和有限元分析技术在手舟骨研究中具有重要应用。micro-CT技术能够生成高分辨率的骨组织三维图像,精确描述骨骼的微观结构[17-19]。有限元分析技术通过计算机模拟骨骼在不同力学条件下的应力分布和变形特征,分析骨骼的生物力学特征[20-21]。这两种技术的结合应用,为手舟骨的微观结构与生物力学特征研究提供了新的视角和方法[22-23]。本文回顾了手舟骨的解剖学特征及其在不同状态下的生物力学行为,并重点讨论了micro-CT和有限元分析技术在手舟骨研究中的具体应用及其优势,通过综述近几年来的研究成果,为手舟骨相关疾病的诊断、治疗及预防提供新的科学依据和方法。

1 手舟骨的解剖学特征与功能

手舟骨位于手腕的近端行列,是近排腕骨中最大、最长的一块,形态类似于船,因而得名;同时,其位于腕骨的桡侧近侧列,并与多块腕骨相连接,包括大多角骨、小多角骨和头状骨[24-25]。手舟骨的解剖结构复杂,表面覆盖着关节软骨,内部由致密的骨皮质和松质骨组成,可有效承受和分散手腕运动中的应力[26]。手舟骨的独特形态和位置使其在手腕的屈伸、旋转和侧向运动中起到重要的支撑和传导作用[27-29]。

手舟骨在手部运动中的作用及其对生物力学的影响是多方面的。首先,手舟骨是手腕的关键枢纽,连接前臂和手部,参与手腕的各种运动,包括屈曲、伸展、内收和外展[30-31]。其次,手舟骨能有效地分散和传导手腕运动中的应力,减少局部应力集中,防止骨折和其他损伤[32-33]。手舟骨的这些解剖学特征及功能共同支撑着手腕的运动与稳定性,其独特的形态和位置在应力分散与传导中发挥着关键作用,对于预防损伤具有重要意义[34-35]。然而,鉴于手舟骨血液供应的局限性,手舟骨在损伤后常愈合不佳[36-37]。因此,深入探究手舟骨的微观结构和生物力学特征,对于指导手舟骨损伤的诊断、治疗及预防工作至关重要[38]。

2 micro-CT技术在手舟骨研究中的应用

micro-CT技术是一种高分辨率的三维成像工具,与传统的二维成像技术相比,其分辨率更高,三维重建更精确,能够展示骨小梁和骨皮质等微观结构的细节[32,39-40]。micro-CT技术广泛应用于分析手舟骨微观结构特征。有研究利用micro-CT扫描获取手舟骨的高分辨率三维图像,从而详细呈现其内部结构状况,如骨小梁的排列方式和骨密度的分布情况等,有助于理解手舟骨的生物力学特性和损伤机制[41-43]。Feng等[26]利用micro-CT技术分析了不同区域的骨小梁微观结构,发现中间区域的骨小梁在承载负荷方面更具适应性。此外,micro-CT还可用于评估手舟骨在不同病理状态下的结构变化,如骨折、骨质疏松等,从而为临床诊断和治疗提供科学依据。

以往研究通过micro-CT技术对手舟骨进行扫描和分析,发现其微观结构在不同应力状态下表现出显著差异。micro-CT技术还被用于评估手舟骨修复材料和手术方法的效果,通过对植入材料或手术修复后的手舟骨进行micro-CT扫描,可以评估其结构完整性和生物相容性,从而优化治疗方案[44]。这种基于micro-CT的评估方法具有非侵入性、高精度的特点,能够提供实时、动态的结构信息,为临床决策提供重要参考。

3 有限元分析技术在手舟骨力学研究中的应用

有限元分析是一种数值计算方法,通过将复杂结构分解为有限数量的简单单元,来模拟和分析其在不同条件下的力学行为。有限元分析在生物力学研究中应用广泛,特别是在骨骼结构研究中[45-48]。研究发现,通过有限元分析可以精确模拟手舟骨在不同方向的载荷下的应力集中区域,从而帮助预测可能的骨折位置和类型[26]。

在手舟骨生物力学研究中,有限元模型的建立通常基于micro-CT或MRI等高分辨率的影像数据。这些影像数据可以提供手舟骨的详细几何结构信息,包括骨小梁的微观结构。通过将这些几何数据导入有

限元分析软件,可以建立精确的三维有限元模型,并进行生物力学模拟。Ohs等[32]利用micro-CT数据建立手舟骨的有限元模型发现,手舟骨的微观结构在不同载荷条件下表现出显著的应力集中现象,这对于理解手舟骨的损伤机制具有重要意义。有限元分析不仅可以用于模拟正常手舟骨的生物力学行为,还可以用于研究病理状态下的手舟骨。通过模拟骨质疏松或骨坏死等病理状态下的手舟骨,可以评估病变对手舟骨力学性能的影响。Tian等[36]通过有限元分析模拟了不同钙含量饮食对老年小鼠骨骼的影响,发现低钙饮食组的骨小梁微观结构显著恶化,导致骨骼在负荷下的应变强度增加。此外,有限元分析还可以用于评估手术治疗的效果,通过模拟不同固定方式对手舟骨骨折的修复效果,可帮助选择最佳的手术方案。Acar等[44]应用有限元分析技术模拟并比较了单螺钉和双螺钉固定治疗手舟骨腰部骨折(Herbert B2型)的生物力学性能,结果显示,双螺钉固定在减少骨折断端三维位移和旋转稳定性方面均优于单螺钉,有限元分析提供了定量力学数据,为优化固定策略和降低手舟骨骨折不愈合风险提供了科学依据,在骨折固定评估中起关键作用。总之,有限元分析通过模拟和分析手舟骨在不同条件下的力学行为,可以帮助理解手舟骨的损伤机制,评估病理状态,并优化手术治疗方案,为手舟骨损伤的诊断、治疗和预防提供了科学依据。

4 手舟骨损伤的诊断与治疗策略

4.1 基于micro-CT和有限元分析的诊断方法

micro-CT和有限元分析技术在手舟骨损伤的诊断中具有重要作用。micro-CT能够以高分辨率非破坏性地获取骨组织的三维图像,揭示手舟骨的微观结构变化,如其内部微结构和外部形态,不仅能够提供精确的解剖学信息,还能为有限元模型的构建提供可靠的数据支持,对于早期诊断和评估损伤程度至关重要。Oláh等[49]通过micro-CT技术分析骨小梁结构的变化,强调了该技术在早期诊断骨质疏松症中的应用潜力。Feng等[26]发现micro-CT技术通过精确分析骨小梁微观结构,为骨坏死病灶范围的诊断及分型分类合理性验证提供了重要依据,结合生物力学分析,micro-CT可评估不同分型方法划分坏死病灶区域的科学性,为骨坏死的精确诊断和治疗策略优化提供关键支持。有限元分析作为一种数值模拟方法,能够模拟手舟骨在不同载荷条件下的应力分布和变形情况,从而预测骨折风险和评估治疗效果[43]。Sosa等[50]运用有限元技术模拟特定能量范围内的外力对手部骨骼的影响,从而预测应力分布及骨折发生的可能性,结果显示,有限元模拟结果与尸体标本测试一致性良好,峰值反作用力的预测误差在-5.3%~4.9%,能有效识别最大主应力超过骨强度的位置,且与实际骨折分布相符,表明有限元分析是评估骨折风险及优化防护设计的可靠工具,在骨折风险评估中具有较高的准确性和实用性。Santoshi等[51]通过micro-CT扫描和有限元分析发现手舟骨在不同负荷条件下的应力分布和骨小梁的变形情况,从而揭示了手舟骨在生理和病理状态下的力学行为。通过建立基于micro-CT图像的有限元模型,可以评估手舟骨在屈曲、伸展和扭转等运动中的应力分布及稳定性,不仅有助于理解手舟骨的生物力学功能,还能为相关骨折的诊断和治疗提供更深入的科学依据。因此,基于micro-CT和有限元分析结合的诊断方法有助于深入研究手舟骨及其在手腕功能中的角色,进一步提升临床诊断和治疗效果,可以实现对手舟骨损伤的精确诊断和个性化治疗方案的制定。

4.2 优化手舟骨损伤的治疗方案

利用micro-CT和有限元分析技术,可以显著优化手舟骨损伤的治疗方案。micro-CT提供的高分辨率影像可以帮助医生在术前精确定位骨折部位,并评估骨折的复杂程度[32]。有限元分析可以模拟不同手术固定方案的力学性能,帮助选择最佳的固定方式。张必欢等[52]通过建立腕关节的三维有限元模型,对个体化3D打印钛合金舟骨部分置换术后的腕关节及假体在不同运动角度下的应力分布和形变进行了评估,结果显示,该手术方法能够显著减少腕关节整体形变,并实现合理的应力分布,总体应力远低于材料屈服强度,显示出良好的生物力学性能。这项研究不仅为个体化假体的设计提供了生物力学依据,也为临床治疗手舟骨骨不连伴骨坏死提供了一种有效的选择。Kusins等[53]通过机械测试评估近端肱骨干骺端骨小梁的机械性能,强调在评估骨小梁局部骨折风险时,需重点考虑骨矿含量和骨体积分数,以指导骨科应用中的诊断和治疗方案设计。Dong等[54]通过有限元分析技术建立了一个基于肌肉驱动的拇指模型,以模拟手部康复训练和韧带重建手术对拇指腕掌关节生物力学的影响,有限元分析显示,在拇指早期骨关节炎的治疗中,背侧韧带加强、鱼际肌训练和Eaton-Littler韧带重建方法具有明显的生物力学优势,这与临床观察到的良好疗效一致,表明有限元分析模型可为优化拇指骨关节炎治疗方案提供科学依据。Guha等[55]基于非线性连续体有限元方法,通过micro-CT技术评估骨小梁强度的可行性和可靠性,重点解决了不同CT扫描仪分辨率

差异对骨研究的影响,研究表明,基于micro-CT的有限元分析能够提供准确且可重复的骨小梁强度评估,为骨质疏松症的管理和发病机制研究提供了重要工具。Varga等[56]利用有限元分析模型比较了一种传统头状压缩螺钉与两种新设计螺钉在限制手舟骨腰部骨折块间运动方面的效果,分析了不同功能腕部位置和骨折块间压缩力条件下的螺钉性能,结果显示,新设计螺钉在限制骨折块间运动和提供旋转稳定性方面具有潜在的临床优势,特别是在骨折块间压缩力不足的情况下,可进一步改善舟骨骨折的愈合效果。此外,有限元分析还可以用于评估术后康复训练的效果,指导患者进行科学的康复训练,避免二次损伤[34]。Doi等[57]采用游离带血管的小型骨膜骨移植物治疗舟骨缺血性坏死导致的不愈合,具有操作简单、血供保留及成骨效果良好的优势,适用于舟骨不愈合的血管化骨移植治疗。这对指导患者康复训练具有重要意义。优化手舟骨损伤的治疗方案需要综合考虑其解剖学特征、生物力学功能及临床实际。首先,针对手舟骨的解剖结构复杂性和血液供应有限性,建议在诊断阶段采用micro-CT等高分辨率影像技术准确评估损伤的程度和位置。其次,基于有限元分析的模拟可以帮助理解手舟骨在不同负荷下的力学响应,从而制定个体化的治疗方案。治疗策略应综合考虑手舟骨的功能重建和损伤部位的稳定性恢复。传统的保守治疗如短期固定和功能锻炼常用于轻度损伤,而对于严重骨折或复杂损伤,则可能需要手术干预,如内固定或外固定术。手术选择应依据具体损伤类型和患者个体化因素,最大限度地保留手舟骨的解剖完整性和功能。此外,术后康复方案的制定至关重要,包括早期功能锻炼、物理治疗和逐步恢复负荷的计划。定期的临床随访和影像学评估是确保治疗效果和手舟骨功能恢复的关键。综上所述,优化手舟骨损伤的治疗方案应结合先进的影像技术、生物力学模拟和个体化治疗策略,以提高治疗效果和患者生活质量。

5 总结与展望

当前通过micro-CT高清成像和有限元分析模拟极大提升了对手舟骨结构和生物力学反应的认识,为精确诊断和治疗提供了支持。尽管这些技术推动了基础科学和临床策略的进步,但对不同手舟骨损伤类型的生物力学数据仍需进一步研究。未来应集中于micro-CT和有限元分析技术的进一步优化,特别是在精确评估不同损伤类型的手舟骨及其修复策略的生物力学性能方面。通过运用先进的计算技术和开发高效的三维模型,以期提高诊断准确率和治疗效果,为手舟骨损伤治疗带来革命性的改进。

[参考文献]

[1] Fowler JR, Hughes TB. Scaphoid fractures[J]. Clin Sports Med, 2015, 34(1):37-50. doi:10.1016/j.csm.2014.09.011.

[2] Sabbagh MD, Morsy M, Moran SL. Diagnosis and management of acute scaphoid fractures [J]. Hand Clin, 2019, 35 (3) : 259-269. doi: 10.1016/j.hcl.2019.03.002.

[3] Xiong G. The vascular anatomy of the scaphoid: vascular illustration and classification[J]. J Hand Surg Am, 2020, 45(8):e7. doi:10.1016/j.jhsa.2020.04.016.

[4] 沈重成,王鼎予,方 璇,等. 微CT构建人手舟骨骨内血管高精度三维模型[J]. 解剖学报, 2020, 51(4):557-560. doi:10.16098/j.issn.0529-1356.2020.04.014.

[5] Bevers M, Daniels AM, Van Rietbergen B, et al. Assessment of the healing of conservatively-treated scaphoid fractures using HR-pQCT [J]. Bone, 2021, 153:116161. doi:10.1016/j.bone.2021.116161.

[6] Burnier M, Loisel F, Ardouin L, et al. Treatment of scaphoid nonunion by arthroscopic cancellous bone grafting[J]. Orthop Traumatol Surg Res, 2023, 109(8s):103665. doi:10.1016/j.otsr.2023.103665.

[7] 张旭林,徐永清,何晓清,等. 手舟骨骨内动脉的数字解剖学研究及其临床意义[J]. 中国临床解剖学杂志, 2020, 38(3):259-262. doi:10.13418/j.issn.1001-165x.2020.03.005.

[8] Mercan N, Yıldırım A, Dere Y. Biomechanical analysis of tibiofibular syndesmosis injury fixation methods: a finite element analysis [J]. J Foot Ankle Surg, 2023, 62(1) : 107-114. doi: 10.1053/j.jfas.2022.05.007.

[9] Ferguson DO, Shanbhag V, Hedley H, et al. Scaphoid fracture non-union: a systematic review of surgical treatment using bone graft [J]. J Hand Surg Eur Vol, 2016, 41 (5) : 492-500. doi: 10.1177/1753193415 604778.

[10] 刘卫华,唐 曦,王 智,等. Micro CT三维重建手舟骨相关显微影像解剖学数据测量[J]. 中国组织工程研究, 2014, 18(22):3537-3541. doi:10.3969/j.issn.2095-4344.2014.22.017.

[11] Alshryda S, Shah A, Odak S, et al. Acute fractures of the scaphoid bone: systematic review and meta-analysis[J]. Surgeon, 2012, 10(4):218-229. doi:10.1016/j.surge.2012.03.004.

[12] Van Nest D, Ilyas AM. Scaphoid nonunion: a review of surgical strategies[J]. Orthopedics, 2022, 45(5):e235-e242. doi:10.3928/01477447-20220608-03.

[13] Yang Z, Wang C, Gao H, et al. Biomechanical effects of 3D-printed bioceramic scaffolds with porous gradient structures on the regeneration of alveolar bone defect: a comprehensive study [J]. Front Bioeng Biotechnol, 2022, 10:882631. doi:10.3389/fbioe.2022.882631.

[14] Gire JD, Thio T, Behn AW, et al. Rotational stability of scaphoid waist nonunion bone graft and fixation techniques[J]. J Hand Surg Am, 2020, 45(9):841-849. e1. doi:10.1016/j.jhsa.2020.05.012.

[15] Yan M, Liang T, Zhao H, et al. Model properties and clinical application in the finite element analysis of knee joint: a review[J]. Orthop Surg, 2024, 16(2):289-302. doi:10.1111/os.13980.

[16] Li B, Wen J, Liu H, et al. Dysplasia epiphysealis hemimelica combined with contralateral accessory scaphoid bone: a case report and literature review [J]. Medicine (Baltimore), 2019, 98 (45) :

e17887. doi:10.1097/MD.0000000000017887.

[17] De Cet A, D'andrea L, Gastaldi D, et al. micro-CT imaging and finite element models reveal how sintering temperature affects the microstructure and strength of bioactive glass-derived scaffolds[J]. Sci Rep, 2024, 14(1):969. doi:10.1038/s41598-023-50255-5.

[18] Norman DG, Baier W, Watson DG, et al. micro-CT for saw mark analysis on human bone[J]. Forensic Sci Int, 2018, 293:91-100. doi:10.1016/j.forsciint.2018.10.027.

[19] Li Z, Shi D, Li H, et al. micro-CT study of the human cochlear aqueduct[J]. Surg Radiol Anat, 2018, 40(6):713-720. doi:10.1007/s00276-018-2020-6.

[20] Cao H, Wu H, Li J, et al. Influence of different postballoon expansion procedures: a finite element analysis[J]. Med Phys, 2023, 50(1):30-37. doi:10.1002/mp.16086.

[21] Maitirouzi J, Luo H, Zhou Z, et al. Finite element analysis of human lumbar vertebrae in internal fixation system model with different bone density trajectories[J]. Int J Artif Organs, 2022, 45(5):478-487. doi:10.1177/03913988221088613.

[22] Wang YG, Zhu GY, Liu JQ, et al. Dynamic biomechanical changes of clear aligners during extraction space closure: finite element analysis[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2024, 165(3):272-284. e3. doi:10.1016/j.ajodo.2023.08.017.

[23] Kahaer A, Zhang R, Wang Y, et al. Hybrid pedicle screw and modified cortical bone trajectory technique in transforaminal lumbar interbody fusion at L_4-L_5 segment: finite element analysis[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2023, 24(1):288. doi:10.1186/s12891-023-06385-y.

[24] Ghargozloo D, Tomarchio A, Ballerini M, et al. Traumatic bilateral scaphoid fractures[J]. Med Glas (Zenica), 2021, 18(1):222-225. doi:10.17392/1332-21.

[25] Ecker J. Scaphoid union: the role of wrist arthroscopy[J]. Hand Clin, 2017, 33(4):677-686. doi:10.1016/j.hcl.2017.07.001.

[26] Feng C, Wang L, Xu P, et al. Microstructural and mechanical evaluations of region segmentation methods in classifications of osteonecrosis[J]. J Biomech, 2021, 119:110208. doi:10.1016/j.jbiomech.2020.110208.

[27] Clark DM, Piscoya AS, Dunn JC, et al. Bone morphogenic protein-2 use for the surgical treatment of acute scaphoid fractures and scaphoid nonunions[J]. Plast Reconstr Surg, 2022, 150(3):608e-612e. doi:10.1097/PRS.0000000000009416.

[28] Ek ET, Johnson PR, Bohan CM, et al. Autologous bone grafting and double screw fixation for unstable scaphoid nonunions with cavitary bone loss[J]. J Hand Surg Eur Vol, 2021, 46(2):205-206. doi:10.1177/1753193420946656.

[29] 吕利军,彭 伟,常艳艳,等. 腕关节镜辅助治疗手舟骨骨不连的治疗进展[J]. 临床与病理杂志, 2022, 42(11):2843-2849. doi:10.3978/j.issn.2095-6959.2022.11.037.

[30] Boe CC, Amadio PC, Kakar S. The management of the healed scaphoid malunion: what to do?[J]. Hand Clin, 2019, 35(3):373-379. doi:10.1016/j.hcl.2019.03.008.

[31] Janowski J, Coady C, Catalano LW 3rd. Scaphoid fractures: nonunion and malunion[J]. J Hand Surg Am, 2016, 41(11):1087-1092. doi:10.1016/j.jhsa.2016.08.019.

[32] Ohs N, Collins CJ, Atkins PR. Validation of HR-pQCT against micro-CT for morphometric and biomechanical analyses: a review[J]. Bone Rep, 2020, 13:100711. doi:10.1016/j.bonr.2020.100711.

[33] Kılıç B, Çalışkan M, Agar A, et al. Comparison of two different screw trajectories in the treatment of oblique scaphoid fractures: a mechanical study on composite bone models[J]. Jt Dis Relat Surg, 2021, 32(2):377-382. doi:10.52312/jdrs.2021.15.

[34] Schmidle G, Ebner HL, Klima G, et al. Time-dependent changes in bone healing capacity of scaphoid fractures and non-unions[J]. J Anat, 2018, 232(6):908-918. doi:10.1111/joa.12795.

[35] Ko JH, Pet MA, Khouri JS, et al. Management of scaphoid fractures[J]. Plast Reconstr Surg, 2017, 140(2):333e-346e. doi:10.1016/j.hcl.2019.03.002.

[36] Tian A, Zhong Z, Li Y, et al. Biomechanical role of trabecular microstructure on peri-implant strain based on micro-CT finite element modeling of aging mice[J]. Int J Oral Maxillofac Implants, 2021, 36(4):715-722. doi:10.11607/jomi.8611.

[37] Oka K, Murase T, Moritomo H, et al. Patterns of bone defect in scaphoid nonunion: a 3-dimensional and quantitative analysis[J]. J Hand Surg Am, 2005, 30(2):359-365. doi:10.1016/j.jhsa.2004.10.004.

[38] Wu T, Bonnheim NB, Pendleton MM, et al. Radiation-induced changes in load-sharing and structure-function behavior in murine lumbar vertebrae[J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2023:1-9. doi:10.1080/10255842.2023.2239415.

[39] Peyrin F. Evaluation of bone scaffolds by micro-CT[J]. Osteoporos Int, 2011, 22(6):2043-2048. doi:10.1007/s00198-011-1609-y.

[40] Pumberger M, Issever AS, Diekhoff T, et al. Bone structure determined by HR-MDCT does not correlate with micro-CT of lumbar vertebral biopsies: a prospective cross-sectional human in vivo study[J]. J Orthop Surg Res, 2020, 15(1):398. doi:10.1186/s13018-020-01895-0.

[41] Ibrahim N, Parsa A, Hassan B, et al. Comparison of anterior and posterior trabecular bone microstructure of human mandible using cone-beam CT and micro CT[J]. BMC Oral Health, 2021, 21(1):249. doi:10.1186/s12903-021-01595-z.

[42] Huang H, Chen D, Lippuner K, et al. Human bone typing using quantitative cone-beam computed tomography[J]. Int Dent J, 2023, 73(2):259-266. doi:10.1016/j.identj.2022.08.011.

[43] Guha I, Zhang X, Rajapakse CS, et al. Finite element analysis of trabecular bone microstructure using CT imaging and continuum mechanical modeling[J]. Med Phys, 2022, 49(6):3886-3899. doi:10.1002/mp.15629.

[44] Acar B, Köse Ö, Turan A, et al. Single versus double screw fixation for the treatment of scaphoid waist fractures: finite element analysis and preliminary clinical results in scaphoid nonunion[J]. Jt Dis Relat Surg, 2020, 31(1):73-80. doi:10.5606/ehc.2020.71521.

[45] Franceskide SC, Gibson M, Zioupos P. Evaluation of bone excision effects on a human skull model-Ⅱ: finite element analysis[J]. Proc Inst Mech Eng H, 2020, 234(4):346-355. doi:10.1177/0954411919892799.

[46] Campbell GM, Glüer CC. Skeletal assessment with finite element analysis: relevance, pitfalls and interpretation[J]. Curr Opin Rheumatol, 2017, 29(4):402-409. doi:10.1097/BOR.0000000000000405.