

苏丹阳, 马渊博, 刘金龙, 等. 双能量 CT 成像在动物骨修复评估中的应用价值 [J]. 中国比较医学杂志, 2025, 35(1): 155-162.

Su DY, Ma YB, Liu JL, et al. Application of dual-energy computed tomography imaging for evaluation of bone repair [J]. Chin J Comp Med, 2025, 35(1): 155-162.

doi: 10.3969/j.issn.1671-7856.2025.01.016

# 双能量 CT 成像在动物骨修复评估中的应用价值

苏丹阳<sup>1</sup>, 马渊博<sup>1</sup>, 刘金龙<sup>1</sup>, 张浩然<sup>1</sup>, 杨慎宇<sup>2</sup>, 苗秋菊<sup>3</sup>, 白臻<sup>3</sup>, 杨晓鹏<sup>3\*</sup>

(1. 郑州大学第一附属医院放射科, 郑州 450000; 2. 郑州大学第一附属医院 3D 打印中心, 郑州 450000;  
3. 郑州大学第一附属医院医学装备部, 郑州 450000)

**【摘要】** 骨缺损修复是骨科领域亟待解决的难题, 众多研究者致力于探索更为高效的治疗策略。然而, 术后精准的骨修复效果评估也是一个重要环节。随着计算机断层扫描 (computed tomography, CT) 成像的发展, 双能量 CT 成像在分析骨组织成分以及减少金属伪影方面展现出显著优势。本文就双能量 CT 成像在动物骨修复评估中的应用价值进行综述。

**【关键词】** 双能量 CT; 骨修复; 物质分离; 金属伪影

**【中图分类号】** R-33 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1671-7856 (2025) 01-0155-08

## Application of dual-energy computed tomography imaging for evaluation of bone repair

SU Danyang<sup>1</sup>, MA Yuanbo<sup>1</sup>, LIU Jinlong<sup>1</sup>, ZHANG Haoran<sup>1</sup>, YANG Shenyu<sup>2</sup>, MIAO Qiuju<sup>3</sup>, BAI Zhen<sup>3</sup>,  
YANG Xiaopeng<sup>3\*</sup>

(1. Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China.  
2. 3D Printing Center of the First Affiliated Hospital of Zhengzhou University, Zhengzhou 450000. 3. Department of  
Medical Equipment, the First Affiliated Hospital of Zhengzhou University, Zhengzhou 450000)

**【Abstract】** Bone defect repair is an urgent problem in the field of orthopedics, and numerous researchers are working to develop more effective treatment plans. The accurate evaluation of bone repair after surgery is a crucial step. In line with the development of computed tomography (CT) imaging, dual-energy CT imaging has shown significant advantages in analyzing bone composition and reducing metal artifacts. This article reviews the application of dual-energy CT imaging for the evaluation of bone repair in animals.

**【Keywords】** dual-energy CT; bone repair; material decomposition; metal artifacts

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

[基金项目] 河南省医学科技攻关计划项目 (SBGJ202102089)。

[作者简介] 苏丹阳 (1999—), 女, 在读硕士研究生, 研究方向: 骨修复影像评估。E-mail: s839671366@163.com

[通信作者] 杨晓鹏 (1975—), 男, 博士, 高级工程师, 教授, 硕士生导师, 研究方向: 影像和骨组织工程。

E-mail: 13837141925@163.com

骨缺损通常是指由感染、创伤、肿瘤、炎症、骨质疏松等导致的骨结构完整性被破坏的状况, 这些原因可能单独或共同作用, 导致骨质损失。较小的骨缺损有时可以通过身体的自然修复机制促进愈合, 但骨缺损过大超出了身体自然修复能力的范围时难以自行愈合<sup>[1-4]</sup>。常见的骨缺损的治疗方法包括自体骨移植、异体骨移植以及人工骨修复材料。自体骨移植虽然是治疗骨缺损的金标准, 但这种方法也存在对动物造成二次伤害的危险。异体骨移植由于存在免疫排斥和病毒传播的风险, 其应用受到限制。随着骨组织工程的发展, 为骨缺损的修复提供了诸多可能。人工骨修复材料作为骨组织再生的替代选择应运而生, 尤其是各种合成高分子聚合物以及复合材料, 在骨修复治疗应用研究中日益广泛<sup>[5-7]</sup>。众多研究者从多方面、多角度开展动物骨修复的相关研究, 以期最大程度促进骨组织的再生和修复<sup>[8-11]</sup>。但骨修复是一个复杂、多阶段的过程, 因此, 在追求精准有效治疗的同时, 寻找一种非侵袭性且快速精准的术后评估方法对于判断动物骨修复的疗效具有至关重要的意义。

影像学检查方法逐渐成为骨缺损修复评估的重要手段, 包括 X 线、超声、磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI)、核医学检查、显微计算机断层扫描 (micro computed tomography, Micro-CT) 和计算机断层扫描 (computed tomography, CT) 等。CT 检查因扫描速度快、图像采集时间短、高空间分辨率以及可横断面显像等而成为骨修复常用的影像学检查方法<sup>[12-13]</sup>。而且随着 CT 设备及技术的更新发展, 双能量 CT 利用不同物质在不同 X 射线能量下的差异化吸收特性, 扩展了常规 CT 的功能界限, 为医疗诊断提供更丰富的信息和参数<sup>[14-15]</sup>。本文结合常见的影像学评估方法, 就双能量 CT 成像及其在动物骨修复方面的应用价值综述如下。

## 1 动物骨修复常见的影像学评估方法

### 1.1 X 线评估

X 线操作简单、检查成本低, 在骨科应用广泛<sup>[16]</sup>。起初多数学者使用 X 线进行骨缺损修复的二维观察, 有助于明确骨缺损的位置、大小、形状以及与周围组织的关系, 为判断受检部位的恢

复情况提供重要的参考依据。QIN 等<sup>[17]</sup>研究发现, X 线照片能显示新西兰兔自体移植牙与正常骨组织在不同骨缺损修复阶段的透光性变化。姚彪等<sup>[18]</sup>通过 X 线及评分发现  $\alpha$ -半水硫酸钙/双相生物陶瓷复合材料促进兔桡骨骨修复的效果优于两种单独的材料。阳懿等<sup>[19]</sup>应用 X 线并结合图像分析软件发现生物源性骨粉修复新西兰兔骨缺损效果优于无机源性骨粉。牛恒立等<sup>[20]</sup>应用 X 线及其评分发现接受接骨丹治疗的大鼠较未接受接骨丹治疗的大鼠骨缺损区域明显减小。然而, X 线因其平面成像的特性, 无法精确显示细微的骨结构变化。此外, X 线检查多依赖于主观评估, 导致其在定量化评估, 特别是骨修复早期阶段的效果评估上价值受限。因此, X 线检查虽然在骨缺损修复评估中具有一定的优势, 但早期诊断骨缺损通常需要结合其他影像学检查方法以提高诊断的准确性。

### 1.2 超声评估

超声检查凭借其无辐射、无创伤、测量快速方便等优点在医学领域受到广泛应用<sup>[21]</sup>。在骨修复评估中, PROTOPAPPAS 等<sup>[22]</sup>提出了通过超声导波头波速检测骨愈合的创新方法, XU 等<sup>[23]</sup>研究也表明超声导波具有评价骨愈合的能力, 而且不同模态导波参数对骨愈合组织的力学性质和骨折结构的敏感性存在差异。尽管超声技术在骨愈合评估中展现出潜力, 但目前相关检测技术仍处于机理探索阶段, 而且超声也存在对骨质穿透能力有限、对操作者依赖性大等不足。因此, 在进一步的研究和应用中, 需要不断优化超声检测技术, 提高其在骨修复评估中的准确性和可靠性。

### 1.3 MRI 评估

MRI 检查无电离辐射, 具备卓越的图像分辨率和出色的组织对比度, 有望在骨生长初期阶段提供更详细的图像信息<sup>[24]</sup>。WASHBURN 等<sup>[25]</sup>发现磁共振显微镜 (magnetic resonance microscopy, MRM) 测得的弛豫时间和 Micro-CT 测量的矿物质浓度呈反比关系, 这一发现为评估多孔聚甲基丙烯酸乙酯支架的新生骨形成提供了新视角。HARTMAN 等<sup>[26]</sup>通过 MRI 来评估大鼠骨骼的生长和发育, 揭示了 MRI 相比传统 X 线在检测骨形成方面的早期性和敏感性。然而, MRI 价

格相对昂贵,成像时间长以及对特定植入材料有限制,使其在骨修复评估中的应用受到一定的限制。

#### 1.4 核医学评估

核医学包括正电子发射断层显像(positron emission tomography, PET)和单光子发射计算机断层显像(single photon emission computed tomography, SPECT),已成为评估显像靶点功能的有力诊断工具<sup>[27]</sup>。LIN 等<sup>[28]</sup>通过 PET/CT 分析发现,与短暂表达骨形态发生蛋白 2(bone morphogenetic protein-2, BMP-2)/血管内皮生长因子(vascular endothelial growth factor, VEGF)的骨髓间充质干细胞(bone marrow-derived mesenchymal stem cells, BMSCs)移植组相比,持续表达移植组在颅骨缺损的再生方面展现出了显著的改善。VAN DE WATERING 等<sup>[29]</sup>通过 SPECT 成像观察生长因子从聚合物支架的释放动力学评估不同 BMP-2 加载方法在大鼠身上产生的骨诱导能力。虽然核医学在评估骨修复方面具有独特的优势,但其也存在潜在的辐射危害、相对较高的成本、操作过程的复杂性以及评估标准的非一致性等问题。这些挑战需要大家在未来的研究和应用中加以克服,以更好地发挥核医学在骨修复评估中的潜力。

#### 1.5 Micro-CT 评估

Micro-CT 具备极高的分辨率使其在动物骨修复评估方面能够提供多样性、科学性和可靠性的影像数据,已经成为动物实验中必不可少的无创性工具之一<sup>[30-33]</sup>。研究者们通过 Micro-CT 精确测量不同时间点和不同实验条件下的组织体积(tissue volume, TV)、骨体积(bone volume, BV)、骨体积分数(bone volume fraction, BV/TV)、组织矿物密度(tissue mineral density, TMD)、骨矿物密度(bone mineral density, BMD)等关键参数,从而实现了骨缺损修复的量化评估<sup>[34-35]</sup>。研究进一步发现 Micro-CT 与组织学切片之间具有良好的相关性,这使得其成为实验室三维评估骨缺损修复的有效替代方法<sup>[36-37]</sup>。例如,ÖZER 等<sup>[38]</sup>借助 Micro-CT 技术评价利塞膦酸盐对颅骨骨缺失的治疗作用,发现利塞膦酸盐可进一步促进骨修复。这些研究表明 Micro-CT 技术可辅助完成动物骨修复模型的数据检测和监测,对临床前研究具有重要意义。然而,扫描分辨率的提高

相应的伴随着扫描时间的增长和辐射剂量的提高,极大地限制了 Micro-CT 的广泛应用。因此,如何在保证成像质量的同时,降低扫描时间和辐射剂量,是未来 Micro-CT 技术发展中需要解决的重要问题。

#### 1.6 CT 评估

CT 可以在保证低辐射剂量和短扫描时间的前提下实现快速的横断面成像,为观察和监控骨缺损修复的连续过程提供了一种潜在且高效的选择<sup>[12,35]</sup>。耿海霞等<sup>[39]</sup>通过 CT 三维重建观察分析发现羟基磷灰石/凝胶新型复合物在兔颅骨缺损中取得了较好的修复效果。BISSINGER 等<sup>[35]</sup>发现多排探测器 CT(multirow detector CT, MDCT)在评估小鼠下颌角骨缺损修复中的骨矿物含量时,其准确性与 Micro-CT 一致。CHENG 等<sup>[40]</sup>研究发现常规 CT 对同一密度的纯物质进行测量时所得到的 CT 值差异较大,这限制了其在评估 BMD 方面的应用。这一局限性主要源于常规 CT 所采用的混合能量的 X 射线,对骨组织的定量分析价值有限。相比之下,双能量 CT 凭借其独特的后处理技术,能够提供比常规 CT 更加精确的测量结果<sup>[41]</sup>。通过应用双能量 CT 的后处理技术可以在保持常规 CT 快速、重复以及不损伤动物或者其标本的基础上,更准确地反映骨组织中实际物质的含量,对骨修复术后的复查具有重要价值。

本综述系统地梳理并呈现了常见影像学方法在动物骨修复评估中的优势和不足,见表 1。

## 2 双能量 CT 成像

### 2.1 成像原理

双能量 CT 的成像原理概括如下:当 X 射线通过物质时,两者会发生相互作用导致 X 射线能量衰减,衰减程度与 X 射线的能量与物质密度有确定的函数关系。不同的物质对 X 射线的吸收和衰减特性各不相同,这为通过双能量 CT 区分不同的组织类型提供了基础。最重要的是,双能量 CT 技术基于一个核心原理:即任何一种特定组织的 X 射线吸收效应,都可以通过选择两种特定的基物质对(如碘和水)并按照一定比例进行组合来等效表示。这种等效表示方法取决于所研究的对象<sup>[42]</sup>。

表 1 动物骨修复常见的影像学评估方法的优点和缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of traditional imaging evaluation methods for animal bone repair

检查方法 Examination method	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
X 线 X-rays	操作简便;价格低廉;骨性结构成像清晰 Easy operation;Low price; Clear imaging of the bone structure	细微结构显示不清;主观判断差异 Fine structures not clearly depicted;Variability in subjective judgment
超声 Ultrasound	无电离辐射;价格低廉;测量快速方便 No ionizing radiation;Low price; Quick and easy measurement	穿透力有限;骨性结构显示有限 Limited penetration;Limited bony structures were shown
磁共振成像 MRI	无电离辐射;软组织分辨率高;功能性成像 No ionizing radiation;High soft tissue resolution; Functional imaging	扫描时间长;成本高;植入物评估受限 Long scan times;High costs; Limited evaluation of implants
核医学 Nuclear medicine	高灵敏度;高特异性;定量分析 High sensitivity;High specificity; Quantitative analysis	成本高;技术复杂;评估标准不一致 High costs;Complex technology; Inconsistent assessment criteria
显微计算机断层扫描 Cicro-CT	高分辨率;精确的定量分析;三维重建 High resolution;Precise quantitative analysis; Three dimensional reconstruction	样本尺寸受限;扫描时间长;辐射剂量高 Limitations in sample size;Prolonged scan times; High radiation doses
计算机断层扫描 CT	高分辨率;三维重建;双能量 CT 的应用 High resolution;3D reconstruction; Use of dual-energy CT technology	软组织对比度有限;金属伪影干扰;精确度受限 Limited soft tissue contrast; Interference from metal artifacts; Limited accuracy

## 2.2 成像类型

目前双能量 CT 主要有以下 3 种类型:一是通过单球管高低双能瞬时 kVp 切换来获得双能量成像数据的 CT(GE 医疗);二是在扫描时通过表层收集低能数据,深层收集高能数据的双层探测器 CT(飞利浦医疗);三是配备有两套 X 射线球管和两个相应匹配探测器的可产生高低能量的双源 CT(西门子医疗)。这 3 种技术通过不同的扫描方式和物理学原理均能同时或者几乎同时获取高低能数据集<sup>[14]</sup>。

## 2.3 主要技术

双能量 CT 成像主要技术包含物质分离、虚拟单能量图像、能谱曲线以及有效原子序数等。物质分离假设整个体素以两种或多种预选的材料以不同的比例组成,常见的基物质对包括碘(水)、钙(水)、羟基磷灰石(水)等<sup>[14]</sup>。在应用过程中可根据研究对象选择合适的基物质对,彩色编码图像相比于灰度图像可进一步增加不同密度间的可辨别性。虚拟单能量图像是通过双能量扫描后虚拟计算出某一物质在各个单能量下的 CT 值生成的图像<sup>[43]</sup>。这一技术能够有效解决常规 CT 扫描中常见的硬化伪影和金属伪影问

题,显著提升图像质量。在实际应用中,虚拟单能量图像常与去金属伪影技术相结合以进一步提高图像清晰度和诊断准确性。能谱曲线是采集感兴趣区(region of interest, ROI)内的物质或者结构在不同单能量下的 CT 值连接而成的曲线,用于反映物质的能量衰减特性。有效原子序数通常用于反映 ROI 内无机物的原子序数以及确定其性质的指标,它能够帮助确定无机物的性质,是双能量 CT 在能谱分析中精确分析无机物的一种重要方法。近年来,逐渐有学者使用双能 CT 开展骨修复的评估。

## 3 双能量 CT 成像在动物骨修复评估中的应用

### 3.1 物质分离技术

物质分离技术假设整个体素都以两种或多种预选的材料以不同的比例组成<sup>[14]</sup>。研究者常利用双能 CT 物质分离技术中的基物质对进行 BMD 的评估,特别是钙(水)、羟基磷灰石(水)基物质对,这些基物质对的测量值与定量 CT 的测量结果展现出良好的相关性<sup>[44]</sup>。基于此, SU 等<sup>[45]</sup>使用双能量 CT 的物质分离技术中的钙(水)、羟基磷灰石(水)基物质对定量评估骨缺损

修复,发现钙(水)、羟基磷灰石(水)密度值与 Micro-CT 测量的密度值有较高的相关性,这意味着使用双能量 CT 定量评估骨缺损修复具备应用价值。WAN 等<sup>[46]</sup>首次利用双能量 CT 技术实现了对兔骨缺损模型中干细胞的无创、实时地追踪。观察结果显示,经过金纳米颗粒标记的干细胞明显地向骨皮质缺损部位迁移,这一发现充分证明了双能量 CT 在骨缺损修复过程中进行体内示踪的可行性和有效性,为科学界提供了一种新颖且直观的方法来观察和研究骨缺损修复过程。此外,双能量 CT 具有校准脂肪的优势,能够有效地消除这种影响,使得测量结果更加精确可靠<sup>[47-48]</sup>。而且扫描参数的优化有助于进一步提高双能量 CT 物质分离技术的测量结果的准确性<sup>[49]</sup>。未来,随着对双能量 CT 物质分离技术的深入了解、广泛应用以及不断发展完善,无疑将极大地推动骨缺损修复领域的研究进展,对于动物骨修复的术后精准评估以判断最优的骨修复方案具有积极意义。

### 3.2 虚拟单能量图像

虚拟单能量图像等同于实现了不同物质在单色 X 线源的情况下获得的图像,具有更高的图像质量、信噪比(signal to noise ratio, SNR)及对比噪声比(contrast noise ratio, CNR),可以解决常规 CT 出现的硬化伪影和金属伪影等问题<sup>[50-52]</sup>。MUSSMANN 等<sup>[12]</sup>使用双能 CT 对新鲜冷冻的猪股骨头样本的髓关节金属植入物进行扫描发现,随着 keV 水平的增加,扫描平面金属对周围骨组织测量值的影响更小,这表明较高 keV 的虚拟单能量图像能更有效地减少金属伪影。此外,相比于双能 CT 的虚拟单能量图像,去金属伪影技术结合虚拟单能量图像在猪股骨标本金属植入物显示了更好的去金属伪影的效果<sup>[53]</sup>。这意味着当去金属伪影技术与不同虚拟单能级图像相结合时,能进一步改善金属植入物产生的伪影,进而更加精准地揭示金属植入物附近的解剖细节,极大提升图像的整体质量,对于精确诊断和持续跟踪金属植入物术后的疗效具有举足轻重的价值<sup>[53-55]</sup>。因此,双能量 CT 所生成的虚拟单能量图像,在结合去金属伪影技术后,为动物骨修复术后植入物及其周边组织的细致评估提供了强有力的支持。它能够清晰呈现骨修复区域及周

围组织的解剖结构,提供可靠的诊断依据,进一步辅助治疗决策的制定。

## 4 结语

综上所述,双能量 CT 作为 CT 成像的新兴领域,通过结合多种后处理技术,显著提高了测量结果的准确性,在骨缺损修复的早期定位、定性提供了强有力的支持。双能量 CT 的应用不仅弥补了侵入性测量方法的不足,还有助于节省实验动物的数量和成本,简化实验流程,对探索最佳或新的骨修复材料应用于不同骨缺损部位并进行观察具有积极意义。目前,双能量 CT 还在不断研发和完善中,随着扫描参数的持续优化,未来的双能量 CT 将能够借助更为精准的后处理技术,更全面地评估各种骨缺损修复材料在动物骨修复中的效果,为骨缺损治疗提供更精确、更有力的支持。与此同时,光子计数 CT 作为新兴技术代表,其超高清成像优势显著提升了骨细节以及骨骼病变的显示,在精准评估骨缺损修复材料于动物骨修复中的效果方面具备潜在价值。双能量 CT 侧重于利用后处理技术在骨缺损修复的综合评估方面发挥重要作用;而光子计数 CT 则以超高清成像为核心竞争力,在骨骼的精细显示方面展现出卓越潜力。二者定位不同,价值各异,应在实际应用中根据具体需求进行选择。

### 参考文献:

- [1] SALHOTRA A, SHAH H N, LEVI B, et al. Mechanisms of bone development and repair [J]. *Nat Rev Mol Cell Biol*, 2020, 21(11): 696-711.
- [2] ZHANG J, JIA J, KIM J P, et al. Ionic colloidal molding as a biomimetic scaffolding strategy for uniform bone tissue regeneration. [EB/OL]. [2017-02-21]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/adma.201605546>.
- [3] 汤译博, 赵亮, 苏佳灿. 骨折动物模型的研究进展 [J]. *中国骨伤*, 2011, 24(1): 91-93.  
TANG Y B, ZHAO L, SU J C. Research progress of animal model of fracture [J]. *China J Orthop Traumatol*, 2011, 24(1): 91-93.
- [4] 姚广源, 董平, 吴昊, 等. 长骨骨折动物模型的研究进展 [J]. *实验动物与比较医学*, 2024, 44(3): 289-296.  
YAO G Y, DONG P, WU H, et al. Research progress on animal models of long bone fracture [J]. *Lab Anim Comp Med*, 2024, 44(3): 289-296.

- [ 5 ] KLAR R M, COX J C, HOUCHEM C J, et al. The induction of bone formation by 3D-printed PLGA microsphere scaffolds in a calvarial orthotopic mouse model; a pilot study [ J ]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2024, 12: 1425469.
- [ 6 ] BALDWIN P, LI D J, AUSTON D A, et al. Autograft, allograft, and bone graft substitutes; clinical evidence and indications for use in the setting of orthopaedic trauma surgery [ J ]. *J Orthop Trauma*, 2019, 33(4): 203-213.
- [ 7 ] 朱力鸣, 焦昆, 刘伟, 等. 新型同种异体骨修复骨缺损动物实验研究 [ J ]. *实验动物科学*, 2023, 40(6): 73-77.  
ZHU L M, JIAO K, LIU W, et al. Experimental study on the repair of bone defect with a new type of allogeneic bone [ J ]. *Lab Anim Sci*, 2023, 40(6): 73-77.
- [ 8 ] 郭瑛, 吴维敏, 张力军, 等. 一种羊椎体骨缺损动物模型的改良及应用效果观察 [ J ]. *实验动物科学*, 2018, 35(5): 24-29.  
GUO Y, WU W M, ZHANG L J, et al. The effect of an improved sheep vertebral bone defect model for bioactive vertebral augmentation materials [ J ]. *Lab Anim Sci*, 2018, 35(5): 24-29.
- [ 9 ] 吴西, 王中琪, 宋慕格, 等. 外泌体对骨组织细胞的影响及应用的研究进展 [ J ]. *中国比较医学杂志*, 2023, 33(6): 108-113.  
WU X, WANG Z Q, SONG M G, et al. Research progress on the effect of exosomes on bone histocytes and its application [ J ]. *Chin J Comp Med*, 2023, 33(6): 108-113.
- [ 10 ] YANG X, GAO J, YANG S, et al. Pore size-mediated macrophage M1 to M2 transition affects osseointegration of 3D-printed PEEK scaffolds [ J ]. *Int J Bioprint*, 2023, 9(5): 755.
- [ 11 ] WANG Y, WANG Z, YU X, et al. 3D-Printing of succulent plant-like scaffolds with beneficial cell microenvironments for bone regeneration [ J ]. *J Mater Chem B*, 2023, 11(24): 5523-5536.
- [ 12 ] MUSSMANN B, OVERGAARD S, TORFING T, et al. Agreement and precision of periprosthetic bone density measurements in micro-CT, single and dual energy CT [ J ]. *J Orthop Res*, 2017, 35(7): 1470-1477.
- [ 13 ] MCCOLLOUGH C H, RAJIAH P S. Milestones in CT: past, present, and future [ J ]. *Radiology*, 2023, 309(1): e230803.
- [ 14 ] MCCOLLOUGH C H, LENG S, YU L, et al. Dual- and multi-energy CT: principles, technical approaches, and clinical applications [ J ]. *Radiology*, 2015, 276(3): 637-653.
- [ 15 ] GREFFIER J, VILLANI N, DEFEZ D, et al. Spectral CT imaging: Technical principles of dual-energy CT and multi-energy photon-counting CT [ J ]. *Diagn Interv Imaging*, 2023, 104(4): 167-177.
- [ 16 ] 阎晓斌, 刘伟, 吕杰. X 线检查临床应用的研究 [ J ]. *医学信息*, 2019, 32(17): 50-52.  
YAN X B, LIU W, LYU J. X-ray examination clinical application research [ J ]. *Med Inf*, 2019, 32(17): 50-52.
- [ 17 ] QIN X, RAJ R M, LIAO X F, et al. Using rigidly fixed autogenous tooth graft to repair bone defect; an animal model [ J ]. *Dent Traumatol*, 2014, 30(5): 380-384.
- [ 18 ] 姚彪, 钱卫庆, 尹宏. 新型  $\alpha$ -半水硫酸钙/双相生物陶瓷人工骨修复兔桡骨骨缺损的 X 射线评估 [ J ]. *中国组织工程研究*, 2014, 18(47): 7550-7555.  
YAO B, QIAN W Q, YI H. X-ray evaluation of alpha-calcium sulfate hemihydrate/biphasic bioceramics bone for repairing bone defects of rabbit radius [ J ]. *Chin J Tissue Eng Res*, 2014, 18(47): 7550-7555.
- [ 19 ] 阳懿, 赵承初, 马征, 等. 两种骨修复材料修复兔颅骨骨缺损: X 射线评估效果 [ J ]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2010, 14(34): 6283-6286.  
YANG Y, ZHAO C C, MA Z, et al. Two kinds of bone materials for repairing rabbit calvarial bone defects: X-ray assessment [ J ]. *J Clin Rehabil Tissue Eng Res*, 2010, 14(34): 6283-6286.
- [ 20 ] 牛恒立, 赵国彪, 马中兴, 等. 接骨丹对大鼠骨缺损愈合疗效的影像学研究 [ J ]. *西部中医药*, 2016, 29(5): 124-126.  
NIU H L, ZHAO G B, MA Z X, et al. Imaging study on curative effects of JieGu pills in healing the rats with bone defect [ J ]. *West J Tradit Chin Med*, 2016, 29(5): 124-126.
- [ 21 ] 赵泽庆, 潘慧, 张莉, 等. 超声评估骨龄研究现状及临床应用前景 [ J ]. *协和医学杂志*, 2024, 15(2): 400-405.  
ZHAO Z Q, PAN H, ZHANG L, et al. Research status and application prospect of bone age assessment by ultrasonography [ J ]. *Med J Peking Union Med Coll Hosp*, 2024, 15(2): 400-405.
- [ 22 ] PROTOPAPPAS V C, VAVVA M G, FOTIADIS D I, et al. Ultrasonic monitoring of bone fracture healing [ J ]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2008, 55(6): 1243-1255.
- [ 23 ] XU K, TA D, HE R, et al. Axial transmission method for long bone fracture evaluation by ultrasonic guided waves: simulation, phantom and *in vitro* experiments [ J ]. *Ultrasound Med Biol*, 2014, 40(4): 817-827.
- [ 24 ] XU H, OTHMAN S F, MAGIN R L. Monitoring tissue engineering using magnetic resonance imaging [ J ]. *J Biosci Bioeng*, 2008, 106(6): 515-527.
- [ 25 ] WASHBURN N R, WEIR M, ANDERSON P, et al. Bone formation in polymeric scaffolds evaluated by proton magnetic

- resonance microscopy and X-ray microtomography [J]. *J Biomed Mater Res A*, 2004, 69(4): 738-747.
- [26] HARTMAN E H, PIKEMAAT J A, VEHOFF J W, et al. In vivo magnetic resonance imaging explorative study of ectopic bone formation in the rat [J]. *Tissue Eng*, 2002, 8(6): 1029-1036.
- [27] RAHMIM A, ZAIDI H. PET versus SPECT: strengths, limitations and challenges [J]. *Nucl Med Commun*, 2008, 29(3): 193-207.
- [28] LIN C Y, CHANG Y H, KAO C Y, et al. Augmented healing of critical-size calvarial defects by baculovirus-engineered MSCs that persistently express growth factors [J]. *Biomaterials*, 2012, 33(14): 3682-3692.
- [29] VAN DE WATERING F C, MOLKENBOER-KUENEN J D, BOERMAN O C, et al. Differential loading methods for BMP-2 within injectable calcium phosphate cement [J]. *J Control Release*, 2012, 164(3): 283-290.
- [30] RITMAN E L. Small-animal CT-its difference from, and impact on, clinical CT [J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2007, 580(2): 968-970.
- [31] 李淑楨, 戴文敬, 喻青青, 等. Micro-CT 在实验动物疾病模型中的应用 [J]. *中国实验动物学报*, 2024, 32(5): 676-682.
- LI S Z, DAI W J, YU Q Q, et al. Application of Micro-CT in experimental animal disease models [J]. *Acta Lab Anim Sci Sin*, 2024, 32(5): 676-682.
- [32] KAUR A, MOHAN S, RUNDLE C H. A segmental defect adaptation of the mouse closed femur fracture model for the analysis of severely impaired bone healing [J]. *Anim Model Exp Med*, 2020, 3(2): 130-139.
- [33] TAN J, LABRINIDIS A, WILLIAMS R, et al. Micro-CT-based bone microarchitecture analysis of the murine skull [J]. *Methods Mol Biol*, 2022, 2403: 129-145.
- [34] MORGAN E F, MASON Z D, CHIEN K B, et al. Micro-computed tomography assessment of fracture healing: relationships among callus structure, composition, and mechanical function [J]. *Bone*, 2009, 44(2): 335-344.
- [35] BISSINGER O, KIRSCHKE J S, PROBST F A, et al. Micro-CT vs. whole body multirow detector CT for analysing bone regeneration in an animal model [J]. *PLoS One*, 2016, 11(11): e0166540.
- [36] BECKER K, STAUBER M, SCHWARZ F, et al. Automated 3D-2D registration of X-ray microcomputed tomography with histological sections for dental implants in bone using chamfer matching and simulated annealing [J]. *Comput Med Imag Graph*, 2015, 44: 62-68.
- [37] 孙莲莲, 刘永超, 王志兴. 同步辐射成像比较两种不同骨修复材料修复兔股骨缺损的效果 [J]. *中国组织工程研究*, 2023, 27(21): 3343-3348.
- SUN L L, LIU Y C, WANG Z X. Repair effects of two kinds of bone repair materials on rabbit femoral defects compared using synchrotron-radiation-based micro-computed tomography [J]. *Chin J Tissue Eng Res*, 2023, 27(21): 3343-3348.
- [38] ÖZER T, GULIYEVA V, AKTAS A, et al. Effects of a locally administered risedronate/autogenous bone graft combination on bone healing in a critical-size rabbit defect model [J]. *J Orthop Surg Res*, 2023, 18(1): 88.
- [39] 耿海霞, 郭秀娟, 钱君荣, 等. 羟基磷灰石/凝胶纳米复合物修复兔颅骨缺损的影像学评估 [J]. *中国组织工程研究*, 2014, 18(34): 5413-5417.
- GENG H X, GUO X J, QIAN J R, et al. Imaging evaluation of hydroxyapatite/gel nano-composite in rabbit skull defect repair [J]. *Chin J Tissue Eng Res*, 2014, 18(34): 5413-5417.
- [40] CHENG X, YUAN H, CHENG J, et al. Chinese expert consensus on the diagnosis of osteoporosis by imaging and bone mineral density [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2020, 10(10): 2066-2077.
- [41] WICHMANN J L, BOOZ C, WESARG S, et al. Dual-energy CT-based phantomless *in vivo* three-dimensional bone mineral density assessment of the lumbar spine [J]. *Radiology*, 2014, 271(3): 778-784.
- [42] HAN D, SIEBERS J V, WILLIAMSON J F. A linear, separable two-parameter model for dual energy CT imaging of proton stopping power computation [J]. *Med Phys*, 2016, 43(1): 600.
- [43] PESSIS E, SVERZUT J M, CAMPAGNA R, et al. Reduction of metal artifact with dual-energy CT: virtual monospectral imaging with fast kilovoltage switching and metal artifact reduction software [J]. *Semin Musculoskelet Radiol*, 2015, 19(5): 446-455.
- [44] WANG M, WU Y, ZHOU Y, et al. The new fast kilovoltage-switching dual-energy computed tomography for measuring bone mineral density [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2023, 13(2): 801-811.
- [45] SU D, WU Y, YANG S, et al. Dual-energy computed tomography and micro-computed tomography for assessing bone regeneration in a rabbit Tibia model [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 5967.
- [46] WAN D, CHEN D, LI K, et al. Gold nanoparticles as a potential cellular probe for tracking of stem cells in bone regeneration using dual-energy computed tomography [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, 8(47): 32241-32249.
- [47] BREDELLA M A, DALEY S M, KALRA M K, et al. Marrow adipose tissue quantification of the lumbar spine by using dual-energy CT and single-voxel (1)H MR spectroscopy: a feasibility study [J]. *Radiology*, 2015, 277

- (1): 230-235.
- [48] ARENTSEN L, HANSEN K E, YAGI M, et al. Use of dual-energy computed tomography to measure skeletal-wide marrow composition and cancellous bone mineral density [J]. *J Bone Miner Metab*, 2017, 35(4): 428-436.
- [49] 张源, 高冰, 黄世豪, 等. 优化扫描参数宝石能谱 CT 测量腰椎骨密度临床效果评价 [J]. *中国骨质疏松杂志*, 2021, 27(3): 333-336.
- ZHANG Y, GAO B, HUANG S H, et al. Evaluation of clinical effect of optimized scanning parameters gem energy spectrum CT in the measurement of bone mineral density of the lumbar vertebrae [J]. *Chin J Osteoporos*, 2021, 27(3): 333-336.
- [50] 胡志, 余晓锴, 康立丽, 等. 基于一种体模对 CT 能谱技术的质量检测 [J]. *中国医学物理学杂志*, 2018, 35(1): 54-59.
- HU Z, YU X E, KANG L L, et al. Phantom-based quality testing for spectral computed tomography technology [J]. *Chin J Med Phys*, 2018, 35(1): 54-59.
- [51] ARAN, DAFTARI BESHELI L, KARCAALTINCABA M, et al. Applications of dual-energy CT in emergency radiology [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2014, 202(4): W314-W324.
- [52] HAKVOORT E T, WELLENBERG R H H, STREEKSTRA G J. Quantifying near metal visibility using dual energy computed tomography and iterative metal artifact reduction in a fracture phantom [J]. *Phys Med*, 2020, 69: 9-18.
- [53] 张冉旭. 骨科金属伪影减少算法及虚拟单能量成像技术在 CT 检查中的应用价值研究 [D]. 石家庄: 河北医科大学, 2022.
- ZHAO R X. Application value of orthopedic metal artifact reduction algorithm and virtual monoenergetic image technology in CT examination [D]. SHIJIAZHUANG: Hebei Medical University, 2022.
- [54] 孙彤彤, 黄熙菟, 罗腾龙, 等. 双层探测器光谱 CT 虚拟单能量成像联合去除植入物金属伪影用于减少置换髋关节假体金属伪影 [J]. *中国医学影像技术*, 2023, 39(7): 1084-1088.
- SUN T T, HUANG X K, LUO T L, et al. Virtual monoenergetic image combined with orthopedic metal artifact reduction for reducing metal artifacts of hip prosthesis based on dual-layer detector spectral CT [J]. *Chin J Med Imag Technol*, 2023, 39(7): 1084-1088.
- [55] 朱小忠, 朱自洵, 董馥闻. 宝石能谱 CT 单能量结合 MARs 在去金属伪影中的应用 [J]. *影像研究与医学应用*, 2023, 7(5): 27-29.
- ZHU X Z, ZHU Z T, DONG F W. Application of gemstone energy spectrum CT single energy combined with MARs technique in metal artifact removal [J]. *J Imag Res Med Appl*, 2023, 7(5): 27-29.

[收稿日期]2024-06-17