



CT在全身精细骨质结构成像的研究进展

杨 丽, 汤若薇, 赵鹏飞, 王立莎, 王振常

Advances in Computed Tomography for Whole-body Fine Bone Structure Imaging

YANG Li, TANG Ruowei, ZHAO Pengfei, WANG Lisha, and WANG Zhenchang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2025.062>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地震信号谐波提频技术在辫状河砂体精细识别的应用

Application of Seismic Signal Harmonic Frequency Enhancement Technology for Fine Identification of Braided River Sand Bodies

CT理论与应用研究. 2024, 33(5): 577-584

磨玻璃病灶影像检查技术应用对比的体模研究

Contrast Study on the Application of Imaging Techniques in Detection of Ground Glass Lesion Using Phantom

CT理论与应用研究. 2021, 30(4): 447-454

糖尿病患者肺部新型冠状病毒感染HRCT特点

High-resolution Computed Tomography (HRCT) Characteristics of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) in Patients with Diabetes

CT理论与应用研究. 2023, 32(5): 659-665

基于Transformer增强型U-net的CT图像稀疏重建与伪影抑制

Sparse Reconstruction of Computed Tomography Images with Transformer Enhanced U-net

CT理论与应用研究. 2024, 33(1): 1-12

新型冠状病毒感染不同毒株的CT表现演变与临床转归的相关性分析

Correlation Analysis between Dynamic Changes in Computed Tomography Findings and Clinical Outcomes in Cases Infected with Different Strains of Coronavirus Disease 2019

CT理论与应用研究. 2023, 32(5): 627-635

佛山市成年居民骨密度CT定量研究

Quantitative Computed Tomography Study of Bone Mineral Density for Adults Residents in Foshan

CT理论与应用研究. 2024, 33(2): 213-220



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨丽, 汤若薇, 赵鹏飞, 等. CT 在全身精细骨质结构成像的研究进展 [J]. CT 理论与应用研究 (中英文), 2025, 34(6): 994-1002. DOI:10.15953/j.ctta.2025.062.
YANG L, TANG R W, ZHAO P F, et al. Advances in Computed Tomography for Whole-body Fine Bone Structure Imaging [J]. CT Theory and Applications, 2025, 34(6): 994-1002. DOI:10.15953/j.ctta.2025.062. (in Chinese).

CT 在全身精细骨质结构成像的研究进展

杨丽¹, 汤若薇^{2✉}, 赵鹏飞², 王立莎¹, 王振常^{2✉}

1. 湖北医药学院附属襄阳市第一人民医院放射科, 湖北 襄阳 441000

2. 首都医科大学附属北京友谊医院放射科, 北京 100050

摘要: 计算机断层扫描 (CT) 技术的革新显著提升了扫描效率与空间分辨率, 使得全身精细骨质结构的成像更加清晰。这一进步不仅深化了对疾病病理机制的理解, 也为临床诊断和治疗效果评估提供了更可靠的依据。本文系统综述常规多层螺旋 CT、锥形束 CT、光子计数 CT 及显微 CT 的技术特点, 重点探讨 CT 技术在全身精细骨质结构成像中的最新临床应用及研究进展。

关键词: 计算机断层扫描; 分辨率; 骨质; 精细结构

DOI:10.15953/j.ctta.2025.062 中图分类号: R 814 文献标识码: A

Advances in Computed Tomography for Whole-body Fine Bone Structure Imaging

YANG Li¹, TANG Ruowei^{2✉}, ZHAO Pengfei², WANG Lisha¹, WANG Zhenchang^{2✉}

1. Department of Radiology, Xiangyang First People's Hospital, Hubei Medical College, Xiangyang 441000, China

2. Department of Radiology, Beijing Friendship Hospital, Capital Medical University, Beijing 100050, China

Abstract: Advances in computed tomography (CT) have accelerated scanning speeds and improved the spatial resolution of images. These improvements allow clearer visualization of whole-body fine bone structures, gradually enhancing the understanding of diseases and strengthening confidence in CT-based diagnosis and treatment efficacy evaluation. This review summarizes the clinical applications and research progress of conventional multi-slice spiral CT, cone-beam CT, photon-counting detector CT, and micro-CT in assessing bone quality.

Keywords: computed tomography; resolution; bone; fine structure

计算机断层扫描 (computed tomography, CT) 凭借其高分辨率和快速成像的特点, 已成为临床影像诊断不可或缺的重要工具。然而, 传统 CT 技术分辨尺度有限, 对微小精细结构的显示仍存在局限性, 制约了在骨质微细病理变化评估中的应用。近年来, 随着探测器技术、图像重建算法及能谱成像

的发展, CT 空间分辨率和对比度大幅提升, 为精细骨质结构的可视化提供了新的可能。CT 技术的发展不仅深化了对疾病发生发展机制的理解, 也为临床诊疗决策提供了更精准的影像学依据。

自 1971 年首次应用于临床以来, CT 技术经历了多次革命性突破: 从滑环技术的应用实现连续快

收稿日期: 2025-02-21。

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (基于弱标注下生成对抗网络的超高分辨力 CT 传导聋病因分类模型研究 (82302282)); 首都医科大学附属北京友谊医院友谊“种子计划”人才项目 (传导聋骨性病因智能判读模型研究 (YYZZ202336))。

第一作者: 杨丽, 女, 主治医师, 主要从事头颈部、腹部放射影像诊断等方面的研究, E-mail: 284116394@qq.com。

通信作者: 汤若薇[✉], 女, 副研究员、主治医师, 主要从事耳部及颞下颌关节病变智能诊断研究, E-mail: tangrw@ccmu.edu.cn。

王振常[✉], 男, 主任医师、教授、博士研究生导师, 长期从事生理病理信息探测感知技术及仪器的科学研究, E-mail: cjr.wzhch@vip.163.com。

速扫描,到半导体探测器推动多能谱成像的诞生,直至近年光子计数探测器技术的出现使得物质成分定量分析成为可能。根据成像原理及技术特点,目前 CT 设备主要分为 4 类:多层螺旋 CT (multi-slice spiral CT, MSCT)、锥形束 CT (cone-beam CT, CBCT)、光子计数探测器 CT (photon-counting detector CT, PCD-CT) 和显微 CT (micro-CT)。

本文系统综述上述 4 种 CT 技术在全身精细骨质成像的最新研究进展,重点探讨其临床转化价值。

1 多层螺旋 CT

20 世纪初,MSCT 技术引入我国。经线阵列探测器优化和 X 线发生器焦点设计的改进,其分辨率从最初的毫米级跃升至亚毫米级。得益于扫描速度快、成像范围大以及满足临床需求的图像质量,MSCT 迅速成为全身各部位影像学检查的常规手段。

目前临床大多数使用的 MSCT 分辨尺度为 0.25 ~ 1.0 mm,其高分辨率的三维重建、多平面重组 (multiplanar reconstruction, MPR) 在骨质病变及治疗中受到重视^[1-2],特别是在四肢关节^[3-4]、鼻骨及颌面部等^[5-6]不规则骨显示、隐匿性骨折诊断^[7]、正常解剖结构识别^[8]等方面意义重大,能有效减少漏诊及误诊。

鲁新亮等^[6]提出使用锐利算法的容积再现成像 (volume rendering, VR) 对鼻区线性骨折的诊断效能最佳,能更好地发挥 VR 在辅助诊断中的价值。还有部分学者研究了 MSCT 在颌骨内板增生症等疾病诊断中的应用价值^[9]。代永亮等^[10]提出腰椎 MSCT 容积扫描添加骨密度测量具有诊断骨质疏松的效能。该研究对比腰椎 MSCT 容积扫描与定量 CT,发现反映骨质疏松程度的平均骨密度值、 t 值、 Z 值均差异均无统计学意义,MSCT 测量的平均骨密度值、 T 值与定量 CT 测量结果相关性极高,相关系数分别为 0.975 和 0.973。

中耳乳突手术前评估面神经管与周围结构的距离,对于减少术中面神经损伤风险有重要价值。吴任国等^[11]利用 MPR 技术分别测得面神经管至颈静脉窝、乳突外侧缘、外耳道后壁等解剖标志点的距离,对手术具有重要指导意义。Kang 等^[12]提出 MSCT 能清晰显示单纯性先天性中耳畸形类型,并发现先天性中耳畸形患者面神经管鼓室段至外半规管下缘的距离明显长于对照组,而与卵圆窗上缘的距离明显短于对照组,为术前诊断及面神经管通路评价提供准确依据。

尽管应用较为广泛,但对于全身精细骨质 (颞骨众多结构尺寸小于 0.5 mm,更精细者如镞骨底板厚度 ≤ 0.2 mm^[13]),MSCT 显示仍然有限。为满足临床需求,MSCT 容积扫描薄层重建、高分辨率算法图像重建等技术被用于提供高分辨率 CT (high resolution CT, HRCT) 图像,常用于显示内耳、肺结节等微小结构。

王林等^[14]利用 HRCT 对内耳畸形分类并测量内耳结构数值,构建极重度感音神经性聋患者的列线图预测模型,发现畸形类型、上半规管及外半规管骨岛宽度、耳蜗高度是极重度感音神经性聋发生的独立危险因素。丁贺宇等^[15]利用 HRCT 图像评估面神经管迷路段与耳蜗间的骨壁完整性,发现二者间骨壁裂缺时人工耳蜗开机后可能产生面神经刺激症状,为术前规划和术后并发症评估提供依据。

MSCT 扫描速度快、视野大,具有较高的分辨率,且通过 MPR 等技术,能获取满足临床日常诊断需求的图像。但其薄层高分辨率成像,必然会带来辐射剂量的增长。尽管可通过迭代重建技术、深度学习等降低辐射剂量,但多次重复和大范围扫描时 (如肿瘤随访、外伤等) 可能导致单次检查的辐射剂量较高。对于敏感人群如儿童、孕妇长期或多次检查可能会增加潜在致癌风险。然而过度低剂量扫描易导致图像噪声增高,影响诊断准确性。患者体内金属物、呼吸及胃肠道运动等易造成各种伪影,影响图像观察和结构识别。由于分辨率的限制,当不同密度的组织在同一层面重叠时产生部分容积效应,可能导致细节模糊或误判。尤其在口腔、颌面部等小范围成像中,虽然 MSCT 能够显示解剖结构及其空间关系,但在评估局部微细结构时 (如骨质连续性中断、骨皮质厚度测量),临床应用价值受限。因此,在临床使用过程中,在确保图像质量的同时,要合理调整扫描方案,减少辐射暴露的风险。

2 锥形束 CT

CBCT 采用小焦点 X 线源结合面阵探测器实现三维成像,其空间分辨率可达 70 μ m,在保持较低辐射剂量的同时,特别适用于小范围高精度成像。该技术最早由口腔医学领域引入临床应用,显著推动了口腔颌面影像学的发展,成为了该领域重要的诊断工具。Alshomrani^[16]综述了 CBCT 在颌面部创伤诊断及治疗中的多种应用,包括下颌骨、牙槽骨及其他面部骨折和脱位。鉴于其高空间分辨力、低辐射剂量的双重优势^[17],CBCT 临床应用逐步扩展

到其他领域。

上半规管裂缺 (superior semicircular canal dehiscence, SSCD) 首先由 Minor 等^[18]于 1998 年定义, 临床表现为大声引发的眩晕或眼球震颤、耳鸣和中耳压力变化。Cisneros 等^[19]描述了上半规管顶部的 5 种形态: 正常型 (0.6~1.7mm)、增厚型 (≥1.8mm)、纸状型 (≤0.5mm)、气化型和裂开型。Evlice 等^[20]使用 CBCT 评价土耳其人群上半规管骨质厚度和影像学分型, 提出骨质厚度与年龄和性别无关; Davvaz 等^[21]也得到类似结论。Kurt 等^[22]研究发现 SSCD 发生率约 6.28% (层厚为 1mm), 但低于 Akay 等^[23]的研究结果 (16.5%, 层厚为 0.4mm), 分析发生率可能受层厚影响, 层厚越薄, 分辨力越高, SSCD 发生率越高。

传统 CBCT 缺点在于噪声大、密度分辨率和对比度相对低。2022 年, 首都医科大学附属北京友谊医院王振常院士团队通过软硬件技术的系列创新, 成功研制出世界首台基于 CBCT 的超高分辨力 CT (ultra-high-resolution computed tomography, U-HRCT), 空间分辨率最高达 50μm^[24], 是目前已知人活体 CT 成像的最高分辨尺度。该仪器单次扫描有效剂量是 MSCT 的 1/3^[25] (表 1), 图像噪声较传统 CBCT 显著优化, 被广泛应用于颞骨成像。Tang 等^[13]发现镫骨前后弓、底板、砧镫关节和镫骨肌在 U-HRCT 的图像质量评分显著高于 MSCT,

U-HRCT 还同时提供了镫骨定量数据, 有助于镫骨疾病诊断和个体化手术方案制定。该团队探讨正常前庭神经管精细影像解剖特征^[26], 分析比较不同侧别、性别及分型的前庭上、下神经管指标的差异, 为该区域病变的影像诊断及术前评估提供参考依据。除显示正常结构外, U-HRCT 还可用于疾病诊断及疗效评估。面神经管骨壁裂缺 (facial canal dehiscence, FCD) 是面神经术中损伤的危险因素之一。由于面神经管骨壁较薄, 既往 MSCT 研究仅提出了面神经管骨壁的二元影像分类, 即: 缺乏骨覆盖、连续的骨质覆盖。

基于 U-HRCT 表现, Tang 等^[29]新增不连续性覆盖伴线状缺损、不连续性骨性覆盖伴点状缺损两种类型, 进一步对骨壁量化评分, 总评分 <4 分可识别 FCD, 灵敏度和特异度分别达 82% 和 93%。耳硬化症是累及镫骨底板的病变, 尺寸微小, 常被漏诊。Xu 等^[30]对比 U-HRCT 与 HRCT 诊断单纯性耳硬化症的灵敏度, 发现 U-HRCT 诊断小于 1mm 的病灶时, 灵敏度高于 HRCT (93.3% vs. 40%) (图 1)。人工耳蜗植入术是治疗重度至极重度感音神经性聋的方法, 但可能会诱导炎症、纤维化和新骨形成。Heutink 等^[31]应用 0.09mm 层厚的 U-HRCT 检测人工耳蜗周围新生骨存在及位置, 发现新生骨的形成与电极类型及手术入路之间具有显著相关性。

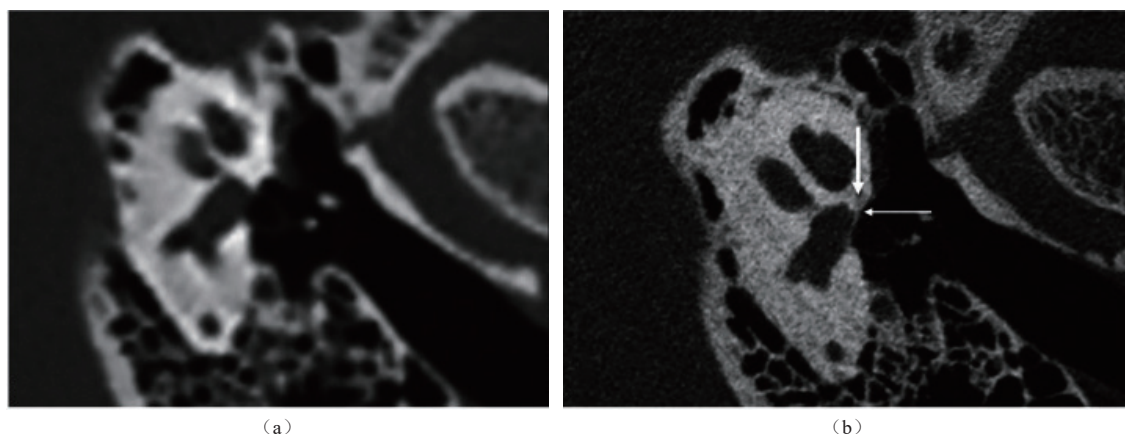
表 1 CT 技术参数对比
Table 1 Scan parameters for CT techniques

技术参数	MSCT	CBCT (U-HRCT)	PCD-CT	micro-CT
成像原理	扇形 X 射线束, 多排探测器旋转扫描 (能量积分探测器)	锥形 X 射线束, 平板探测器旋转扫描 (能量积分探测器)	小焦点 X 线发生器和光子计数探测器, 能谱分离 (光子计数探测器)	微焦点 X 射线源, 高分辨率探测器 (CCD 探测器)
空间分辨率	0.25 ~ 1.0mm	0.05 ~ 0.15mm	0.225 ~ 0.5mm	0.6 ~ 100μm
管电压/kVp	120	100 ~ 110	120	80
管电流/μA	—	—	—	50
有效管电流时间乘积/mAs	310	120	120	—
有效剂量/μSv	252.56	82.99	—	—
平均体积剂量指数/mGy	—	—	9.6	—

注: 技术参数数据部分来文献自 [25]、[27]、[28]; —表示相关文章未标注。

虽然 CBCT 在空间分辨率和辐射剂量低方面有显著优势, 但其临床应用仍存在局限性: 首先, 扫描范围有限, 难以满足全身成像需求。其次, 扫描视野选择具有一定的挑战性, 过小视野可能遗漏关键区域、遗漏病灶, 这就需要操作者经验合适定位及选择合适扫描范围; 过大视野会将不必要的区域

暴露于辐射中。再次, 其高空间分辨率和低剂量扫描模式, 增加了图像噪声, 对细微结构判读带来一定影响; 软组织对比分辨率低, 难以区分肌肉、血管等软组织。同 MSCT 一样, 扫描局部的金属异物, 也会产生伪影, 影响局部结构及病变的观察, 需根据临床需求权衡选择。



注: (a) HRCT 无明显异常, (b) U-HRCT 显示窗前裂密度无明显减低(粗箭), 邻近环状韧带密度增加, 镫骨底板稍厚(细箭)。

图 1 窗型耳硬化症的硬化期典型影像学表现(来自 Xu 等^[30])。

Fig.1 Typical imaging findings of fenestral otosclerosis in the otosclerotic phase (Xu et al.^[30])

3 光子计数探测器 CT

PCD-CT 代表了 CT 成像技术的最新突破性进展, 采用先进的半导体探测器实现 X 射线光子到电子信号的直接转换, 显著提高 X 线光子探测效率, 有效消除电子噪声; 增强碘信号的强度; 采用小焦点 X 线源结合精细探测器数据单元生成具有高空间分辨率的图像, 超高分辨率模式下的探测器像素间距在等中心处为可达 $0.19\text{mm} \times 0.21\text{mm}$ 。特别是 X 线光子被分别计数, 实现了真正意义上的多能谱成像及物质成分定量分析。辐射剂量减低的同时保证了高精度的图像质量^[32]。

得益于更高的空间分辨率及更低的图像噪声, PCD-CT 在骨关节成像上具有较大优势。2021 年, Wehrse 等^[33]首次将 PCD-CT 应用于骨关节成像。与能量积分探测器 CT (energy-integrating detector computed tomography, EID-CT) 相比, PCD-CT 能较早识别乳腺癌骨转移、病灶边缘及内部结构的可视化也得到改善。McCabe 等^[34]建立不同程度腰椎骨质疏松体模, 采用不同扫描及重建模式, 与真实的骨密度 (bone mineral density, BMD) 比, 发现 PCD-CT 较 EID-CT 误差小 (相对百分比误差分别为 $3.3\% \pm 1.5\%$ 、 $7.1\% \pm 2.0\%$); 椎骨骨小梁变化的纹理特征 (对比度、能量、灰度非均匀性、游程非均匀性) 均显示出与真实情况相同的线性趋势, 从而能更准确地表征骨疾病。

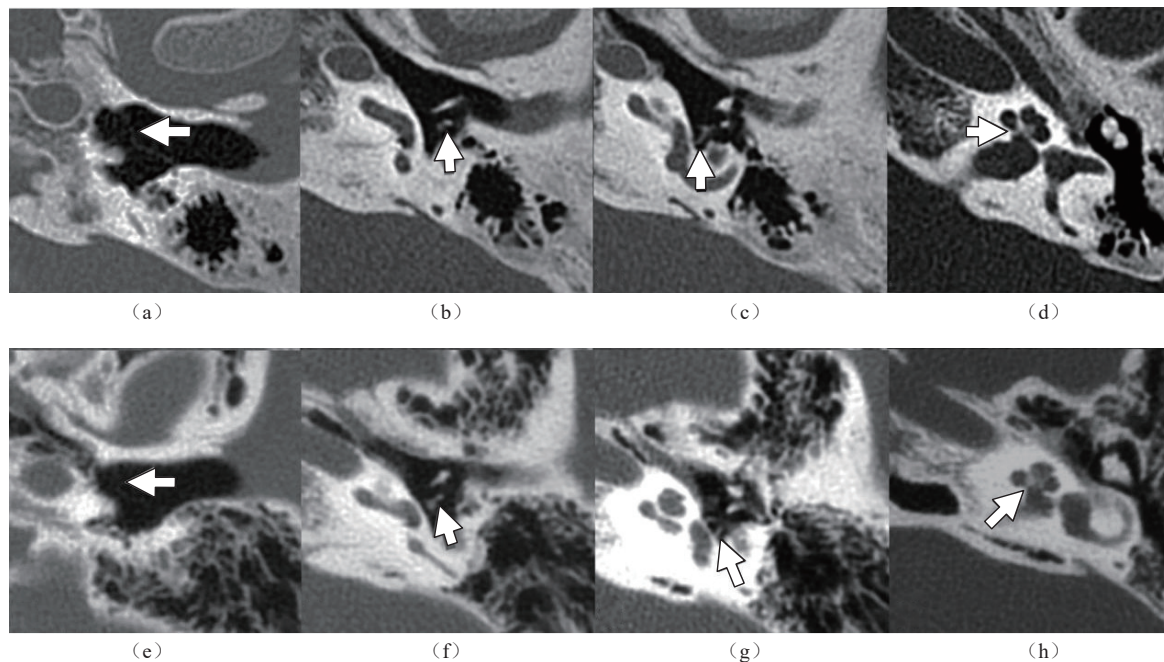
有研究表明, 先进的图像后处理技术使 PCD-CT 图像保持着高对比度。与 EID-CT 系统上可用的标准锐内核 (H70/J70, 用于鼻窦 CT 重建的常规临床内核) 相比, PCD-CT 系统上用于鼻窦重建的专用锐内核 (U80/V80) 显示出更高的空间分辨率,

鼻上颌缝的显示明显得到改善^[35]。Rajendran 等^[27]在腕关节的研究表明, 即使辐射剂量减少 49%, PCD-CT 对腕骨骨皮质和骨小梁的显示率较 EID-CT 仍有提高。另有学者研究了人工智能如卷积神经网络等深度学习技术在 PCD-CT 中应用, 可在不增加辐射剂量的情况下提高图像清晰度^[36-37]。Baffour 等^[38]对比 PCD-CT 和 EID-CT 发现, 2mm 层厚和使用卷积神经网络去噪后的 0.6mm 层厚 PCD-CT 图像, 发现病灶轮廓平均对比度较 EID-CT 分别提高 38% 和 54%。

PCD-CT 具有高光谱灵敏度和物质成分分解能力, 可量化和区分人体不同组织, 例如骨皮质和骨小梁中的钙化成分与骨髓。Bhattarai 等^[39]以 micro-CT 作为定量标准, 发现 PCD-CT 可准确定量体模内钙含量。使用 PCD-CT 显像的实验动物骨钙浓度与 micro-CT 扫描定量的 BMD 显著相关, 并可分析出骨内钙、水含量的差异。PCD-CT 成分分解能力也让软骨在 CT 显示成为可能。Rajendran 等^[40]使用 PCD-CT 关节造影对猪骨关节炎模型中的软骨损伤进行分级, 结果显示 PCD-CT 关节造影不仅保留了传统 CT 关节造影的优势, 还可以提供额外的定量能力, 有助于软骨异质性、关节间隙狭窄及关节积液的评估和分级。

PCD-CT 超快的成像速度、高空间分辨力和低剂量辐射为儿科疾病的影像诊断带来生机。Lee 等^[41]发现 PCD-CT 显示儿童颞骨结构的图像质量评分显著高于 EID-CT (图 2); 与 EID-CT 相比, PCD-CT 辐射剂量减少 43%, 尤其在 6 岁以下儿童亚组中减少 70% 以上。

PCD-CT 具有微米级空间分辨率、零电子噪声、多能量成像与超高定量精度及低剂量辐射的诸多优



注: (a) ~ (d) PCD-CT 图像, 14 岁青少年男孩的左侧颞骨。横断位 CT 图像显示解剖结构, 包括 (a) 鼓膜 (白箭)、(b) 砧镫关节 (白箭)、(c) 镫骨弓 (白箭) 和 (d) 蜗轴 (白箭)。两名阅片人对所有解剖结构和整体图像质量的评分均为 4 分。(e) ~ (h) EID-CT 图像, 13 岁青春期女孩的左侧颞骨。横断位 CT 图像显示解剖结构, 包括 (e) 鼓膜 (白箭)、(f) 砧镫关节 (白箭)、(g) 镫骨弓 (白箭) 和 (h) 蜗轴 (白箭)。两名阅片者对砧镫关节、耳蜗蜗轴和整体图像质量的评分均为 3 分。鼓膜和镫骨弓的评分分别为 2 分和 4 分。

图 2 PCD-CT 与 EID-CT 图像对比 (来自 Lee 等^[41])

Fig.2 Comparison of photon-counting detector computed tomography (PCD-CT) and energy-integrating detector-computed tomography (EID-CT) images (Lee et al.^[41])

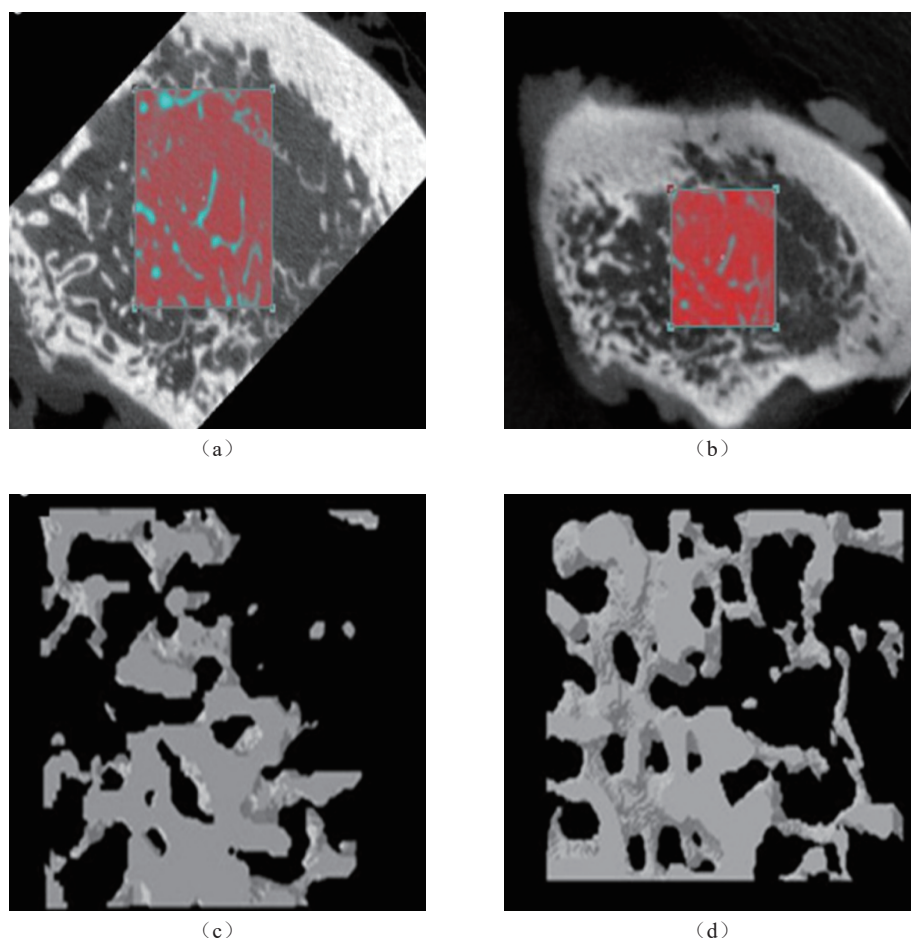
势, 让其在临床应用中具有巨大潜力。但其发展应用仍存在一定的困难: 首先, 还有一些技术难题亟待解决, 如 K-逃逸、电荷共享与脉冲堆积可能会让光子被其他探测器记录或多个探测器单元记录到同一个电子信息, 脉冲间隔较短时出现脉冲信号相互叠加等现象, 这可能会导致图像分辨率减低、图像噪声的增加、能谱成像失真, 而计数率漂移则会产生环状伪影。PCD-CT 使用的半导体探测器, 也增加了成本。其次, 该系统架构复杂, 对操作人员的专业技能要求较高, 临床使用难度增加; 光子计数及能谱成像会产生庞大数据量, 对医疗机构的存储基础设施和数据处理能力提出了严峻挑战。更重要的是, 作为新兴影像技术, PCD-CT 的临床应用经验仍相对不足, 这些因素制约了 PCD-CT 在临床实践中的推广应用。

4 显微 CT

micro-CT 采用微焦点 X 射线源和小型高分辨探测器, 空间分辨率约数十到数微米。刘成磊等^[42]应用同步辐射 micro-CT 相位对比技术, 研究人软骨细微组织结构, 发现同步辐射 micro-CT 相位对比及重建图像可清楚显示软骨细胞、软骨陷窝及排

列方式, 与病理切片高度吻合。Boogert 等^[43]提出, 高分辨率 micro-CT 扫描与四氧化钼增强对比染色和图像处理技术结合, 可实现三维动态可视化、评估内耳显微解剖结构、神经纤维轨迹视觉追踪, 甚至可以从骨迷路中辨别出膜迷路。孙程成等^[44]发现 micro-CT 3D 无损成像可显示豚鼠耳蜗内部精细结构, 空间构成得到充分展示。Ibrahim 等^[45]比较 CBCT 和 micro-CT 下颌骨前后区骨小梁显微结构, 发现 micro-CT 显示的骨小梁厚度在前后区之间存在显著差异, 而 CBCT 显示下颌骨前后区各参数均无显著差异, 提示 micro-CT 在评估两个区域的骨小梁显微结构方面优于 CBCT (图 3)。范峥睿等^[28]利用 micro-CT 研究距骨体内松质骨的具体走行及结构以了解力在骨内传递的机制, 为距骨骨折的复位及假体设计提供理论依据。

目前 micro-CT 主要作为临床前期研究的工具, 被广泛应用于基础医学、药物开发等研究领域。micro-CT 可与组织学、免疫组织化学和蛋白质组学方法相结合, 可作为组织学检查的补充手段。鉴于其微焦点和超高分辨率, micro-CT 多用于较小视野的细微结构观察, 通常仅用于活体小动物或离体标本的扫描; 而且其高分辨率扫描可能会导致扫



注: 匹配和比较 CBCT (a) 和 Micro-CT (b) VOI 中的解剖标志的步骤。分析 CBCT (c) 和 Micro-CT (d) 的松质骨显微结构。

图 3 CBCT 与 micro-CT 对人无牙颌骨小梁显微结构的比较研究 (来自 Ibrahim 等^[45])

Fig.3 Comparison of trabecular bone microstructures of the human edentulous mandible using cone-beam computed tomography (CBCT) and micro-CT (Ibrahim et al.^[45])

描时间较长, 增加辐射剂量, 软组织对比度也不及 MSCT, 难以满足临床成像需求。因此, micro-CT 多作为临床研究的诊断金标准, 验证临床 CT 的研究结果, 尚无法替代临床 CT 用于临床诊断。

5 小结

综上所述, MSCT 扫描速度快、扫描范围大, 结合应用各种重组技术及深度学习等, 能满足大多数临床需求, 从而被广泛应用并迅速推广。CBCT 可用于活体精细解剖结构的观察, 特别是 U-HRCT 在细微结构显示上更胜一筹, 但因扫描视野的限制, 难以满足大范围扫描需求。作为新型成像技术的代表, PCD-CT 不仅能对精细组织结构显示, 且实现了多能谱成像及物质成分分析, 由于其操作复杂性及临床应用经验限制, 目前使用较少, 随着人们认识的加深及经验积累, 未来也会得到广泛应用。micro-CT 多用于临床前期研究, 尚不作为临床 CT

使用。

总之, CT 软硬件技术不断革新使得分辨率不断提升, 全身精细骨质结构的显示也取得重大进展。对精细骨质结构的再认识深刻改变了疾病的诊疗模式, 在微小隐匿骨质病变诊疗中具有巨大的应用价值。不同 CT 技术各有优势, 也存在各自的局限性。根据临床需求有侧重地选择 CT 技术, 并与人工智能融合, 将推动 CT 从解剖成像迈向医工融合的新时代, 未来有望在更大程度上推进医学的进步。

参考文献

- [1] XIN D, LEI L. Diagnostic value of magnetic resonance imaging scan, multislice spiral computed tomography three-dimensional reconstruction combined with plain film X-ray in spinal injuries[J]. Contrast Media & Molecular Imaging, 2022, 2022: 8998231.
- [2] HIRAUMI H, OBARA M, YOSHIOKA K, et al. Detectability of minute temporal bone structures with

- ultra-high resolution CT[J]. *Auris Nasus Larynx*, 2019, 46(6): 830-835. DOI:10.1016/j.anl.2019.03.007.
- [3] 孙广江, 姚啸生, 杨鹤祥. 三维 CT 与 X 线片检查跟骨骨折中的应用价值分析[J]. *CT 理论与应用研究*, 2019, 28(3): 371-376.
- SUN G J, YAO X S, YANG D Y. Analysis of the value of three-dimensional CT and X-ray examination in calcaneal fractures[J]. *CT Theory and Applications*, 2019, 28(3): 371-376. (in Chinese).
- [4] YANG W, WANG F. Multislice spiral computed tomography postprocessing technology in the imaging diagnosis of extremities and joints[J]. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2021, 2021: 9533573.
- [5] GOELZ L, SYPEREK A, HESKE S, et al. Retrospective cohort study of frequency and patterns of orbital injuries on whole-body CT with maxillofacial multi-slice CT[J]. *Tomography*, 2021, 7(3): 373-386. DOI:10.3390/tomography7030033.
- [6] 鲁新亮, 陶建华, 马文涛, 等. 基于不同重建算法的容积再现成像在诊断鼻区线性骨折中的差异研究[J]. *CT 理论与应用研究 (中英文)*, 2024, 33(5): 609-618. DOI:10.15953/j.ctta.2023.212.
- LU X L, TAO J H, MA W T, et al. Differences in volume rendering imaging based on different algorithms in assisting detection of linear fracture of nasal bone area[J]. *CT Theory and Applications*, 2024, 33(5): 609-618. DOI:10.15953/j.ctta.2023.212. (in Chinese).
- [7] 王先泉, 李新华, 刘英. CT 对隐性骨折的诊断价值(英)[J]. *CT 理论与应用研究*, 2000, 9(3): 48-51.
- WANG X Q, LI X H, LIU Y. Diagnosing value of CT in occult fracture[J]. *CT Theory and Applications*, 2000, 9(3): 48-51. (in Chinese).
- [8] 陶建华, 曲晓霞, 张怀宇, 等. 成人鼻骨末端、鼻骨孔、鼻骨其他孔及咬合缝间骨型鼻颌缝的多层螺旋 CT 影像特征: 附 1600 例分析[J]. *中华解剖与临床杂志*, 2022, 27(1): 1-7. DOI:10.3760/cma.j.cn101202-20210428-00118.
- TAO J H, QU X Q, ZHANG H Y, et al. Multi-slice spiral computed tomography of the morphology of the nasal bone end, foramen of nasal bone, accessory foramen of nasal bone, and nasomaxillary suture in 1600 cases[J]. *The Chinese Journal of Anatomy and Clinics*, 2022, 27(1): 1-7. DOI:10.3760/cma.j.cn101202-20210428-00118. (in Chinese).
- [9] 孙凯敏, 李敏, 王伟新, 等. 多层螺旋 CT 和 MRI 在额骨内板增生症诊断中的应用价值[J]. *CT 理论与应用研究*, 2021, 30(5): 645-652. DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.05.13.
- SUN K M, LI M, WANG W X, et al. Application value of multi-detector CT and MRI in the diagnosis of hyperostosis frontalis interna[J]. *CT Theory and Applications*, 2021, 30(5): 645-652. DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.05.13. (in Chinese).
- [10] 代永亮, 赵圆, 刘文亚, 等. 腰椎多层螺旋 CT 容积扫描用于老年女性骨质疏松症的价值及临床意义[J]. *中国骨质疏松杂志*, 2014(5): 495-499, 503. DOI:10.3969/j.issn.1006-7108.2014.05.008.
- DAI Y L, ZHAO Y, LIU W Y, et al. The diagnostic value and clinical significance of multi-detector helical CT volumetric scanning of the lumbar vertebrae in senile women with osteoporosis[J]. *The Chinese Journal of Osteoporosis*, 2014(5): 495-499, 503. DOI:10.3969/j.issn.1006-7108.2014.05.008. (in Chinese).
- [11] 吴任国, 唐秉航, 李良才, 等. 中耳乳突手术相关面神经管解剖的多层螺旋 CT 测量[J]. *中华医学杂志*, 2010, 90(22): 1551-1555. DOI:10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2010.22.011.
- WU R G, TANG B H, LI L C, et al. Measurement of anatomical relationships of facial nerve canal related to middle ear and mastoid surgery on multi-slice computed tomography-multiplanar reformation images[J]. *The Chinese Medical Journal*, 2010, 90(22): 1551-1555. DOI:10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2010.22.011. (in Chinese).
- [12] KANG C, HAN L, ZHAO Y, et al. Multislice spiral computer tomography findings of simple congenital middle ear malformations[J]. *Contrast Media & Molecular Imaging*, 2022, 2022: 7303647.
- [13] TANG R, YIN H, WANG Z, et al. Stapes visualization by ultra-high resolution CT in cadaveric heads: A preliminary study[J]. *European Journal of Radiology*, 2021, 141: 109786. DOI:10.1016/j.ejrad.2021.109786.
- [14] 王林, 夏贵华, 陈旭东. 高分辨率 CT 内耳关键性结构定量测量在先天性极重度感音神经性聋听力评估中的价值[J]. *临床耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2021, 35(10): 880-885.
- WANG L, XIA G H, CHEN X D. The value of quantitative measurement of key structures of inner ear by HRCT in hearing evaluation of patients with congenital severe sensorineural deafness[J]. *Journal of Clinical Otorhinolaryngology Head and Neck Surgery*, 2021, 35(10): 880-885. (in Chinese).
- [15] 丁贺宇, 赵鹏飞, 吕晗, 等. 先天性感音神经性耳聋面神经管迷路段与耳蜗间骨壁的 HRCT 研究[J]. *临床放射学杂志*, 2019, 38(2): 229-232.
- DING H Y, ZHAO P F, LV H, et al. High-resolution CT study on the bony septum between labyrinth segment of facial nerve canal and cochlear in congenital sensorineural hearing loss[J]. *The Journal of Clinical Radiology*, 2019, 38(2): 229-232. (in Chinese).
- [16] ALSHOMRANI F. Cone-beam computed tomography (CBCT)-based diagnosis of dental bone defects[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2024, 14(13): 1404. DOI:10.3390/diagnostics14131404.
- [17] 王振常. 锥形束 CT 在颞骨影像的应用展望[J]. *中华医学杂志*, 2018, 98(23): 1809. DOI:10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2018.23.001.
- WANG Z C. Application prospect of cone-beam CT in

- temporal bone[J]. *The Chinese Medical Journal*, 2018, 98(23): 1809. DOI:10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2018.23.001. (in Chinese).
- [18] MINOR L B, SOLOMON D, ZINREICH J S, et al. Sound- and/or pressure-induced vertigo due to bone dehiscence of the superior semicircular canal[J]. *Archives of Otolaryngology-head & Neck Surgery*, 1998, 124(3): 249-258.
- [19] CISNEROS A I, WHYTE J, MARTINEZ C, et al. Radiological patterns of the bony roof of the superior semicircular canal[J]. *Surgical and Radiologic Anatomy*, 2013, 35(1): 61-65. DOI:10.1007/s00276-012-1019-7.
- [20] EVLICE B, CABUK D S, DUYAN H. The evaluation of superior semicircular canal bone thickness and radiological patterns in relation to age and gender[J]. *Surgical and Radiologic Anatomym*, 2021, 43(11): 1839-1844. DOI:10.1007/s00276-021-02797-4.
- [21] DAVVAZ B, HASANI M, HAGHNEGAHDAR A. Evaluation of superior semicircular canal morphology and its relationship with glenoid fossa roof thickness using cone beam computed tomography[J]. *Radiology Research and Practice*, 2022, 2022: 1565038.
- [22] KURT H, ORHAN K, AKSOY S, et al. Evaluation of the superior semicircular canal morphology using cone beam computed tomography: A possible correlation for temporomandibular joint symptoms[J]. *Oral Surgery Oral Medicine Oral Pathology Oral Radiology*, 2014, 117(3): e280-e288. DOI:10.1016/j.oooo.2014.01.011.
- [23] AKAY G, KARATAS M S, KARADAG O, et al. Examination of the possible relation of the superior semicircular canal morphology with the roof thickness of the glenoid fossa and bone changes of the temporomandibular joint[J]. *European Archives of Oto-rhinolaryngology*, 2020, 277(12): 3423-3430. DOI:10.1007/s00405-020-06063-y.
- [24] 尹红霞, 赵鹏飞, 张康平, 等. 新研制颞骨专用 CT 设备对颞骨精细骨解剖显示能力的实验研究[J]. *中华放射学杂志*, 2020, 54(8): 763-768. DOI:10.3760/cma.j.cn112149-20200320-00427.
- YIN H X, ZHAO P F, ZHANG K P, et al. An experimental study on the ability of newly developed CT equipment for temporal bone to display fine bony anatomy[J]. *The Chinese Journal of Radiology*, 2020, 54(8): 763-768. DOI:10.3760/cma.j.cn112149-20200320-00427. (in Chinese).
- [25] 尹红霞, 陆文凯, 李卫华, 等. 10 μ m 级耳科专用 CT 与多层螺旋 CT 颞骨成像方案优化试验对比分析[J]. *中华医学杂志*, 2021, 101(47): 3890-3896.
- YIN H X, LU W K, LI W H, et al. Experimental comparison of temporal bone imaging protocol optimization between 10 μ m otology CT and multi-slice CT[J]. *The Chinese Medical Journal*, 2021, 101(47): 3890-3896. (in Chinese).
- [26] 汤若薇, 张征宇, 赵鹏飞, 等. 基于 10 μ m 级耳科专用 CT 的前庭神经管影像解剖特征分析[J]. *中华医学杂志*, 2021, 101(47): 3864-3869.
- TANG R W, ZHANG Z Y, ZHAO P F, et al. Analysis of the anatomical features of vestibular nerve canal based on 10 μ m otology CT[J]. *The Chinese Medical Journal*, 2021, 101(47): 3864-3869. (in Chinese).
- [27] RAJENDRAN K, BAFFOUR F, POWELL G, et al. Improved visualization of the wrist at lower radiation dose with photon-counting-detector CT[J]. *Skeletal Radiology*, 2023, 52(1): 23-29. DOI:10.1007/s00256-022-04117-2.
- [28] 范峥睿, 马剑雄, 赵兴文, 等. 基于高分辨 X 线及 micro-CT 的距骨内骨小梁空间结构研究[J]. *中华医学杂志*, 2021, 101(37): 2982-2987. DOI:10.3760/cma.j.cn112137-20210608-01306.
- FAN Z R, MA J X, ZHAO X W, et al. Spatial structure of talus trabeculae based on high resolution X-ray and micro-CT[J]. *The Chinese Medical Journal*, 2021, 101(37): 2982-2987. DOI:10.3760/cma.j.cn112137-20210608-01306. (in Chinese).
- [29] TANG R, ZHANG Z, ZHAO P, et al. A novel imaging scoring method for identifying facial canal dehiscence: An ultra-high-resolution CT study[J]. *European Radiology*, 2023, 33(4): 2830-2839.
- [30] XU N, DING H, TANG R, et al. Comparative study of the sensitivity of ultra-high-resolution CT and high-resolution CT in the diagnosis of isolated fenestral otosclerosis[J]. *Insights Into Imaging*, 2023, 14(1): 211. DOI:10.1186/s13244-023-01562-y.
- [31] HEUTINK F, KLABBERS T M, HUINCK W J, et al. Ultra-high-resolution CT to detect intracochlear new bone formation after cochlear implantation[J]. *Radiology*, 2022, 302(3): 605-612. DOI:10.1148/radiol.211400.
- [32] NAKAMURA Y, HIGAKI T, KONDO S, et al. An introduction to photon-counting detector CT (PCD CT) for radiologists[J]. *Japanese Journal of Radiology*, 2023, 41(3): 266-282.
- [33] WEHRSE E, SAWALL S, KLEIN L, et al. Potential of ultra-high-resolution photon-counting CT of bone metastases: Initial experiences in breast cancer patients[J]. *NPJ Breast Cancer*, 2021, 7(1): 3. DOI:10.1038/s41523-020-00207-3.
- [34] McCABE C, SAUER T J, ZAREI M, et al. A systematic assessment of photon-counting CT for bone mineral density and microarchitecture quantifications[J]. *Proceedings of Spie-the International Society for Optical Engineering*, 2023, 12463.
- [35] RAJENDRAN K, VOSS B A, ZHOU W, et al. Dose reduction for sinus and temporal bone imaging using photon-counting detector CT with an additional tin filter[J]. *Investigative Radiology*, 2020, 55(2): 91-100. DOI:10.1097/RLI.0000000000000614.
- [36] CHANG S, BENSON J C, LANE J I, et al. Ultra-high-resolution photon-counting-detector CT with a dedicat-

- ed denoising convolutional neural network for enhanced temporal bone imaging[J]. *American Journal of Neuroradiology*, 2024.
- [37] HUBER N R, FERRERO A, RAJENDRAN K, et al. Dedicated convolutional neural network for noise reduction in ultra-high-resolution photon-counting detector computed tomography[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2022, 67(17).
- [38] BAFFOUR F I, HUBER N R, FERRERO A, et al. Photon-counting detector CT with deep learning noise reduction to detect multiple myeloma[J]. *Radiology*, 2023, 306(1): 229-236. DOI:10.1148/radiol.220311.
- [39] BHATTARAI A, TANAKA R, YEUNG A, et al. Photon-counting CT material decomposition in bone imaging[J]. *Journal of Imaging*, 2023, 9(10): 209. DOI:10.3390/jimaging9100209.
- [40] RAJENDRAN K, MURTHY N S, FRICK M A, et al. Quantitative knee arthrography in a large animal model of osteoarthritis using photon-counting detector CT[J]. *Investigative Radiology*, 2020, 55(6): 349-356. DOI:10.1097/RLI.0000000000000648.
- [41] LEE J S, KIM J, BAPURAJ J R, et al. Comparison of image quality and radiation dose in pediatric temporal bone CT using photon-counting detector CT and energy-integrating detector CT[J]. *American Journal of Neuroradiology*, 2024, 45(9): 1322-1326. DOI:10.3174/ajnr.A8276.
- [42] 刘成磊, 郝艳, 左后东, 等. 同步辐射显微 CT 的人关节软骨三维成像研究[J]. *CT 理论与应用研究*, 2015, 24(6): 793-799. DOI:10.15953/j.1004-4140.2015.24.06.04.
- LIU C L, XI Y, ZUO H D, et al. Three-dimensional imaging of articular cartilage in human using synchrotron radiation micro-computer tomography[J]. *CT Theory and Applications*, 2015, 24(6): 793-799. DOI:10.15953/j.1004-4140.2015.24.06.04. (in Chinese).
- [43] Van den BOOGERT T, Van HOOFF M, HANDSCHUH S, et al. Optimization of 3D-visualization of micro-anatomical structures of the human inner ear in osmium tetroxide contrast enhanced micro-CT scans[J]. *Frontiers in Neuroanatomy*, 2018, 12: 41. DOI:10.3389/fnana.2018.00041.
- [44] 孙程成, 蒋子栋, 张凯. 豚鼠耳蜗的显微 CT 技术影像学研究[J]. *中华医学杂志*, 2012, 92(48): 3442-3444. DOI:10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2012.48.016.
- SUN C C, JIANG Z D, ZHANG K. micro-CT imaging of guinea pig cochlear[J]. *The Chinese Medical Journal*, 2012, 92(48): 3442-3444. DOI:10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2012.48.016. (in Chinese).
- [45] 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.