

普通CBCT评价上颌窦外提升后新生骨量可靠性的初步研究：与Micro-CT真实微结构参数的相关性分析

桂勃涛*, 杨鸿来#

重庆医科大学附属口腔医院, 重庆

收稿日期: 2026年5月23日; 录用日期: 2026年6月17日; 发布日期: 2026年6月26日

摘要

为探讨普通锥形束计算机断层扫描(cone beam computed tomography, CBCT)在评价上颌窦外提升术后新生骨量及骨微结构方面的可靠性,并以micro-CT测得的真实骨微结构参数作为参照,分析普通CBCT影像参数与真实骨量之间的相关性。通过纳入接受上颌窦外提升术并延期种植的病例资料。术后种植位点于种植体植入同期采集骨芯样本,并进行micro-CT扫描,获得骨组织体积(TV)、骨体积(BV)、骨体积分数(BV/TV)、骨小梁数量(Tb.N)、骨小梁厚度(Tb.Th)及骨小梁间隙(Tb.Sp)等真实微结构参数。同时,基于术前或术后CBCT数据,在对应种植位点建立感兴趣区域(region of interest, ROI)或感兴趣体积(volume of interest, VOI),测量CBCT HU值及相应骨微结构参数。采用Spearman秩相关分析评价CBCT相关参数与micro-CT真实微结构参数之间的相关性。根据数据结果显示,术前黏膜厚度、剩余骨高度、上颌窦宽度及提升高度等影像学变量与micro-CT测得的骨微结构参数均无显著相关性。CBCT不同方向ROI的HU值与micro-CT微结构参数之间整体缺乏稳定相关性,仅横断位HU值与Tb.Th呈弱负相关,但其相关方向与骨质量评价的理论预期不一致。描述性统计结果显示,CBCT测得的BV、BV/TV、Tb.Th及Tb.Sp等参数明显高于micro-CT测的值,而Tb.N明显低于micro-CT测的值,提示CBCT在骨微结构重建中存在系统性偏差。进一步Spearman相关分析显示,CBCT与micro-CT测得的TV、BV、BV/TV、Tb.N、Tb.Th、Tb.Sp之间均无显著相关性。普通CBCT在未进行骨替代材料分割或误差校正的情况下,不能准确反映上颌窦外提升术后真实新生骨量及骨微结构情况。CBCT分辨率较低、体素较大以及部分容积效应可能导致其HU值及微结构参数偏离真实骨质情况,尤其容易受到残留骨替代材料的干扰。后续研究应在不增加辐射剂量的前提下,通过灰度阈值分割、图像重建优化、人工智能算法或多参数校正模型提高CBCT对新生骨量变化的真实反映能力。

关键词

CBCT, Micro-CT, 上颌窦外提升, 新生骨, 骨微结构

*第一作者。

#通讯作者。

A Preliminary Study on the Reliability of Conventional Cone-Beam Computed Tomography in Evaluating New Bone Volume after Maxillary Sinus Floor Elevation: Correlation Analysis with True Microstructural Parameters Derived from Micro-CT

Botao Gui*, Honglai Yang#

Stomatological Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: May 23, 2026; accepted: June 17, 2026; published: June 26, 2026

Abstract

The reliability of conventional cone-beam computed tomography (CBCT) in assessing new bone volume and microstructure following lateral sinus floor elevation (LSFE), using micro-computed tomography (micro-CT)-derived true bone microstructural parameters as the reference standard, was investigated. Clinical cases undergoing LSFE with delayed implant placement were enrolled. At the time of implant placement, bone core samples were harvested from the implant site and scanned using micro-CT to obtain true microstructural parameters, including total volume (TV), bone volume (BV), bone volume fraction (BV/TV), trabecular number (Tb.N), trabecular thickness (Tb.Th), and trabecular separation (Tb.Sp). Concurrently, preoperative or postoperative conventional CBCT datasets were used to define regions of interest (ROI) or volumes of interest (VOI) at corresponding implant sites, and Hounsfield unit (HU) values and derived bone microstructural parameters were measured. Spearman rank correlation analysis was performed to assess associations between CBCT-derived parameters and micro-CT-derived true microstructural parameters. Results showed that preoperative imaging variables—including Schneiderian membrane thickness, residual alveolar ridge height, maxillary sinus width, and elevation height—exhibited no significant correlations with any micro-CT-derived microstructural parameters. Overall, HU values from CBCT ROIs across different anatomical planes demonstrated unstable correlations with micro-CT parameters; only the transverse-plane HU value showed a weak negative correlation with Tb.Th—contradicting theoretical expectations for bone quality assessment. Descriptive statistics revealed that CBCT-derived BV, BV/TV, Tb.Th, and Tb.Sp were consistently overestimated, whereas Tb.N was significantly underestimated compared with micro-CT measurements—indicating systematic bias in CBCT-based microstructural reconstruction. Further Spearman correlation analyses confirmed no statistically significant correlations between CBCT- and micro-CT-derived TV, BV, BV/TV, Tb.N, Tb.Th or Tb.Sp. Thus, conventional CBCT—without segmentation of residual bone graft materials or error correction—fails to accurately reflect true new bone volume and microstructure after LSFE. Limitations such as low spatial resolution, large

voxel size, and partial volume effects likely cause CBCT HU values and microstructural parameters to deviate from true bone properties, particularly in the presence of residual bone substitute materials. Future studies should enhance the fidelity of CBCT in capturing new bone changes without increasing radiation dose—through gray-scale threshold segmentation, optimized image reconstruction, artificial intelligence—based algorithms, or multi-parameter calibration models.

Keywords

Cone-Beam Computed Tomography, Micro-Computed Tomography, Maxillary Sinus Floor Elevation, New Bone Formation, Bone Microarchitecture

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

上颌后牙区牙缺失后常伴随牙槽骨垂直向吸收及上颌窦气化, 导致剩余牙槽骨高度不足, 限制种植体的理想植入位置和初期稳定性。上颌窦外提升术是解决上颌后牙区垂直骨量不足的重要骨增量技术, 其基本原理是通过上颌窦侧壁开窗, 抬高施耐德膜, 并在窦底与黏膜之间填入骨替代材料, 从而为后续种植体植入创造足够的骨量条件[1]-[3]。在临床实践中, 异种骨替代材料由于具有较慢的吸收速度和较好的空间维持能力, 被广泛应用于上颌窦提升术中[4][5]。然而, 异种骨材料的长期残留也使术后骨增量区域形成一种由新生骨、残留骨替代材料、纤维结缔组织及骨髓样组织共同构成的复合结构, 这给影像学评价真实新生骨量带来了困难[6][7]。

目前, 锥形束计算机断层扫描(cone-beam computed tomography, CBCT)因具有三维显示能力强、检查便捷、辐射剂量相对较低等优点, 已成为口腔种植术前及术后评估的常规影像学方法。CBCT 能够较好显示牙槽骨高度、宽度、上颌窦底形态及骨增量区域的空间范围, 在种植方案制定和术后随访中具有重要价值[8][9]。既往研究显示, CBCT 在测量牙槽骨高度和厚度等线性骨量指标方面具有较高准确性[10]。然而, 临床种植成功不仅取决于骨量是否充足, 还与骨密度、骨小梁结构及新生骨成熟程度密切相关[11]。因此, 仅依靠 CBCT 显示的高密度影像判断骨增量区“骨质良好”, 可能存在一定局限。

骨质量是一个综合概念, 通常包括骨矿化程度、骨小梁微结构、骨组织生物活性及力学性能等方面[12]。micro-CT 具有较高空间分辨率, 能够精确分析骨体积、骨体积分数、骨小梁数量、骨小梁厚度及骨小梁间隙等微结构参数[13][14]。相比之下, 普通临床 CBCT 的体素较大、空间分辨率较低, 且其灰度值容易受到扫描参数、重建算法、散射伪影和部分容积效应影响[15][16]。尤其在上颌窦提升术后异种骨增量区域, 残留骨替代材料与新生骨均可表现为高密度影像, 导致 CBCT HU 值或灰度值可能被高估, 进而不能准确区分真实新生骨与未吸收骨替代材料[17]。这一问题在评价上颌窦提升术后骨增量区时尤为突出, 因为该区域内新生骨形成与骨替代材料吸收并不同步, 影像学高密度区域往往不能直接等同于真实骨组织。

基于此, 本研究以 micro-CT 测得的骨芯样本真实微结构参数作为参照, 分析普通 CBCT HU 值及 CBCT 重建微结构参数与 micro-CT 真实参数之间的相关性, 探讨普通 CBCT 评价上颌窦外提升术后新生骨量及骨微结构的可靠性。本研究旨在明确普通 CBCT 是否能够真实反映新生骨形成情况, 并进一步讨

论其可能的误差来源, 为后续在不增加患者辐射剂量的前提下, 通过图像分割、算法校正或重建技术优化提高 CBCT 骨质量评价能力提供依据。

2. 资料与方法

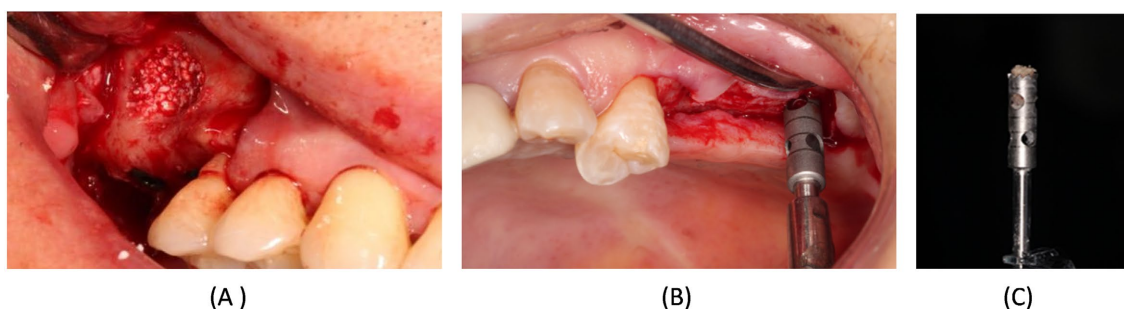
2.1. 研究对象

本研究基于上颌窦外提升术后延期种植患者的影像学及骨芯样本数据进行分析。患者均因上颌后牙缺失伴垂直骨量不足接受上颌窦外提升术, 并于术后一定愈合期后行延期种植体植入。研究流程包括上颌窦外提升术、骨替代材料填入、术后 CBCT 随访、种植同期骨芯样本获取及 micro-CT 分析。纳入了上颌磨牙缺失患者共 31 名, 并设置上颌窦提升增量骨组及自身骨对照组; 增量骨组患者接受上颌窦外提升术及延期种植, 在种植床预备时采集骨芯样本, 用于 micro-CT 及组织学分析。

2.2. 上颌窦外提升及骨芯样本获取

根据图 1 所示, 在上颌后牙区牙槽嵴正中作一条切口, 并于颊侧作两个释放切口, 翻起梯形黏骨膜瓣, 充分暴露上颌窦外侧壁。随后使用金刚砂车针在上颌窦外侧壁制备骨窗, 并小心去除骨窗区域骨板。在操作过程中, 为避免上颌窦黏膜穿孔, 需谨慎剥离并抬高上颌窦黏膜。上颌窦黏膜抬高后, 将异种骨替代材料轻柔填入上颌窦底部增量区域, 以完成窦底骨增量。最后, 将翻开的梯形黏骨膜瓣复位, 并采用单纯间断缝合实现无张力一期关闭。

在延期种植阶段(外颌窦外提升术后 9~12 个月), 使用外径为 3.5 mm、内径为 2.5 mm 的环钻, 于计划种植位点获取骨芯活检样本(B-C)。并进行固定和后续 micro-CT 分析。随后完成种植床预备, 并植入直径至少为 4 mm 的种植体, 采用非埋入式愈合方式。手术结束后, 将黏骨膜瓣复位, 并通过单纯间断缝合关闭创口。



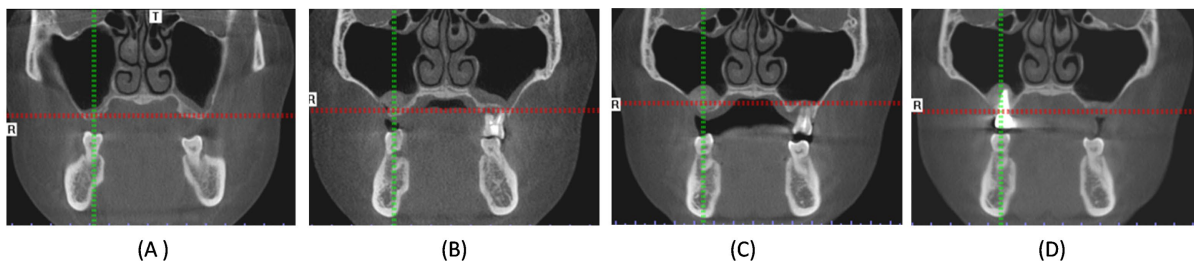
(A): 外提升植入物植入后效果图; (B): 骨芯活检样本制备过程; (C): 环钻制取的骨芯样本。

Figure 1. Surgical procedure of maxillary sinus floor elevation and bone core biopsy sampling at second-stage surgery
图 1. 上颌窦外提升手术过程及二期分期骨芯活检样本制取

2.3. CBCT 检查及参数测量

CBCT 用于获取上颌窦外提升术前、术后即刻、种植前及种植后不同阶段的影像资料。CBCT 可观察骨替代材料充填范围、骨增量区域影像密度变化、上颌窦并发症及种植术前解剖结构(如图 2 所示)。

在 CBCT 图像中采用 3DSlicer 将不同阶段影像进行配准, 并在未来种植体轴向建立直径 3 mm、长度 10 mm 的虚拟圆柱, 以尽可能保证 CBCT 测量区域与骨芯样本区域对应。选取种植位点对应 ROI 或 VOI, 测量不同方向的 HU 值, 包括冠状位、垂直位及横断位 HU 值。同时, 基于 CBCT 图像重建获得骨微结构参数, 包括 TV、BV、BV/TV、Tb.N、Tb.Th 和 Tb.Sp (如图 3 所示)。



注: (A): 上颌窦外提升术前 CBCT 冠状位图像; (B): 上颌窦外提升术后即刻 CBCT 冠状位图像; (C): 术后 7 个月 CBCT 冠状位图像; (D): 术后 22 个月 CBCT 冠状位图像。

Figure 2. CBCT imaging evaluation at different time points

图 2. CBCT 不同阶段影像评估

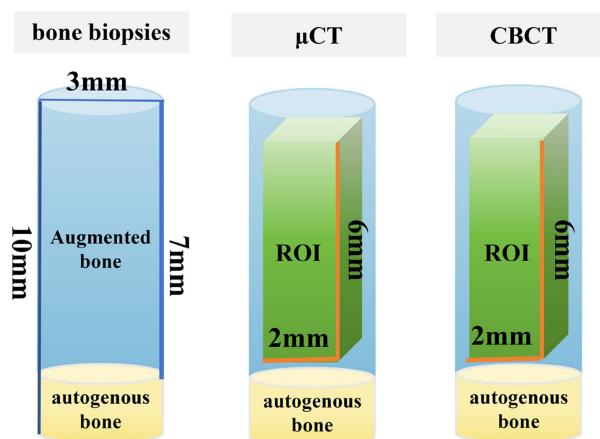


Figure 3. Three-dimensional ROI/VOI established on micro-CT and CBCT based on the long axis of the bone core sample

图 3. Micro-CT 和 CBCT 根据骨芯样本轴向建立相应的三维 ROI/VOI

2.4. Micro-CT 扫描及真实微结构参数测量

骨芯样本采集后进行 micro-CT 扫描。micro-CT 具有较高分辨率, 能够较准确地显示骨小梁结构及矿化组织分布。根据正式发表文章, micro-CT 扫描后可获得 TV Density、BV Density、BV/TV、Tb.N、Tb.Th 及 Tb.Sp 等参数(如图 4 所示)。

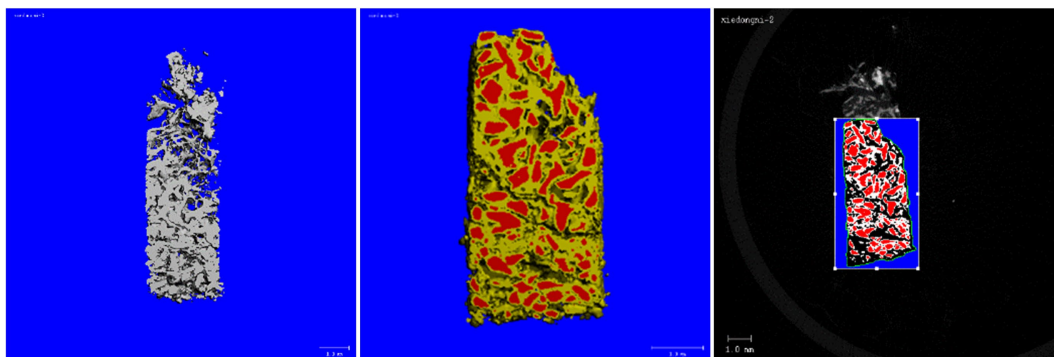


Figure 4. Micro-CT observation of the bone core sample

图 4. 骨芯样本的 micro-CT 观察

本研究将 micro-CT 测得的骨微结构参数作为反映真实骨量及真实骨微结构的参照标准, 用于评价普通 CBCT 参数的可靠性。

2.5. 统计学分析

采用 SPSS 或同类统计软件进行分析。计量资料以均数 \pm 标准差表示。首先对 CBCT 与 micro-CT 测得参数进行描述性统计; 随后采用 Spearman 秩相关分析评价 CBCT HU 值、CBCT 微结构参数与 micro-CT 真实微结构参数之间的相关性。以 $p < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

3. 结果

3.1. 术前影像学变量与 Micro-CT 真实微结构参数无显著相关性

首先实验组分析了 4 个 CBCT 相关影像学变量与 micro-CT 微结构参数之间的相关性, 包括术前黏膜厚度、术前剩余骨高度、上颌窦宽度及提升高度。见表 1 结果显示, 上述变量与 TV、BV、BV/TV、Tb.N、Tb.Th、Tb.Sp 等 micro-CT 参数之间均无显著相关性。

Table 1. Correlation between 4 variable data of CBCT and micromorphometric parameters of micro-CT

表 1. CBCT 的 4 个变量数据与 micro-CT 微观形态学参数的相关性分析

Micro-CT 参数	统计指标	术前上颌窦黏膜厚度	术前剩余骨高度	上颌窦颊舌向宽度	上颌窦提升高度
TV	r 值	-0.067	-0.016	0.124	0.186
	p 值	0.772	0.933	0.508	0.315
	N	31	31	31	31
BV	r 值	0.008	0.035	0.025	0.229
	p 值	0.967	0.851	0.892	0.215
	N	31	31	31	31
BV/TV	r 值	0.069	0.141	-0.144	0.022
	p 值	0.714	0.451	0.441	0.906
	N	31	31	31	31
Tb.N	r 值	0.123	-0.023	-0.251	0.164
	p 值	0.509	0.904	0.173	0.378
	N	31	31	31	31
Tb.Th	r 值	-0.119	0.118	0.255	-0.208
	p 值	0.523	0.529	0.166	0.261
	N	31	31	31	31
Tb.Sp	r 值	-0.067	0.046	0.273	-0.173
	p 值	0.719	0.805	0.138	0.352
	N	31	31	31	31

注: TV: 组织总体积; BV: 骨体积; BV/TV: 骨体积分数; Tb.N: 骨小梁数量; Tb.Th: 骨小梁厚度; Tb.Sp: 骨小梁间隙。r 值为 Spearman 相关系数, p 值为双侧检验结果。p < 0.05 表示差异具有统计学意义, p < 0.01 表示差异具有高度统计学意义。

这一结果提示, 传统术前影像学解剖指标虽然可以反映手术难度及骨增量空间, 但并不能直接预测上颌窦外提升术后骨芯样本中的真实新生骨量或骨小梁微结构。换言之, 剩余骨高度较低、提升高度较

高或上颌窦宽度不同, 并不必然对应更高或更低的新生骨形成水平。

3.2. CBCT HU 值与 Micro-CT 真实骨微结构参数缺乏稳定相关性

接下来实验组分析了 CBCT 不同方向 ROI 的 HU 值与 micro-CT 微结构参数之间的关系。见表 2 结果显示, 冠状位、垂直位及横断位 HU 值与 micro-CT 测得的 TV、BV、BV/TV、Tb.N、Tb.Th 及 Tb.Sp 之间整体缺乏显著相关性。仅横断位 HU 值与 Tb.Th 呈弱负相关, 但该相关性方向与“HU 值越高、骨小梁越厚、骨质量越好”的理论假设并不一致, 因此难以作为可靠的骨质量判断依据。

Table 2. Correlation between HU-value of ROI and micromorphometric parameter of micro-CT
表 2. 感兴趣区(ROI)的 CT 值(HU 值)与显微 CT (micro-CT)微观形态学参数之间的相关性分析

micro-CT 参数	统计指标	冠状位 HU 值	垂直断面 HU 值	横断位 HU 值
TV	r 值	-0.136	-0.025	-0.123
	p 值	0.466	0.896	0.508
	N	31	31	31
BV	r 值	-0.104	-0.01	-0.1
	p 值	0.576	0.957	0.592
	N	31	31	31
BV/TV	r 值	0.102	0.141	0.112
	p 值	0.586	0.45	0.549
	N	31	31	31
Tb.N	r 值	0.207	0.254	0.3
	p 值	0.263	0.169	0.102
	N	31	31	31
Tb.Th	r 值	-0.273	-0.293	-0.377*
	p 值	0.137	0.11	0.036
	N	31	31	31
Tb.Sp	r 值	-0.166	-0.205	-0.258
	p 值	0.373	0.268	0.161
	N	31	31	31

注: HU: Hounsfield unit, 亨氏单位或灰度密度值; ROI: 感兴趣区域。r 值为 Spearman 秩相关系数, p 值为双侧检验结果。* $p < 0.05$ 表示差异具有统计学意义。

该结果说明, 普通 CBCT HU 值并不能稳定反映真实骨微结构。尤其在上颌窦外提升后, 骨增量区域内可能同时存在新生骨、残留异种骨颗粒及软组织成分, CBCT HU 值反映的是混合组织在较大体素内的平均衰减特征, 而非单纯新生骨组织的真实密度。

3.3. CBCT 与 Micro-CT 测得微结构参数存在明显数值差异

随后对 micro-CT 与 CBCT 测得的微结构参数进行了描述性比较。见表 3 结果显示, 两种影像技术得到的 TV、BV、BV/TV、Tb.N、Tb.Th 和 Tb.Sp 存在明显差异。具体表现为, CBCT 测得的 BV、BV/TV、Tb.Th 及 Tb.Sp 等参数整体高于 micro-CT, 而 Tb.N 则低于 micro-CT。

Table 3. Descriptive statistics of the micromorphometric information obtained from micro-CT and of their corresponding volumes in cone-beam computed tomography (CBCT) images**表 3.** 从 micro-CT 获取的微观形态学信息及其在 CBCT 图像中对应体积的描述性统计分析

参数	检测方法	单位	最大值	最小值	均值
TV	micro-CT	mm ³	39.7009	3.5107	13.1255
	CBCT	mm ³	60.8676	10.8343	29.0193
BV	micro-CT	mm ³	11.3405	1.2252	4.2042
	CBCT	mm ³	41.2217	4.3975	15.2649
BV/TV	micro-CT	%	50.05	20.79	32.84
	CBCT	%	67.9469	38.7526	52.0967
Tb.N	micro-CT	1/mm	9.4296	3.1312	6.2
	CBCT	1/mm	0.7113	0.3278	0.5189
Tb.Th	micro-CT	mm	0.1517	0.0443	0.0765
	CBCT	mm	1.7063	0.5022	1.0313
Tb.Sp	micro-CT	mm	0.3419	0.0964	0.1668
	CBCT	mm	1.7431	0.5708	0.9496

注: TV: 组织总体积; BV: 骨体积; BV/TV: 骨体积分数; Tb.N: 骨小梁数量; Tb.Th: 骨小梁厚度; Tb.Sp: 骨小梁间隙。micro-CT 为骨芯样本高分辨率扫描结果, CBCT 为对应区域临床影像重建结果。

这一结果提示, 普通 CBCT 在骨微结构重建过程中存在系统性偏差。由于 CBCT 空间分辨率较低, 较细的新生骨小梁可能无法被准确识别; 同时, 残留骨替代材料及部分容积效应可能导致高密度结构被扩大化或融合显示, 从而造成骨体积、骨小梁厚度及骨体积分数被高估。

3.4. CBCT 与 Micro-CT 同类微结构参数之间无显著相关性

接下来进一步采用 Spearman 秩相关分析比较 CBCT 与 micro-CT 测得的同类微结构参数。见表 4 结果显示, TV、BV、BV/TV、Tb.N、Tb.Th 及 Tb.Sp 的 CBCT 测量值与 micro-CT 测量值之间均无显著相关性。

Table 4. R-values and p-values of Spearman's rank-order correlation between the micromorphometric parameters of CBCT and micro-CT**表 4.** CBCT 和 micro-CT 的微观形态学参数之间 Spearman 秩相关分析的 R 值和 p 值

骨微结构参数	p 值	r 值	相关性判断	统计学意义
TV	0.184	0.245	弱正相关	无统计学意义
BV	0.08	0.319	弱正相关	无统计学意义
BV/TV	0.149	0.265	弱正相关	无统计学意义
Tb.N	0.928	-0.017	几乎无相关	无统计学意义
Tb.Th	0.796	-0.048	几乎无相关	无统计学意义
Tb.Sp	0.799	-0.048	几乎无相关	无统计学意义

注: r 值为 Spearman 秩相关系数。p < 0.05 表示差异具有统计学意义, p < 0.01 表示差异具有高度统计学意义。

该结果若普通 CBCT 能够准确反映真实骨微结构, 则其测得参数应与 micro-CT 具有较高一致性或至

少呈显著正相关。然而本研究结果显示二者之间缺乏显著相关性, 说明普通 CBCT 在上颌窦外提升后骨增量区域中, 不能可靠反映真实新生骨量及骨小梁结构。

4. 讨论

4.1. 普通 CBCT 在临床中具有重要价值, 但其骨质量评价能力有限

本研究通过比较普通 CBCT 与 micro-CT 测得的骨微结构参数发现, CBCT HU 值及 CBCT 重建微结构参数与 micro-CT 真实参数之间整体缺乏显著相关性。这一结果提示, 在上颌窦外提升术后异种骨增量区域, 普通 CBCT 虽然能够显示骨增量区域的空间范围和影像密度变化, 但不能直接反映真实新生骨量及骨小梁微结构。该发现与既往研究关于 CBCT 骨密度评价局限性的认识一致, 即 CBCT 灰度值并非严格意义上的标准化 HU 值, 易受设备参数、视野范围、散射线、伪影及重建算法影响[15][16]。因此, 将 CBCT 显示的高密度影像直接解释为“新生骨成熟”或“骨量增加”是不充分的。

4.2. CBCT HU 值偏高并不等同于真实新生骨量增加

从临床角度看, CBCT 在上颌窦外提升术后的价值主要体现在骨增量形态观察、种植位点定位、上颌窦并发症判断及术前路径规划等方面[8][9]。然而, 骨质量评价较骨量评价更为复杂。既往研究指出, 骨质量不仅包括骨密度, 还包括骨小梁空间结构、骨矿化程度及组织学活性等因素[11][12]。micro-CT 能够在较高分辨率下分析骨小梁结构, 被认为是评价离体骨组织微结构的重要工具[13][14]。本研究中, micro-CT 作为参照标准能够更真实地反映骨芯样本内部矿化组织分布, 而 CBCT 与 micro-CT 之间缺乏显著相关性, 说明普通 CBCT 输出的 BV/TV、Tb.N、Tb.Th、Tb.Sp 等参数虽然名称与 micro-CT 相似, 但其实际代表的生物学意义并不完全一致。

4.3. 分辨率不足和部分容积效应是 CBCT 误差的重要原因

本研究结果中, CBCT 测得的部分骨微结构参数明显高于 micro-CT, 而骨小梁数量等指标则可能低于 micro-CT。这种现象可能与 CBCT 分辨率较低及部分容积效应有关。micro-CT 可以识别更细小的新生骨小梁结构, 而普通 CBCT 由于体素较大, 难以准确显示薄而不连续的新生骨小梁。当多个细小结构处于同一体素内时, CBCT 可能将其融合为较粗大的高密度结构, 从而高估骨小梁厚度、骨体积或骨体积分数; 同时, 细小骨小梁之间的间隙可能被模糊化, 导致骨小梁数量和空间结构判断失真[18][19]。因此, CBCT 对骨微结构的重建误差并不是随机误差, 而可能具有系统性偏差。

异种骨替代材料残留是影响 CBCT 评价新生骨量的另一重要因素。异种骨材料常用于上颌窦外提升术, 其优点是吸收较慢、空间维持能力较好, 但正因为其吸收缓慢, 术后较长时间内仍可在骨增量区域中保留[4]-[7]。残留异种骨颗粒在 CBCT 上通常表现为高密度影像, 与新生骨难以清晰区分。组织学研究显示, 上颌窦提升术后骨增量区可同时存在新生骨、残留骨替代材料及软组织成分, 不同成分之间的比例和空间关系存在明显个体差异[6][7]。因此, CBCT HU 值升高并不一定代表新生骨形成增加, 也可能主要反映残留骨替代材料的高矿化密度。

这一点对临床判断具有重要意义。若仅根据 CBCT 影像中骨增量区密度较高而判断骨质成熟, 可能会高估真实新生骨量, 进而影响种植时机选择和种植体初期稳定性评估。本研究结果支持这样一种认识: CBCT 可以作为骨增量区域形态学评价工具, 但不能在未经校正或分割的情况下作为真实新生骨量的直接替代指标。类似研究也发现, 在异种骨增量区域, 未进行骨替代材料分割的 CBCT 骨密度及微结构参数与 micro-CT 或组织学指标之间缺乏稳定相关性; 而通过灰度阈值分割后, 低灰度区可能更接近新生骨成分, 高灰度区则更容易受到残留异种骨颗粒影响[17]。

4.4. 后续改进方向：在不增加辐射剂量的前提下提升 CBCT 真实性

因此, 未来 CBCT 骨质量评价的改进方向不应简单依赖提高扫描剂量或重复检查, 而应在不增加患者辐射暴露的前提下, 通过图像算法和后处理技术提高其真实性。首先, 可建立基于灰度阈值的骨替代材料分割策略, 将新生骨与残留骨替代材料尽可能区分。实验组已有研究提示, 低灰度阈值范围内的 CBCT 灰度值与新生骨面积存在相关性, 而较高灰度阈值范围更可能反映骨替代材料面积[17]。其次, 可利用 micro-CT 或组织学结果作为真实标签, 建立 CBCT 参数与真实骨微结构之间的校正模型, 使普通 CBCT 在临床条件下获得更接近真实骨质量的预测结果。再次, 人工智能图像分割和深度学习算法可进一步整合灰度分布、纹理特征、空间连续性及周边解剖信息, 辅助识别新生骨、残留骨替代材料和软组织区域, 从而提高 CBCT 骨质量评价的准确性。

本研究仍存在一定局限。首先, 研究主要基于 CBCT 数据及骨芯样本分析, 样本量相对有限, 可能影响统计效能。其次, CBCT 灰度值受设备型号、扫描参数和重建算法影响较大, 不同设备之间结果可能存在差异[16]。再次, 本研究主要围绕普通 CBCT 与 micro-CT 参数之间的相关性展开, 尚未进一步结合组织学新骨面积进行多维验证。后续研究可扩大样本量, 联合组织学、micro-CT 及 CBCT 多模态数据, 建立更加稳定的影像学预测模型。尤其应进一步探索低剂量 CBCT 条件下的图像增强、阈值分割和人工智能校正方法, 使 CBCT 在保持低辐射优势的同时, 尽可能真实反映上颌窦提升术后新生骨量和骨质量变化。

综上所述, 本研究结果表明, 普通 CBCT 在评价上颌窦外提升术后骨增量区形态方面具有临床价值, 但其 HU 值和微结构参数不能直接代表真实新生骨量。CBCT 分辨率较低、部分容积效应以及异种骨替代材料残留是导致其高估骨质情况的重要原因。未来通过阈值分割、重建算法优化和人工智能校正等技术, 有望在不增加辐射剂量的前提下提高 CBCT 对真实新生骨形成情况的反映能力。

5. 结论

本研究通过比较普通 CBCT 与 micro-CT 真实骨微结构参数的相关性, 发现普通 CBCT HU 值及微结构参数不能稳定反映上颌窦外提升术后真实新生骨量及骨小梁结构。CBCT 测得的部分微结构参数明显偏离 micro-CT 结果, 提示其可能受到分辨率不足、部分容积效应及残留骨替代材料干扰的影响。因此, 在临床中不宜单纯依据普通 CBCT HU 值或高密度影像判断上颌窦提升术后新生骨质量。

未来应在不增加患者辐射暴露的前提下, 通过灰度阈值分割、图像重建优化、人工智能算法及 CBCT-micro-CT 对照校正模型等方法, 提升 CBCT 对真实骨量变化和新生骨质情况的反映能力, 为上颌窦提升术后种植时机选择和预后评估提供更准确的影像学依据。

参考文献

- [1] Guerrero, J.S. (2015) Lateral Window Sinus Augmentation: Complications and Outcomes of 101 Consecutive Procedures. *Implant Dentistry*, **24**, 354-361. <https://doi.org/10.1097/id.0000000000000250>
- [2] Mohan, N., Wolf, J. and Dym, H. (2015) Maxillary Sinus Augmentation. *Dental Clinics of North America*, **59**, 375-388. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2014.10.001>
- [3] Valentini, P. and Artzi, Z. (2022) Sinus Augmentation Procedure via the Lateral Window Technique—Reducing Invasiveness and Preventing Complications: A Narrative Review. *Periodontology 2000*, **91**, 167-181. <https://doi.org/10.1111/prd.12443>
- [4] Yamada, M. and Egusa, H. (2018) Current Bone Substitutes for Implant Dentistry. *Journal of Prosthodontic Research*, **62**, 152-161. <https://doi.org/10.1016/j.jpor.2017.08.010>
- [5] Mendoza-Azpur, G., de la Fuente, A., Chavez, E., Valdivia, E. and Khoully, I. (2019) Horizontal Ridge Augmentation with Guided Bone Regeneration Using Particulate Xenogenic Bone Substitutes with or without Autogenous Block Grafts:

- A Randomized Controlled Trial. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, **21**, 521-530. <https://doi.org/10.1111/cid.12740>
- [6] Carmagnola, D., Adriaens, P. and Berglundh, T. (2003) Healing of Human Extraction Sockets Filled with Bio-Oss®. *Clinical Oral Implants Research*, **14**, 137-143. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0501.2003.140201.x>
- [7] Galindo-Moreno, P., de Buitrago, J.G., Padiál-Molina, M., Fernández-Barbero, J.E., Ata-Ali, J. and O'Valle, F. (2018) Histopathological Comparison of Healing after Maxillary Sinus Augmentation Using Xenograft Mixed with Autogenous Bone versus Allograft Mixed with Autogenous Bone. *Clinical Oral Implants Research*, **29**, 192-201. <https://doi.org/10.1111/clr.13098>
- [8] Bilge, N.H., Dagistanli, S., Karasu, Y. and Orhan, K. (2023) Comparison of Pathologic Changes in the Maxillary Sinus before and after Dental Implant Surgery Using Cone Beam Computed Tomography. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, **38**, 1115-1122. <https://doi.org/10.11607/jomi.10321>
- [9] Li, Y., Deng, S., Mei, L., Li, J., Qi, M., Su, S., *et al.* (2019) Accuracy of Alveolar Bone Height and Thickness Measurements in Cone Beam Computed Tomography: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology*, **128**, 667-679. <https://doi.org/10.1016/j.oooo.2019.05.010>
- [10] Kang, S.R., Bok, S.C., Choi, S.C., Lee, S.S., *et al.* (2016) The Relationship between Dental Implant Stability and Trabecular Bone Structure Using Cone-Beam Computed Tomography. *Journal of Periodontal & Implant Science*, **46**, 116-127. <https://doi.org/10.5051/jpis.2016.46.2.116>
- [11] Molly, L. (2006) Bone Density and Primary Stability in Implant Therapy. *Clinical Oral Implants Research*, **17**, 124-135. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0501.2006.01356.x>
- [12] Bergkvist, G., Koh, K.J., Sahlholm, S., Klintström, E. and Lindh, C. (2010) Bone Density at Implant Sites and Its Relationship to Assessment of Bone Quality and Treatment Outcome. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, **25**, 321-328.
- [13] Kim, Y., Brodt, M.D., Tang, S.Y. and Silva, M.J. (2021) Microct for Scanning and Analysis of Mouse Bones. In: Hilton, M.J., Ed., *Methods in Molecular Biology*, Springer, 169-198. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1028-2_11
- [14] Iida, T., Baba, S., Botticelli, D., Masuda, K. and Xavier, S.P. (2020) Comparison of Histomorphometry and Microct after Sinus Augmentation Using Xenografts of Different Particle Sizes in Rabbits. *Oral and Maxillofacial Surgery*, **24**, 57-64. <https://doi.org/10.1007/s10006-019-00813-x>
- [15] Nomura, Y., Watanabe, H., Honda, E. and Kurabayashi, T. (2010) Reliability of Voxel Values from Cone-Beam Computed Tomography for Dental Use in Evaluating Bone Mineral Density. *Clinical Oral Implants Research*, **21**, 558-562. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0501.2009.01896.x>
- [16] Nackaerts, O., Maes, F., Yan, H., Couto Souza, P., Pauwels, R. and Jacobs, R. (2011) Analysis of Intensity Variability in Multislice and Cone Beam Computed Tomography. *Clinical Oral Implants Research*, **22**, 873-879. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0501.2010.02076.x>
- [17] Wang, X., Zhao, W., Liao, M., Liu, Y., Ban, C., Fu, G., *et al.* (2025) The Reliability of CBCT to Assess Quality of Augmented Bone after Lateral Sinus Floor Elevation with Xenografts: A Retrospective Analysis. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, **27**, e70029. <https://doi.org/10.1111/cid.70029>
- [18] Kivovics, M., Szabó, B.T., Németh, O., Iványi, D., Trimmel, B., Szmirnova, I., *et al.* (2020) Comparison between Micro-Computed Tomography and Cone-Beam Computed Tomography in the Assessment of Bone Quality and a Long-Term Volumetric Study of the Augmented Sinus Grafted with an Albumin Impregnated Allograft. *Journal of Clinical Medicine*, **9**, Article 303. <https://doi.org/10.3390/jcm9020303>
- [19] Schreiber, J.J., Anderson, P.A., Rosas, H.G., Buchholz, A.L. and Au, A.G. (2011) Hounsfield Units for Assessing Bone Mineral Density and Strength: A Tool for Osteoporosis Management. *Journal of Bone and Joint Surgery*, **93**, 1057-1063. <https://doi.org/10.2106/jbjs.j.00160>