

## 基于拉曼光谱技术的健康及牙周炎牙槽骨成分差异的研究

陈映宇<sup>1,2,3</sup>, 刘 懋<sup>4</sup>, 胡宇恒<sup>1,2,3</sup>, 曹 丹<sup>1,2,3</sup>, 顾敏芬<sup>5</sup>, 胡丹艳<sup>1,2,3</sup>, 吴 斌<sup>6</sup>, 严 斌<sup>1,2,3</sup>

**[摘要]** **目的** 基于拉曼光谱技术分析牙周健康及牙周炎人牙槽骨在根中及根尖区域的成分特征,探讨其无机矿物及胶原二级结构的差异。**方法** 选取来自牙周健康及牙周炎尸体颌骨的右上中切牙及其周围牙槽骨样本,将样本分为根中与根尖区域,对距牙根约1 mm范围内的牙槽骨进行拉曼光谱测试,定量分析骨无机成分参数及胶原二级结构特征。**结果** 健康牙槽骨根中区域的矿物基质比高于其根尖区域,也高于牙周炎牙槽骨根中区域;牙周炎牙槽骨中根中与根尖区域的矿物基质比接近。碳酸盐取代及骨结晶度在不同牙槽骨及不同区域间差异不明显。酰胺 I 带分析显示,牙周炎牙槽骨中  $\alpha$ -螺旋结构的相对含量降低,而无规则卷曲及  $\beta$ -折叠结构的相对含量增加,且该变化在根中区域更为明显。牙周炎牙槽骨根中区域的酰胺 III 带拟合峰面积的强度比( $I_{1\ 245}/I_{1\ 270}$ )高于根尖区域。**结论** 拉曼光谱揭示了牙周健康及牙周炎状态下牙槽骨矿化水平及胶原二级结构的改变,且不同牙根区域存在成分差异。

**[关键词]** 牙槽骨;牙周炎;拉曼光谱;骨成分

**[中图分类号]** R781.4 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-9872(2026)04-0241-05

**[doi]** 10.13591/j.cnki.kqyx.2026.04.001

### A study on the compositional differences of healthy and periodontitis-affected alveolar bone based on Raman spectroscopy

CHEN Yingyu, LIU Mao, HU Yuheng, CAO Dan, GU Minfen, HU Danyan, WU Bin, YAN Bin. (Department of Orthodontics, The Affiliated Stomatological Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** **Objective** To analyze the compositional characteristics of human alveolar bone in periodontal health and periodontitis at the mid-root and apical regions using Raman spectroscopy, and to investigate differences in inorganic mineral components and collagen secondary structure. **Methods** Right maxillary central incisors and surrounding alveolar bone samples were obtained from cadaveric jaws with periodontal health or periodontitis. The samples were divided into mid-root and apical regions. Raman spectra were collected from alveolar bone within approximately 1 mm of the tooth root. Quantitative analyses of inorganic mineral parameters and collagen secondary structure were performed. **Results** In healthy alveolar bone, the mineral-to-matrix ratio in the mid-root region was higher than that in the apical region and was also higher than the mineral-to-matrix ratio in the mid-root region of periodontitis alveolar bone. In periodontitis alveolar bone, the mineral-to-matrix ratios of the mid-root and apical regions were similar. No significant differences were observed in carbonate substitution or bone crystallinity among different alveolar bones or regions. Amide I band analysis showed a decreased relative content of  $\alpha$ -helix structures and increased relative contents of random coil and  $\beta$ -sheet structures in periodontitis alveolar bone, with more pronounced changes in the mid-root region. The intensity ratio of fitted amide III band peak areas ( $I_{1\ 245}/I_{1\ 270}$ ) in the mid-root region of periodontitis alveolar bone was higher than that in the apical region. **Conclusion** Raman spectroscopy reveals alterations in alveolar bone mineralization and collagen secondary structure under periodontal health and periodontitis, with compositional differences among root regions.

**Key words:** alveolar bone; periodontitis; Raman spectroscopy; bone composition

基金项目:国家自然科学基金(82371000);江苏省卓越博士后人才资助计划(2025ZB614);江苏省科教能力提升工程——江苏省研究型医院(YJXYJSDW4),江苏省医学创新中心(CXZX202227)

作者单位:1 南京医科大学附属口腔医院正畸科,江苏南京(210029);2 口腔疾病研究与防治国家级重点实验室培育建设点(南京医科大学),江苏南京(210029);3 江苏省口腔转化医学工程研究中心(南京医科大学),江苏南京(210029);4 东南大学机械工程学院,江苏省微纳生物医疗器械设计与制造重点实验室,江苏南京(211189);5 南京师范大学分析测试中心,江苏南京(210046);6 南京林业大学机械电子工程学院,江苏南京(210037)

通信作者:严 斌 E-mail:byan@njmu.edu.cn

吴 斌 E-mail:wubin@njfu.edu.cn

Stomatology, 2026, 46(4):241-245

牙槽骨是牙周支持组织的重要组成部分,其结构与成分完整性对于维持牙齿的稳定和口腔功能具有关键作用<sup>[1]</sup>。同时,牙槽骨也是一种高度动态的矿化组织,其成分与结构会随着局部力学环境及炎症状态发生重塑<sup>[2]</sup>,而其微观组成特征与骨的力学性能及生物学功能密切相关<sup>[3-5]</sup>。然而,现有关于牙槽骨的研究多集中于细胞学或影像学层面,对其无机矿物与有机基质在分子层面上的成分特征关注

较少。

牙周炎是一种以慢性炎症为特征的常见口腔疾病,可导致牙槽骨进行性吸收,是成年人牙齿缺失的主要原因之一<sup>[6]</sup>。既往研究多通过影像学或组织学方法评估牙槽骨的吸收程度与组织形态改变<sup>[7]</sup>,但这些方法难以反映骨组织在无机矿物及胶原结构层面的变化。

拉曼光谱技术可在不破坏样本结构的情况下对骨组织中无机矿物和有机基质进行定量表征,已被广泛应用于骨质量与病理骨研究中<sup>[8-10]</sup>。然而,目前关于拉曼光谱在揭示牙槽骨不同牙根区域成分差异及牙周炎相关变化方面的研究仍较为有限。基于此,本研究采用拉曼光谱技术,对牙周健康及牙周炎人牙槽骨在根中及根尖区域的无机矿物及胶原二级结构特征进行分析,以期理解牙槽骨的微观组成、区域异质性及牙周炎相关骨改变提供分子层面的依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样本收集与分组

样本来源于一名牙周健康(health, HLTH 组)及一名牙周炎(periodontitis, PD 组)的新鲜人体尸体颌骨标本,两者均无引起骨质疏松的全身性疾病。选取右上中切牙及其周围牙槽骨作为研究对象。健康样本牙槽骨无明显吸收,牙槽嵴顶位于釉牙骨质界根方约 1 mm;牙周炎样本中切牙牙根暴露,根长 1/3 发生牙槽骨吸收,其余无异常。本研究中样本的获取与使用已获得南京医科大学解剖学系伦理委员会批准[批准号:(2020)234]。

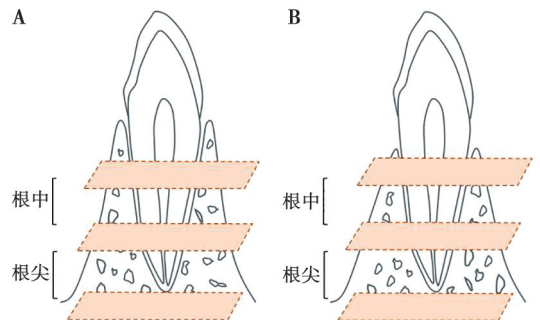
### 1.2 样本制备

首先,使用手工锯在中切牙的近远中进行切割,完整地切分下包含牙及牙周组织的块状样本。随后,使用 IsoMet 低速切割机(Buehler, 美国)将样本切分为包含牙-牙周膜-牙槽骨的 2 mm 薄片,分为根中部及根尖部(图 1)。为保证测试区域有足够的骨量,牙周炎样本在距离牙槽骨吸收水平根方约 1 mm 的平面进行切割,再将切割下的部分进一步切分成根中及根尖两个区域。最终,获得两个根中区域及两个根尖区域的牙槽骨样本。切分完成的样本保存于使用生理盐水润湿的密封盒内,并冻存于  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  冰箱中备用。

### 1.3 拉曼光谱实验

采用共聚焦显微拉曼光谱仪(HORIBA, 法国)对牙槽骨进行测试(图 2)。测试前将样本化冻并干燥 3 min,随后将样本平放于载物台上,保证测试面

的水平。测试区域为距离牙根约 1 mm 范围内的近远中牙槽骨。测试时,首先在 10 倍物镜下完成测试区域的焦距调整与初始定位,随后切换至 50 倍物镜进一步调整焦距直至出现清晰的牙槽骨画面。在划定的测试区域内实施间隔采样(间隔  $50\text{ }\mu\text{m}$ ),在每个样本的近远中各选取 5 个独立采样点。本研究的实验参数设定如下:采用 785 nm 的激发波长,激光功率为最大输出的 50%,积分时间为 15 s,光谱分辨率为  $3\text{ cm}^{-1}$ ,光谱采集范围为  $200\sim 2\,000\text{ cm}^{-1}$ <sup>[11]</sup>。所有测试均在以上同一设定参数下进行,测试环境为  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  且避光。



A: 牙周健康样本; B: 牙周炎样本。虚线方框代表切割平面。

图 1 样本制备示意图

Fig.1 Schematic diagram of sample preparation

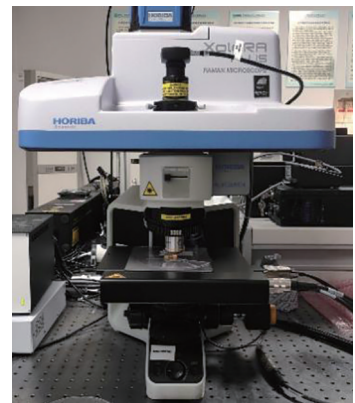


图 2 拉曼光谱测试实验设备

Fig.2 Raman spectroscopy testing equipment

### 1.4 拉曼光谱数据处理与分析

测试完成后,将原始光谱数据以.txt 格式导出。使用 Labspec 软件(HORIBA, 法国, Version 7.1.0.1)对光谱数据进行预处理,包括基线校正与平滑处理。谱带的峰拟合均使用高斯拟合方法。所有数据均经过相同的数据处理流程。

本研究参考既往骨组织成分研究中广泛采用的指标,对无机成分的分析主要包括以下 3 个指标:矿物基质比(mineral-to-matrix ratio, MMR)、碳酸盐取代(carbonate substitution)及骨结晶度(crystallinity)<sup>[12-15]</sup>。矿物基质比用于反映骨矿化程度,定义

为无机矿物峰  $\nu_2\text{PO}_4^{3-}$  (约  $430\text{ cm}^{-1}$ ) 的峰面积与有机基质峰酰胺 III 带 (约  $1\ 245$ 、 $1\ 270\text{ cm}^{-1}$ ) 峰面积的比值,该值越高代表骨的矿化水平越高;碳酸盐取代用于评估骨矿物质中碳酸根对磷酸根的替代情况,定义为  $\nu_1\text{CO}_3^{2-}$  (约  $1\ 070\text{ cm}^{-1}$ ) 与  $\nu_1\text{PO}_4^{3-}$  (约  $960\text{ cm}^{-1}$ ) 峰面积的比值,该值升高表示磷酸盐矿物中的碳酸盐替代增加,可能影响骨的强度;骨结晶度反映羟基磷灰石晶体的有序程度,定义为  $\nu_1\text{PO}_4^{3-}$  峰半高宽 (full width at half maximum, FWHM) 的倒数,FWHM 值越小,表示晶体结构越有序、结晶度越高。

骨有机成分主要由 I 型胶原纤维构成,其二级结构特征通过酰胺 I 带 (amide I) 和酰胺 III 带 (amide III) 进行评估。酰胺 I 带的拉曼位移选取为  $1\ 590\sim 1\ 720\text{ cm}^{-1}$ ,主峰位于约  $1\ 670\text{ cm}^{-1}$ ,主要反映胶原分子中  $\text{C}=\text{O}$  伸缩振动,与蛋白质二级结构密切相关<sup>[16]</sup>。该谱带中不同峰位对应的二级结构归属如下:约  $1\ 607\text{ cm}^{-1}$  代表  $\beta$ -折叠 (低波数);约  $1\ 638\text{ cm}^{-1}$  代表  $\alpha$ -螺旋;  $1\ 660\sim 1\ 670\text{ cm}^{-1}$  代表无规则卷曲;  $1\ 685\sim 1\ 690\text{ cm}^{-1}$  代表  $\beta$ -折叠 (高波数)<sup>[17-19]</sup>。酰胺 III 带的拉曼位移选取为  $1\ 230\sim 1\ 300\text{ cm}^{-1}$ ,采用双峰拟合方法进行分析,峰位初值分别设定为  $1\ 245\text{ cm}^{-1}$  与  $1\ 270\text{ cm}^{-1}$ ,峰面积强度比  $I_{1\ 245}/I_{1\ 270}$  常作为胶原完整性及结构稳定性的定量指标,用于评估胶原纤维的成熟度和变性程度<sup>[19-20]</sup>。

拉曼光谱图的可视化绘制以及酰胺 I 带分峰拟合图通过 Origin 2022 软件 (OriginLab, 美国) 完成。

## 2 结果

### 2.1 拉曼光谱特征

本研究选取拉曼位移在  $200\sim 2\ 000\text{ cm}^{-1}$  范围的谱图,得到牙槽骨的特征峰 (图 3)。无机组分包括位于约  $959\text{ cm}^{-1}$  的  $\nu_1\text{PO}_4^{3-}$ 、约  $432\text{ cm}^{-1}$  的  $\nu_2\text{PO}_4^{3-}$ 、约  $584\text{ cm}^{-1}$  的  $\nu_4\text{PO}_4^{3-}$ ,以及约  $1\ 072\text{ cm}^{-1}$  的  $\nu_1\text{CO}_3^{2-}$ ;有机组分包括位于约  $1\ 606\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\ 636\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\ 662\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\ 685\text{ cm}^{-1}$  的酰胺 I 带,位于约  $1\ 244\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\ 269\text{ cm}^{-1}$  的酰胺 III 带,约  $855\text{ cm}^{-1}$  的脯氨酸 (proline)、约  $873\text{ cm}^{-1}$  的羟脯氨酸 (hydroxyproline)、约  $1\ 002\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\ 031\text{ cm}^{-1}$  的苯丙氨酸 (phenylalanine),以及约  $1\ 450\text{ cm}^{-1}$  的  $\text{CH}_2$  基团振动 ( $\text{CH}_2$  wag)。从光谱图观察到,HLTH 组  $\nu_1\text{PO}_4^{3-}$  峰的强度相较于 PD 组有一定程度的升高。

### 2.2 无机成分分析

本研究测试了健康与牙周炎状态下牙槽骨无机

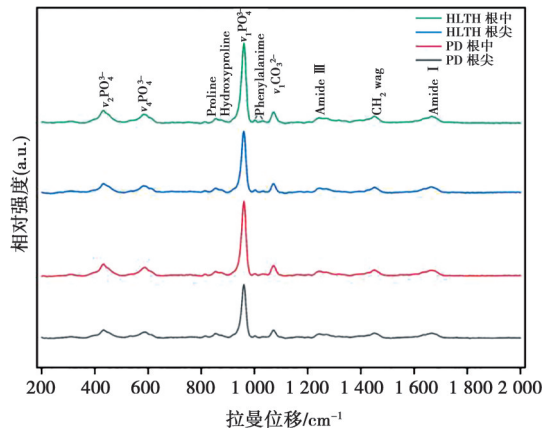


图 3 不同测试区域样本的代表性拉曼光谱图

Fig.3 Representative Raman spectra of samples from different test areas

质组成的变化,分别对根中及根尖区域牙槽骨的矿物基质比、碳酸盐取代及骨结晶度进行分析 (表 1)。矿物基质比结果显示:在根中区域,PD 组相较于 HLTH 组降低,提示牙周炎状态下牙槽骨矿化程度降低。此外,两组根尖区域的矿物基质比相较于根中区域有所下降。碳酸盐取代结果显示:在根中及根尖区域,两组水平接近。骨结晶度结果显示:在根中区域及根尖区域,HLTH 组与 PD 组的水平同样接近。综合来看,本研究观察到在牙周炎牙槽骨中主要出现骨无机质矿化水平的变化,尤其在根中区域表现为矿物基质比的降低,而碳酸盐取代及结晶度变化相对较小。

表 1 牙槽骨不同区域的无机成分指标

Tab.1 Alveolar bone inorganic component indicators in different regions

牙槽骨区域	牙周状态	矿物基质比	碳酸盐取代	骨结晶度
根中	HLTH	$3.325\pm 0.317$	$0.134\pm 0.009$	$0.050\pm 0.007$
	PD	$2.684\pm 0.208$	$0.141\pm 0.007$	$0.049\pm 0.005$
根尖	HLTH	$2.587\pm 0.291$	$0.131\pm 0.006$	$0.048\pm 0.007$
	PD	$2.465\pm 0.237$	$0.133\pm 0.008$	$0.050\pm 0.006$

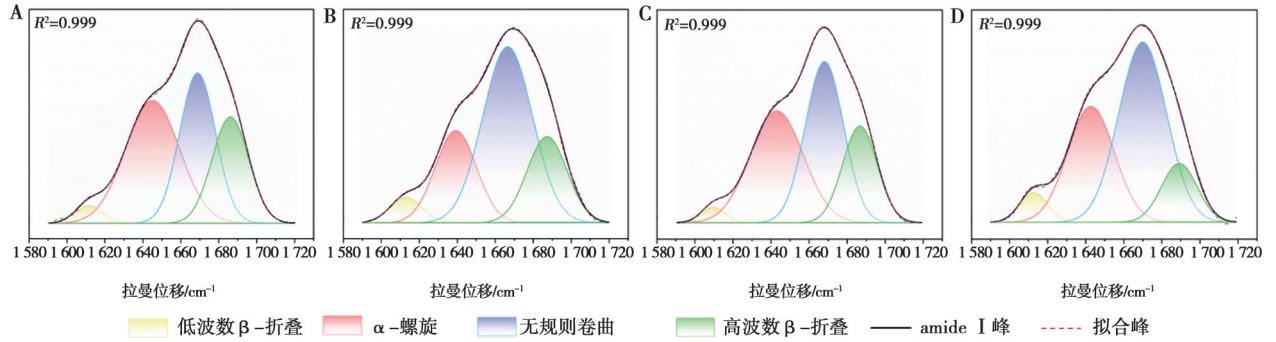
### 2.3 有机基质与胶原结构分析

为评估牙槽骨中胶原纤维的结构特征,本研究对酰胺 I 带二级结构及酰胺 III 带相关指标进行分析 (图 4、表 2)。

在酰胺 I 带二级结构组成上,在根中区域,低波数  $\beta$ -折叠结构的相对含量为 PD 组高于 HLTH 组,而  $\alpha$ -螺旋结构的相对含量为 PD 组低于 HLTH 组,无规则卷曲结构的相对含量为 PD 组高于 HLTH 组。这些变化显示:牙周炎状态下,根中区域胶原分子二级结构中,有序的  $\alpha$ -螺旋结构相对含量下降而无规则卷曲及  $\beta$ -折叠结构相对含量上升,可能反映胶原结构的转变及稳定性下降。在根尖区域,PD 组的低波数  $\beta$ -折叠结构及无规则卷曲结构的相对

含量高于 HLTH 组,  $\alpha$ -螺旋结构的相对含量与 HLTH 组接近,高波数  $\beta$ -折叠结构的相对含量低于

HLTH 组。



A:HLTH 组根中;B:PD 组根中;C:HLTH 组根尖;D:PD 组根尖。 $R^2$ 代表决定系数,该值越接近 1 代表拟合效果越好。

图 4 不同测试区域的酰胺 I 带拟合峰及峰面积图

Fig.4 Fitted peaks and peak area plots of amide I bands for different test regions

表 2 牙槽骨不同区域的酰胺 I 带二级结构相对含量和酰胺 III 带  $I_{1245}/I_{1270}$  值

Tab.2 Relative content of secondary structures of amide I bands and the  $I_{1245}/I_{1270}$  intensity ratio of amide III bands in different regions of alveolar bone

牙槽骨区域	牙周状态	酰胺 I 带				酰胺 III 带 $I_{1245}/I_{1270}$
		$\beta$ -折叠	$\alpha$ -螺旋	无规则卷曲	$\beta$ -折叠	
根中	HLTH	0.029±0.006	0.405±0.041	0.328±0.026	0.237±0.024	0.483±0.030
	PD	0.047±0.006	0.226±0.018	0.521±0.053	0.205±0.023	0.571±0.031
根尖	HLTH	0.024±0.004	0.376±0.035	0.388±0.024	0.212±0.018	0.505±0.037
	PD	0.048±0.006	0.319±0.038	0.498±0.047	0.135±0.015	0.482±0.028

在酰胺 III 带的分析中(表 2),根中区域 HLTH 组的  $I_{1245}/I_{1270}$  值相较于 PD 组更低,提示牙周炎状态下胶原完整性及结构稳定性可能降低。在根尖区域中,HLTH 组与 PD 组的  $I_{1245}/I_{1270}$  值接近。

总体而言,本研究在有机基质成分上观察到牙周炎牙槽骨的胶原结构发生显著变化,主要表现为  $\alpha$ -螺旋结构减少、无规则卷曲和  $\beta$ -折叠结构增加,且这种变化在根中区域更为明显。

### 3 讨论

本研究基于拉曼光谱技术,对健康与牙周炎牙槽骨在根中及根尖区域的无机和有机成分进行了探索与分析。结果显示,牙周炎状态下牙槽骨的矿化程度及胶原结构发生了不同程度的改变。另外,牙槽骨的矿物质占比在根中与根尖之间存在差异。

炎症反应可促进破骨细胞生成与骨吸收,同时抑制骨形成,从而导致新骨形成与矿化沉积减少<sup>[21-23]</sup>。本研究发现 PD 组牙槽骨在根中区域的矿物质比相较于 HLTH 组降低,提示牙周炎状态下该区域骨矿化程度下降。从牙槽骨的不同区域来看,有研究显示根颈部牙槽骨松质骨弹性模量大于根中部且根中部大于根尖部<sup>[24]</sup>,另有学者发现根尖区域的牙槽骨密度小于根颈部<sup>[25]</sup>。而除了骨骼微观结构、机械性能以外,骨成分是评价骨质量的另一

指标<sup>[26]</sup>。在骨组成成分上,本研究观察到根尖区域两组牙槽骨的矿物质比相较于根中区域大致上有所降低,这与以往研究的结果基本相符。这可能是因为根尖区域本身骨结构较为疏松,矿化程度较低。

碳酸盐取代可以用于解释骨组织的更新、重建,同时,  $\text{CO}_3^{2-}$  取代  $\text{PO}_4^{3-}$  也会影响晶粒尺寸,从而限制矿物晶体的结晶度<sup>[27]</sup>。本研究中未观察到碳酸盐取代或骨结晶度在两组牙槽骨之间或不同的牙根区域间存在明显变化,可能提示骨组织的重塑水平在根中及根尖区域接近,以及牙周炎并未显著改变羟基磷灰石晶体的化学组成或正处于牙周炎的稳定期,但这一结论还需后续研究进行验证。

在有机基质成分方面,本研究通过对酰胺 I 带的分峰拟合分析,发现 PD 组牙槽骨中  $\alpha$ -螺旋结构(有序构象)相对含量降低,而无规则卷曲及  $\beta$ -折叠结构相对含量增加,尤其在根中区域表现最为明显,这可能提示胶原构象的稳定性下降及构象重排<sup>[28]</sup>。此外,既往研究表明,酰胺 III 带中  $I_{1245}/I_{1270}$  值可用于评估胶原纤维的完整性和成熟度,其升高常与胶原结构松散或受损相关<sup>[19]</sup>。本研究中,在 PD 组牙槽骨根中区域观察到  $I_{1245}/I_{1270}$  值升高,提示该区域胶原排列可能因炎症影响而造成了破坏。

本研究也存在一定局限性。首先,由于人体样本珍贵导致样本量有限,本研究的结果仅作为对健

康与牙周炎背景下骨组织矿物质与有机成分可能存在的变化趋势的初探,尚不能区分个体差异与疾病状态的独立影响。其次,本研究使用的牙周炎骨样本的疾病进展阶段无法精确判断。未来研究可加大样本量并结合力学测试和组织学分析,以进一步验证和拓展本研究的结论。

综上所述,本研究从分子成分层面揭示了牙周健康及牙周炎状态下牙槽骨的特征以及在不同牙根区域的特征性变化,为理解牙槽骨的成分组成在牙根不同区域的空间差异以及牙周炎相关的骨破坏提供了新的视角,也可为后续骨的组织水平的力学研究提供一定的依据<sup>[27]</sup>。本研究得出的主要结论如下:健康牙槽骨根中区域的矿物基质比相较于其根尖区域及牙周炎牙槽骨中的对应区域有所升高;碳酸盐取代及骨结晶度在两种牙槽骨间及不同牙根区域间变化不明显;牙周炎状态下牙槽骨的胶原二级结构发生改变。

#### [参 考 文 献]

[1] Huang XF, Xie MR, Xie YL, *et al.* The roles of osteocytes in alveolar bone destruction in periodontitis[J]. *J Transl Med*, 2020, 18(1): 479.

[2] Huja SS, Fernandez SA, Hill KJ, *et al.* Remodeling dynamics in the alveolar process in skeletally mature dogs[J]. *Anat Rec A Discov Mol Cell Evol Biol*, 2006, 288(12): 1243-1249.

[3] Reznikov N, Shahar R, Weiner S. Bone hierarchical structure in three dimensions[J]. *Acta Biomater*, 2014, 10(9): 3815-3826.

[4] Nalla RK, Kinney JH, Ritchie RO. Mechanistic fracture criteria for the failure of human cortical bone[J]. *Nat Mater*, 2003, 2(3): 164-168.

[5] Raghavan M, Sahar ND, Kohn DH, *et al.* Age-specific profiles of tissue-level composition and mechanical properties in murine cortical bone[J]. *Bone*, 2012, 50(4): 942-953.

[6] Sanz M, Marco Del Castillo A, Jepsen S, *et al.* Periodontitis and cardiovascular diseases: Consensus report[J]. *J Clin Periodontol*, 2020, 47(3): 268-288.

[7] Jacobs R, Fontenele RC, Lahoud P, *et al.* Radiographic diagnosis of periodontal diseases: Current evidence versus innovations[J]. *Periodontol 2000*, 2024, 95(1): 51-69.

[8] Taylor EA, Donnelly E. Raman and Fourier transform infrared imaging for characterization of bone material properties[J]. *Bone*, 2020, 139: 115490.

[9] Ember KJI, Hoeve MA, McAughtrie SL, *et al.* Raman spectroscopy and regenerative medicine: A review[J]. *NPJ Regen Med*, 2017, 2: 12.

[10] Khalid M, Bora T, Al Ghaithi A, *et al.* Raman spectroscopy detects changes in bone mineral quality and collagen cross-linkage in *Staphylococcus* infected human bone[J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 9417.

[11] Prats-Mateu B, Gierlinger N. Tip in-light on: Advantages, challenges, and applications of combining AFM and Raman microscopy on

biological samples[J]. *Microsc Res Tech*, 2017, 80(1): 30-40.

[12] Britton M, Monahan GE, Murphy CG, *et al.* An investigation of composition, morphology, mechanical properties, and microdamage accumulation of human type 2 diabetic bone[J]. *Bone*, 2024, 187: 117190.

[13] Watanabe K, Lewis S, Guo XH, *et al.* Regional variations of jaw bone characteristics in an ovariectomized rat model[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2020, 110: 103952.

[14] Rubin MR, Paschalis EP, Poundarik A, *et al.* Advanced glycation endproducts and bone material properties in type 1 diabetic mice[J]. *PLoS One*, 2016, 11(5): e0154700.

[15] Unal M, Ahmed R, Mahadevan-Jansen A, *et al.* Compositional assessment of bone by Raman spectroscopy[J]. *Analyst*, 2021, 146(24): 7464-7490.

[16] Khan AF, Awais M, Khan AS, *et al.* Raman spectroscopy of natural bone and synthetic apatites[J]. *Appl Spectrosc Rev*, 2013, 48(4): 329-355.

[17] Movasaghi Z, Rehman S, Rehman IU. Raman spectroscopy of biological tissues[J]. *Appl Spectrosc Rev*, 2007, 42(5): 493-541.

[18] Talari ACS, Movasaghi Z, Rehman S, *et al.* Raman spectroscopy of biological tissues[J]. *Appl Spectrosc Rev*, 2015, 50(1): 46-111.

[19] Unal M, Jung H, Akkus O. Novel Raman spectroscopic biomarkers indicate that postyield damage denatures bone's collagen[J]. *J Bone Miner Res*, 2016, 31(5): 1015-1025.

[20] St Dollente Mesias V, Zhang JN, Fu WH, *et al.* Enhanced characterization of protein secondary structure transitions using Raman and SERS measurements combined with 2D correlation spectroscopy and principal component analysis[J]. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, 2025, 343: 126607.

[21] 魏洁雅,徐思群,周学东,等. 牙槽骨修复重建分子调控机制的研究新进展[J]. *四川大学学报(医学版)*, 2024, 55(1): 31-38.

[22] Zhou M, Graves DT. Impact of the host response and osteoblast lineage cells on periodontal disease[J]. *Front Immunol*, 2022, 13: 998244.

[23] Terkawi MA, Matsumae G, Shimizu T, *et al.* Interplay between inflammation and pathological bone resorption: Insights into recent mechanisms and pathways in related diseases for future perspectives[J]. *Int J Mol Sci*, 2022, 23(3): 1786.

[24] 唐苗宁,吴斌,刘懋,等. 基于单轴压缩实验初探人牙槽骨不同部位松质骨力学性能[J]. *口腔医学*, 2023, 43(5): 421-426.

[25] Wu B, Yuan L, Liu M, *et al.* Construction of a viscoelastic model of human cancellous bone in alveolar bone based on bone mineral density distribution[J]. *Materials*, 2023, 16(23): 7427.

[26] Wang FX, Zheng LY, Theopold J, *et al.* Methods for bone quality assessment in human bone tissue: A systematic review[J]. *J Orthop Surg Res*, 2022, 17(1): 174.

[27] Shah FA. Towards refining Raman spectroscopy-based assessment of bone composition[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 16662.

[28] Barth A. Infrared spectroscopy of proteins[J]. *Biochim Biophys Acta*, 2007, 1767(9): 1073-1101.

(收稿日期:2026-01-06)

(本文编辑:徐 晶)