Open Access
DOI:10.3724/zdxbyxb-2024-0019

口腔医学

· 专题报道 ·

正畸治疗患者前牙牙槽骨唇侧骨性凸起研究进展

骆定雯，王思婕，高　璐，陈小燕

浙江大学医学院附属口腔医院 浙江大学口腔医学院 浙江省口腔疾病临床医学研究中心 浙江省口腔生物医学研究重点实验室 浙江大学癌症研究院 口腔生物材料与器械浙江省工程研究中心，浙江 杭州 310006

［摘　要］ 正畸治疗过程中，患者前牙牙槽骨唇侧有时会出现不规则、大小不一的结节性骨性凸起，这与牙槽骨内外表面的差异性骨改建有着密切关系。牙槽骨唇侧骨性凸起不仅会对正畸治疗的美学效果产生负面影响，还可能增加牙周风险。目前认为牙槽骨唇侧骨性凸起形成可能与患者性别、年龄、牙齿移动速度、前牙内收距离有关。唇侧骨性凸起存在一定自限性，若出现不能自行消退的唇侧骨性凸起需通过牙槽骨修整术进行治疗。本文通过文献回顾，系统性介绍正畸过程中前牙牙槽骨唇侧骨性凸起的发生假说、形成的影响因素、潜在生物力学机制及其对应治疗策略，有助于深入理解正畸治疗中牙槽骨改建的规律和相关机制，并为临床提供预防和治疗的理论支持。

［关键词］ 牙槽骨；唇侧骨性凸起；正畸治疗；骨改建；综述
［中图分类号］ R783.5　　［文献标志码］ A

Research progress on labial protuberances of anterior teeth in orthodontic treatment

LUO Dingwen, WANG Sijie, GAO Lu, CHEN Xiaoyan (*The Stomatology Hospital, Zhejiang University School of Medicine, Zhejiang University School of Stomatology, Zhejiang Provincial Clinical Research Center for Oral Diseases, Zhejiang Provincial Key Laboratory of Oral Biomedical Research, Zhejiang University Cancer Center, Zhejiang Provincial Engineering Research Center of Oral Biomaterials and Devices, Hangzhou 310006, China*)

Corresponding author: CHEN Xiaoyan, E-mail: ortho_chenxy@zju.edu.cn, https://orcid.org/0000-0002-4966-1040

收稿日期（Received）：2024-01-18　　**接受日期（Accepted）**：2024-05-16　　**网络预发表日期（Online）**：2024-07-26
基金项目（Funding）：国家自然科学基金（82271008）
第一作者（First author）：骆定雯，硕士研究生，主要从事口腔正畸临床研究；E-mail：22118719@zju.edu.cn；https://orcid.org/0009-0005-7092-4182
通信作者（Corresponding author）：陈小燕，副主任医师，博士生导师，主要从事口腔正畸临床研究；E-mail：ortho_chenxy@zju.edu.cn；https://orcid.org/0000-0002-4966-1040

[**Abstract**] During orthodontic treatment, irregular and varying sized nodular bony protrusions may sometimes appear on the labial side of the patient's anterior alveolar bone, which is closely related to the differential bone remodeling on the inner and outer surfaces of the alveolar bone. Labial protuberances not only affect the aesthetic results of orthodontic treatment, but also pose potential risks to periodontal health. Currently, it is believed that the influencing factors of the formation of the labial protuberances may be related to the patient's gender and age, tooth movement speed, and extent of anterior teeth retraction. Labial protuberances typically resolve spontaneously, however, if persistent, alveoloplasty may be necessary for treatment. This review provides a summary on the occurrence, influencing factors of formation, potential biological mechanisms, and corresponding treatment methods of labial protuberances during orthodontic treatment.

[**Key words**] Alveolar bone; Labial protuberance; Orthodontic treatment; Bone remodeling; Review

[J Zhejiang Univ (Med Sci), 2024, 53(5): 586-592.]

正畸治疗是利用机械力将错位的牙齿移动到合适的位置,通过牙齿移动实现牙槽骨重塑和改善软组织侧貌。牙齿在牙槽骨中近中向及远中向移动一般可以用经典的"压缩-张力"理论解释。但临床实践发现,前牙内收过程中牙槽骨唇侧外表面有骨吸收现象,这是"压缩-张力"理论无法解释的,正畸治疗过程中牙槽骨的骨改建规律及其潜在生物力学机制尚未明确。

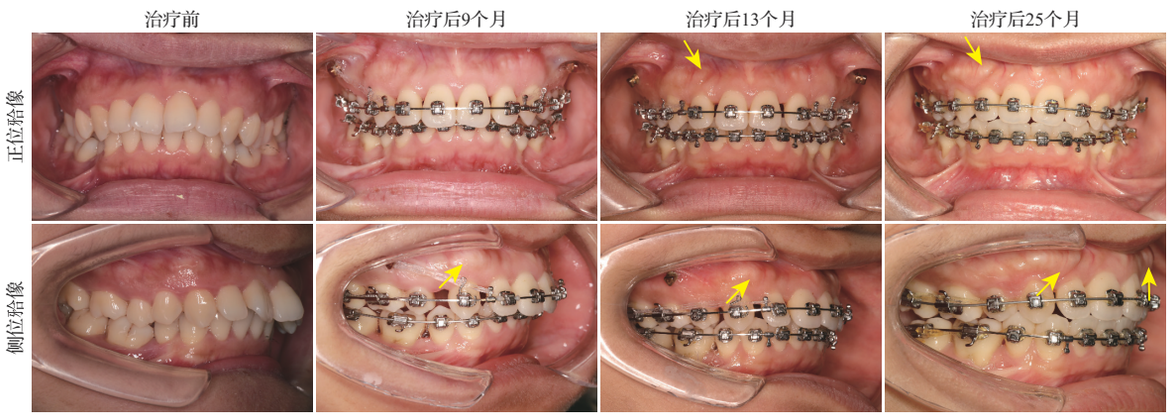
此外,有学者报道部分患者在接受正畸治疗过程中出现了前牙牙槽骨唇侧不规则、结节性的骨性凸起[1],见图1(已获得患者知情同意),这种现象往往出现在前牙大量内收的患者中。在一些文献中,这类骨性凸起被归为牙槽骨外生骨疣,虽然牙槽骨外生骨疣可能出现在未经正畸治疗的人群中,但许多研究发现正畸治疗可能是牙槽骨外生骨疣出现的影响因素之一[2-4]。Chung等[1]基于一系列照片、数字化模型及影像学资料,发现正畸治疗后骨凸所在位置往往位于治疗前牙槽间隔,推测这是牙槽骨差异性改建所致;为了区别于传统牙槽骨外生骨疣,这种正畸治疗后牙槽骨唇侧出现的骨性凸起现象被定义为唇侧骨性凸起。唇侧骨性凸起的存在极大地影响了正畸治疗患者的微笑美学,特别是对于笑线高的患者。除美学风险外,过于明显的凸起也伴随着一定的牙周风险。有临床报道提示,唇侧骨性凸起周围容易发生食物滞留,且刷牙时唇侧骨性凸起对应的牙龈黏膜容易发生创伤性溃疡[4]。严重的唇侧骨性凸起还可导致上唇肌肉紧张、上唇增厚,从而影响患者的侧貌,必要时需通过牙槽骨修整手术进行治疗[5-6]。

本文通过文献回顾,总结前牙牙槽骨唇侧骨性凸起的形成假说,探讨唇侧骨性凸起发生的影响因素,分析唇侧骨性凸起形成的潜在生物力学机制,并进一步提出治疗及预防策略,旨在加深对牙槽骨骨改建的规律及其生物力学机制的理解,同时也为临床正畸治疗提供参考。

1 正畸治疗中牙槽骨唇侧骨性凸起的形成假说

1.1 牙槽骨外生骨疣起源假说

长期以来,人们认为正畸治疗后出现牙槽骨唇侧骨性凸起是响应机械负荷而形成的外生性凸起,与牙槽骨外生骨疣形态学特征相似,均为明显、不规则和坚硬的结节性突起[4, 7-9]。牙槽骨外生骨疣为病因不明且良性的牙槽骨局部外生性过度生长[3, 10],其主要形成机制可能包括遗传因素、环境因素、咀嚼功能亢进和牙槽骨持续性生长[11]。Manosudprasit等[4]报道了正畸治疗过程前牙内收后牙槽骨唇侧出现骨性凸起,认为牙槽骨外生骨疣可能是牙槽骨对咬合创伤的反应,创伤刺激牙槽骨新骨形成以便加固骨小梁,形成一种功能性适应。正畸治疗过程中前牙的快速内收和牙齿整体移动所致的机械刺激也可导致牙槽骨新骨形成,促进了牙槽骨外生骨疣的出现[8]。综上,新骨的形成可能是牙槽骨对正畸力的创伤性反应,引起骨形态发生蛋白的释放,表现为牙



患者接受正畸拔牙矫治后,上前牙区唇侧黏膜处可见骨性凸起,并随着治疗时间增加和前牙内收移动距离增大逐渐凸显. 黄色箭头为唇侧骨性凸起发生处.

图1 正畸治疗过程中前牙牙槽骨唇侧骨性凸起

Figure 1 The labial protuberances on the alveolar bone during orthodontic treatment

槽骨外生骨疣在创伤应激点的骨化。

1.2 牙槽骨差异性改建假说

2019年Chung等[1]发现正畸治疗患者前牙内收后出现牙槽骨唇侧的骨性凸起并不是外生性的。该研究团队在2022年通过一项针对上述现象的流行病学研究,将其定义为唇侧骨性凸起[12]。他们观察到,唇侧骨性凸起往往在前牙内收阶段才开始出现,随着进一步的前牙内收,唇侧骨性凸起更为突出[1]。通过评估连续临床照片、头颅定位侧位片、数字模型和锥形束计算机断层扫描,发现唇侧骨性凸起的最突出点往往位于治疗前牙槽骨的外侧骨表面后方,且唇侧骨性凸起往往发生在治疗前牙槽间隔的位置[12]。因此,他们提出了一种新的猜想——“牙槽骨差异性改建模型”[1],即在伴随前牙内收的牙槽骨骨改建过程中,牙齿唇侧的牙槽骨比牙槽间隔的牙槽骨吸收更多,这种骨改建中的牙槽骨吸收差异造成了唇侧骨性凸起的产生。然而,目前关于这一猜想的研究还相对较少,因此需要更多的证据支持。

综上,关于正畸治疗中牙槽骨唇侧的骨性凸起存在“牙槽骨外生骨疣起源假说”和“牙槽骨差异性改建假说”,两种假说属于不同时期学者们对该现象的不同认知。长期以来,学者们应用牙槽骨外生骨疣的概念认识和解释正畸治疗后发生在牙槽骨唇侧骨性凸起。随着影像学技术的发展,学者们发现正畸治疗出现的这种骨性凸起并不是外生性的,不属于传统意义上牙槽骨外生骨疣,需要重新认识并定义,由此提出唇侧骨性凸起的概念。两者特征比较见表1。

2 牙槽骨唇侧骨性凸起形成的影响因素

2.1 年龄和性别

现有的统计数据显示,成年患者出现唇侧骨性凸起的概率为6.0%~6.9%,而青少年患者出现唇侧骨性凸起的概率仅为0.5%[12];在已报道的病例中,正畸治疗结束后出现唇侧骨性凸起的皆为成年患者[1-3, 15]。由此可见,成年患者出现唇侧骨性凸起的概率远大于青少年患者,这可能是不同年龄阶段正畸牙移动时对机械刺激的反应存在差

表1 牙槽骨外生骨疣与唇侧骨性凸起的特征比较

Table 1 Comparison of characteristics between alveolar bone exostoses and labial protuberances

类 型	形成原因	易发部位	好发年龄	大 小	组织学特征
牙槽骨外生骨疣	可能与遗传因素、环境因素、咀嚼功能亢进和牙槽骨持续性生长、正畸治疗等相关[4, 7, 11, 13]	硬腭、前磨牙-磨牙区域的牙槽骨[13-14]	青春发育期[11]	随着病程时间延长而缓慢增大,最大可达数厘米[7]	较小的牙槽骨外生骨疣可由致密骨形成,较大的牙槽骨外生骨疣可由表面被皮质骨覆盖的松质骨组成[11]
唇侧骨性凸起	正畸治疗[1, 12]	上颌骨侧切牙区域,中切牙和侧切牙之间的牙槽骨区域[1, 12]	成年期[12]	可能随着牙齿内收距离增加而增大[1]	尚不明确

异的缘故[16]:成年患者初始启动反应可能较晚,从而导致整个正畸治疗时间延长,牙槽骨受到机械刺激的持续时间延长[17-18]。研究提示,成年患者牙槽骨的骨转化率更低,可能与血管形成能力降低[19]、骨祖细胞数下降[20]及成纤维细胞密度下降[21]有关,同时表现出牙槽骨密度增加[22],而且牙周膜的细胞代谢活动随着年龄的增长而下降[23-24]。由此推测,与青少年患者比较,成年患者牙槽骨中具有活性的成骨细胞和破骨细胞减少,从而引起总细胞活性和代谢活性下降,导致牙槽骨复合物反应性降低。当牙齿移动时,机械力由牙齿从牙周膜传递到牙槽骨可能存在滞后反应[25],前牙区不同位置的牙槽骨对受到的机械力刺激存在反应上的差异,可能会出现不同程度的牙槽骨改建,从而导致唇侧骨性凸起的发生。此外,男性患者相较于女性患者更容易出现唇侧骨性凸起[12]。

2.2 前牙内收移动距离

前牙内收移动距离即为牙齿往后移动时唇侧牙槽骨须随之发生相应骨改建的距离。唇侧骨性凸起患者在正畸治疗排齐整平阶段牙槽骨唇侧并不会出现明显凸起,而在前牙内收关闭间隙的阶段凸起逐渐明显,并随着内收距离的增大而逐渐加大。在一些不拔牙并推磨牙向后的隐形矫治患者中,出现唇侧骨性凸起者实际前牙移动量超过3 mm[12]。因此,前牙内收移动距离越大,唇侧骨性凸起发生风险越高。研究还发现,涉及拔牙的正畸治疗后中切牙唇侧颈三分之一处的牙槽骨厚度明显增加,这与唇侧骨性凸起常见于切牙唇侧牙根颈三分之一水平处相对应,推测牙齿唇侧牙槽骨和牙槽间隔牙槽骨在前牙内收后的骨改建程度差异可能是唇侧骨性凸起发生的原因,且前牙内收移动距离越大,这种骨改建差异越明显[26]。但现阶段相关研究较少,需要进一步验证。

2.3 前牙内收移动速度

唇侧骨性凸起形成可能与上前牙快速内收导致的唇侧牙槽骨改建速度差异有关。Yodthong等[9]在研究上前牙内收与牙槽骨厚度之间的关系时,统计了牙齿内收关闭间隙所需的时间,发现当上前牙较快速内收时,牙槽骨重塑过程可能无法跟上牙齿的快速移动,唇侧牙槽骨厚度会明显增加,表现为唇侧骨性凸起,且这些骨性凸起位于牙龈缘附近,推测与牙龈缘相应牙槽嵴顶处唇侧牙槽骨厚度及牙齿移动速度密切相关,但无法解释唇侧骨性凸起的不连续性。

3 牙槽骨唇侧骨性凸起形成的潜在生物力学机制

3.1 正畸牙移动的机制

在正畸治疗中,压缩–张力理论是牙槽骨重塑最经典的理论[27-28],即受拉力侧牙槽骨发生新骨沉积,受压力侧牙槽骨发生骨吸收。该理论可以解释唇侧牙槽骨内表面的成骨现象,且已得到验证[29-31]。然而,临床发现前牙内收后牙槽骨不仅内表面发生了骨重塑,外表面也发生了改建:唇侧牙槽骨外表面发生了骨吸收,而腭侧牙槽骨外表面有新骨形成。

唇侧骨性凸起的形成涉及前牙内收时牙槽骨外表面的骨改建,但其机制尚未明确[32],这涉及牙周韧带和牙槽骨的同时重建[33-35]。在理想的前牙内收过程中,唇侧和腭侧的骨改建应发生相同程度变化,同时唇和舌肌肉组织之间的平衡也有助于维持健康的牙周状况。然而,牙槽骨改建或重塑的速度往往慢于牙齿移动的速度,这可能导致唇侧的牙槽骨形态相比治疗前发生一定改变。这些改变与唇侧的牙槽骨内外表面的改建有关。

3.2 牙槽骨外表面改建的机制

为了解释牙齿唇腭向移动时相应牙槽骨外表面的改建机制,有学者提出“牙槽骨弯曲假说”。该假说从力学角度进行了解释,即在牙齿受力后,除了牙周膜变形引发的牙槽骨内侧壁重塑,牙槽骨本身也受到了力的作用,导致沿牙齿移动方向的牙槽骨受挤压弯曲变形,而与牙齿移动方向相反的牙槽骨被拉伸向牙齿[36-38]。同时,也有学者提出“骨机械稳定理论”,描述了骨组织通过简单的反馈通路以适应机械环境的变化,受到高机械负荷的骨区域变得巩固,而受到低机械负荷的骨区域则发生骨吸收[39-42]。结合“牙槽骨弯曲假说”,在对前牙施加唇腭向的正畸力时,张力侧牙周膜的拉伸导致内表面牙槽骨的形成,这种牙槽骨内部受到的拉伸可导致骨膜表面保持在Frost定义的最小有效功能应变力以下[12, 43]。由于牙槽骨随靠近牙周膜区域的骨量增加而增厚,骨膜外表面受到的功能应变力不足,进而触发分解代谢模型,导致唇侧外表面牙槽骨吸收,直至吸收表面的应变力恢复到最佳生理范围。

3.3 “牙槽骨–牙周膜–牙齿”复合模型在唇侧骨

性凸起形成中的作用

近年来有不少关于“牙槽骨–牙周膜–牙齿”复合模型在骨稳态中的作用研究[44-46],在宏观尺度下探究复合体软组织和硬组织交界面的附着成分,以及加载负荷变化对复合体形态、力学性能等特性的影响。其中牙周膜微观结构在调节其与牙槽骨之间的机械生物学刺激(咀嚼力、正畸力等)中发挥关键作用,当牙周膜受到各种机械负荷时,其纤维网络与非纤维蛋白发生相互作用,影响牙槽骨内组织液的流速,从而改变渗透压,影响牙槽骨组织内的营养和氧输送[47]。当“牙槽骨–牙周膜–牙齿”复合物内的细胞暴露在负载的微观机械生物学环境中时会触发一系列生物力学事件,以重塑周围的软组织和硬组织[48]。结合“牙槽骨差异性改建假说”中所述现象(唇侧骨性凸起多发生在正畸治疗前牙槽间隔的位置),推测牙周膜周围的牙槽骨对负荷力的响应比牙槽间隔的牙槽骨更为敏感,在正畸过程中靠近牙周膜的牙槽骨改建效率可能比牙槽间隔的牙槽骨改建效率更高。由此可知,唇侧不同区域牙槽骨的改建效率差异可能导致唇侧骨性凸起的发生。

4 正畸治疗出现牙槽骨唇侧骨性凸起的应对策略

4.1 保守观察

一般正畸治疗后出现的体积较小的唇侧骨性凸起可以暂时观察,不需要立即治疗[4]。Venugopal等[2]报道了一位拔除上下颌前磨牙进行正畸治疗的30岁女性患者在关闭拔牙间隙阶段前牙唇侧黏膜上出现唇侧骨性凸起,但在正畸治疗结束2个月后可观察到唇侧骨性凸起逐渐消退,提示在正畸机械力加载停止后,唇侧骨性凸起可逐渐消退。

4.2 调整矫治器和加力策略

当正畸治疗过程中出现唇侧骨性凸起时,医生可通过重新评估患者的牙齿内收移动距离,或适当调整内收力以降低前牙内收速度,减缓唇侧骨性凸起的形成。如果发现唇侧骨性凸起的形成可能由矫治器的位置或力量不当引起,则可以通过调整矫治器的位置和类型来解决。同时医生可告知患者唇侧骨性凸起形成的影响因素及预后,缓解患者的焦虑心理。

4.3 外科手术治疗

当唇侧骨性凸起体积过大影响美观或带来疼痛或不适时,可以通过局部牙槽骨修整手术以恢复正常的牙槽骨形态。Manosudprasit等[4]报道了一例因门牙前突进行拔牙正畸治疗的28岁女性患者,排齐整平5个月内完成上下前牙内收及关闭拔牙间隙,发现上下前牙唇侧的附着龈处出现了唇侧骨性凸起,呈坚硬的椭圆形,患者清洁牙齿时易出现创伤性溃疡,因此患者最终进行手术治疗,手术效果良好,术区愈合后未见明显凸起。此外,Venugopal等[2]报道了两例分别为27岁和28岁的女性患者在正畸治疗一年后出现唇侧骨性凸起,停止正畸加力3个月后发现唇侧骨性凸起未自发缓解,因此患者接受了手术治疗,最终手术效果良好,唇侧牙槽骨及黏膜恢复了正常的组织结构。

牙槽骨修整手术流程一般如下:在术区进行局部麻醉,在上颌牙槽骨唇颊侧第一前磨牙区域到对侧第一前磨牙区域行沟状切口,翻开全层黏骨膜瓣后可观察到结节性骨区。使用硬质合金钻头去除唇侧骨性凸起,配合等渗氯化钠溶液大量冲洗,然后用骨锉使牙槽骨表面光滑。清洁术区后,修剪和重新定位皮瓣,用5.0丝线悬吊缝合。患者术后接受抗生素、镇痛药和氯己定漱口水等药物治疗。

5 结 语

随着经济水平发展,人们对美的追求逐渐增强,不少人通过正畸治疗改善侧貌,但唇侧骨性凸起的出现降低了患者最终的美学效果,并带来一定程度的牙周风险。目前,关于唇侧骨性凸起形成的病因尚不明确,可能与患者性别、年龄、牙齿移动速度、前牙内收距离相关。唇侧骨性凸起的形成涉及前牙唇侧牙槽骨内外表面的改建,其中牙齿唇侧牙槽骨与牙槽间隔牙槽骨的差异性改建可能是其发生的主要原因,但相关研究文献较少,缺乏足够的实验依据,因此需要更多研究以完善现有的理论。临床实践中,对于在正畸治疗过程出现唇侧骨性凸起的患者,医生需要根据个体之间牙槽骨改建能力的差异,重新评估前牙内收的设计移动量,作出必要的调整,并注意正畸力大小以控制前牙内收速度,从而保证正畸治疗的最终效果,避免唇侧骨性凸起的发生。

志谢 研究得到国家自然科学基金(82271008)支持

Acknowledgements This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (82271008)

医学伦理 研究不涉及人体或动物实验

Ethical approval This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of Interests The authors declare that there is no conflict of interests

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

参考文献(References)

[1] CHUNG C J, JANG W, PIERS C, et al. Differential alveolar bone modeling after orthodontic retraction[J]. **J Am Dent Assoc**, 2019, 150(4): 313-320.

[2] VENUGOPAL A, BUNTHOUEN N, HASAN H S, et al. Alveolar bone exostoses following orthodontic treatment. Diagnostic considerations and clinical management [J/OL]. **Clin Case Rep**, 2023, 11(3): e7000.

[3] AGRAWAL N, KALLURY A, AGRAWAL K, et al. Alveolar bone exostoses subsequent to orthodontic implant placement[J]. **BMJ Case Rep**, 2013, 2013: bcr2012007951.

[4] MANOSUDPRASIT A, CHANTADILOK W, MANOSUDPRASIT M. Management of alveolar bone exostosis after orthodontic treatment[J]. **J Clin Orthod**, 2021, 55(4): 401-413.

[5] LIN J C, YEH C L, LIOU E J, et al. Treatment of skeletal-origin gummy smiles with miniscrew anchorage [J]. **J Clin Orthod**, 2008, 42(5): 285-296.

[6] NGUYEN T, BAEK E S, HWANG S, et al. Nonsurgical and nonprosthetic camouflage treatment of skeletal Class Ⅱ open bite with bilaterally missing lower first molars[J]. **Angle Orthod**, 2019, 89(3): 505-517.

[7] LIMONGELLI L, TEMPESTA A, CAPODIFERRO S, et al. Oral maxillary exostosis[J]. **Clin Case Rep**, 2019, 7(1): 222-223.

[8] HORNING G M, COHEN M E, NEILS T A. Buccal alveolar exostoses: prevalence, characteristics, and evidence for buttressing bone formation[J]. **J Periodontol**, 2000, 71(6): 1032-1042.

[9] YODTHONG N, CHAROEMRATROTE C, LEETHANAKUL C. Factors related to alveolar bone thickness during upper incisor retraction[J]. **Angle Orthod**, 2013, 83(3): 394-401.

[10] LU M, KANG T, KONG Y, et al. Prevalence of oral exostoses in northern China during the past six millennia-from a sex and age perspective[J]. **J Craniofac Surg**, 2023, 34(2): 768-771.

[11] MEDSINGE S V, KOHAD R, BUDHIRAJA H, et al. Buccal exostosis: a rare entity[J]. **J Int Oral Health**, 2015, 7(5): 62-64.

[12] LEE W, JANG H, PARK S H, et al. Incidence and clinical risk factors associated with the development of labial protuberances after orthodontic treatment[J]. **Am J Orthod Dentofacial Orthop**, 2022, 162(6): 890-897.

[13] JAINKITTIVONG A, LANGLAIS R P. Buccal and palatal exostoses: prevalence and concurrence with tori [J]. **Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod**, 2000, 90(1): 48-53.

[14] KUMAR SINGH A, SULUGODU RAMACHANDRA S, ARORA S, et al. Prevalence of oral tori and exostosis in Malaysian population—a cross-sectional study[J]. **J Oral Biol Craniofac Res**, 2017, 7(3): 158-160.

[15] LIM Y N, YANG B E, BYUN S H, et al. Three-dimensional digital image analysis of skeletal and soft tissue points A and B after orthodontic treatment with premolar extraction in bimaxillary protrusive patients [J]. **Biology (Basel)**, 2022, 11(3): 381

[16] REN Y, MALTHA J C, KUIJPERS-JAGTMAN A M. Optimum force magnitude for orthodontic tooth movement: a systematic literature review[J]. **Angle Orthod**, 2003, 73(1): 86-92.

[17] SCHUBERT A, JÄGER F, MALTHA J C, et al. Age effect on orthodontic tooth movement rate and the composition of gingival crevicular fluid: a literature review[J]. **J Orofac Orthop**, 2020, 81(2): 113-125.

[18] REN Y, MALTHA J C, VAN'T HOF M A, et al. Cytokine levels in crevicular fluid are less responsive to orthodontic force in adults than in juveniles[J]. **J Clin Periodontol**, 2002, 29(8): 757-762.

[19] DYER G S, HARRIS E F, VADEN J L. Age effects on orthodontic treatment: adolescents contrasted with adults [J]. **Am J Orthod Dentofacial Orthop**, 1991, 100(6): 523-530.

[20] CEI S, KANDLER B, FÜGL A, et al. Bone marrow stromal cells of young and adult rats respond similarly to platelet-released supernatant and bone morphogenetic protein-6 *in vitro*[J]. **J Periodontol**, 2006, 77(4): 699-706.

[21] KRIEGER E, HORNIKEL S, WEHRBEIN H. Age-related changes of fibroblast density in the human periodontal ligament[J]. **Head Face Med**, 2013, 9: 22.

[22] OHIOMOBA H, SONIS A, YANSANE A, et al. Quantitative evaluation of maxillary alveolar cortical bone thickness and density using computed tomography imaging[J]. **Am J Orthod Dentofacial Orthop**, 2017, 151(1): 82-91.

[23] LUDER H U. Anatomy and physiology of the periodontium in adults under the conditions of orthodontic tooth movement[J]. **Dtsch Zahnarztl Z**, 1990, 45(2):

74-77.

[24] JÄGER A, RADLANSKI R J. Alveolar bone remodelling following orthodontic tooth movement in aged rats. An animal experimental study[J]. **Dtsch Stomatol (1990)**, 1991, 41(11): 399-406.

[25] VARDIMON A D, OREN E, BEN-BASSAT Y. Cortical bone remodeling/tooth movement ratio during maxillary incisor retraction with tip versus torque movements[J]. **Am J Orthod Dentofacial Orthop**, 1998, 114(5): 520-529.

[26] DOMINGO-CLÉRIGUES M, MONTIEL-COMPANY J M, ALMERICH-SILLA J M, et al. Changes in the alveolar bone thickness of maxillary incisors after orthodontic treatment involving extractions—a systematic review and meta-analysis[J/OL]. **J Clin Exp Dent**, 2019, 11(1): e76-e84.

[27] WISE G E, KING G J. Mechanisms of tooth eruption and orthodontic tooth movement[J]. **J Dent Res**, 2008, 87(5): 414-434.

[28] LI Y, JACOX L A, LITTLE S H, et al. Orthodontic tooth movement: the biology and clinical implications [J]. **Kaohsiung J Med Sci**, 2018, 34(4): 207-214.

[29] VAN SCHEPDAEL A, VANDER SLOTEN J, GERIS L. A mechanobiological model of orthodontic tooth movement[J]. **Biomech Model Mechanobiol**, 2013, 12 (2): 249-265.

[30] YAMAGUCHI M. RANK/RANKL/OPG during orthodontic tooth movement[J]. **Orthod Craniofac Res**, 2009, 12(2): 113-119.

[31] GARLET T P, COELHO U, SILVA J S, et al. Cytokine expression pattern in compression and tension sides of the periodontal ligament during orthodontic tooth movement in humans[J]. **Eur J Oral Sci**, 2007, 115 (5): 355-362.

[32] ZHENG Y, ZHU C, ZHU M, et al. Difference in the alveolar bone remodeling between the adolescents and adults during upper incisor retraction: a retrospective study[J]. **Sci Rep**, 2022, 12(1): 9161.

[33] MEIKLE M C. The tissue, cellular, and molecular regulation of orthodontic tooth movement: 100 years after Carl Sandstedt[J]. **Eur J Orthod**, 2006, 28(3): 221-240.

[34] JIANG N, GUO W, CHEN M, et al. Periodontal ligament and alveolar bone in health and adaptation: tooth movement[J]. **Front Oral Biol**, 2016, 18: 1-8.

[35] 贺 红. 正畸牙移动中牙周界限的探讨[J]. **中华口腔医学杂志**, 2021, 56(10): 966-970.
HE Hong. Periodontal limits of orthodontic tooth movement[J]. **Chinese Journal of Stomatology**, 2021, 56 (10): 966-970. (in Chinese)

[36] MASELLA R S, MEISTER M. Current concepts in the biology of orthodontic tooth movement[J]. **Am J Orthod Dentofacial Orthop**, 2006, 129(4): 458-468.

[37] BAUMRIND S. A reconsideration of the propriety of the "pressure-tension" hypothesis[J]. **Am J Orthod**, 1969, 55(1): 12-22.

[38] MELSEN B. Tissue reaction to orthodontic tooth movement—a new paradigm[J]. **Eur J Orthod**, 2001, 23 (6): 671-681.

[39] FROST H M. Bone's mechanostat: a 2003 update[J]. **Anat Rec A Discov Mol Cell Evol Biol**, 2003, 275 (2): 1081-1101.

[40] FROST H M. Bone "mass" and the "mechanostat": a proposal[J]. **Anat Rec**, 1987, 219(1): 1-9.

[41] LEREBOURS C, BUENZLI P R. Towards a cell-based mechanostat theory of bone: the need to account for osteocyte desensitisation and osteocyte replacement[J]. **J Biomech**, 2016, 49(13): 2600-2606.

[42] FERRETTI J L, COINTRY G R, CAPOZZA R F, et al. Bone mass, bone strength, muscle-bone interactions, osteopenias and osteoporoses[J]. **Mech Ageing Dev**, 2003, 124(3): 269-279.

[43] CHOU H Y, JAGODNIK J J, MÜFTÜ S. Predictions of bone remodeling around dental implant systems[J]. **J Biomech**, 2008, 41(6): 1365-1373.

[44] BEN-ZVI Y, MARIA R, PIERANTONI M, et al. Response of the tooth-periodontal ligament-bone complex to load: a microCT study of the minipig molar[J]. **J Struct Biol**, 2019, 205(2): 155-162.

[45] HO S P, KURYLO M P, FONG T K, et al. The biomechanical characteristics of the bone-periodontal ligament-cementum complex[J]. **Biomaterials**, 2010, 31(25): 6635-6646.

[46] NIVER E L, LEONG N, GREENE J, et al. Reduced functional loads alter the physical characteristics of the bone-periodontal ligament-cementum complex[J]. **J Periodontal Res**, 2011, 46(6): 730-741.

[47] SPINGARN C, WAGNER D, RÉMOND Y, et al. Theoretical numerical modeling of the oxygen diffusion effects within the periodontal ligament for orthodontic tooth displacement[J]. **J Cell Immunother**, 2018, 4(1): 44-47.

[48] ZHONG J, SHIBATA Y, WU C, et al. Functional non-uniformity of periodontal ligaments tunes mechanobiological stimuli across soft- and hard-tissue interfaces [J]. **Acta Biomater**, 2023, 170: 240-249.

[本文编辑 沈 敏 沈 洁]