

基于锥形束CT数据评估无托槽隐形矫治成年患者拔牙内收后上颌前牙区牙槽骨变化的追踪研究

洪欣玉 张文轩 戚思瑶 杨兰 沈文欣 刘剑

南昌大学附属口腔医院正畸科 江西省口腔生物医学重点实验室

江西省口腔疾病临床医学研究中心, 南昌 330006

[摘要] **目的** 借助锥形束CT (CBCT) 评估上颌前突患者运用无托槽隐形矫治技术拔牙矫治前 (T1)、后 (T2) 及保持期 (T3) 的上颌前牙区牙槽骨高度与厚度变化, 为临床上使用无托槽隐形矫治器安全内收前牙提供一定参考。**方法** 本回顾性研究纳入15例上颌前突患者 (男性2例, 女性13例), 拔除2颗上颌第一前磨牙并采用无托槽隐形矫治技术内收前牙。收集患者治疗前、治疗后及随访期的CBCT影像资料, 测量上颌前牙区各牙位唇腭侧、近远中向牙槽骨高度, 唇腭侧、总牙槽骨厚度变化。采用SPSS 26.0软件对测量数据进行统计学分析, 探究正畸阶段与保持阶段牙槽骨高度、厚度的变化情况, 并检验2个阶段牙槽骨变化的相关性。**结果** 正畸治疗后, 上颌前牙腭侧及近中牙槽骨高度显著减小 ($P<0.05$), 上颌中切牙唇侧根中、根尖部厚度显著增加, 上颌侧切牙、上颌尖牙腭侧根颈部牙槽骨显著变薄 ($P<0.05$)。保持阶段上颌中切牙唇腭侧牙槽骨高度显著增加 (腭侧牙槽骨高度增加量 0.46 ± 0.57 mm, $P<0.05$), 上颌侧切牙、尖牙腭侧牙槽骨厚度持续减小, 但差异不具有统计学意义 ($P>0.05$)。治疗期牙槽骨吸收量与保持期牙槽骨再生量呈负相关 (上颌中切牙唇侧高度 $r=-0.597$, $P<0.05$)。**结论** 使用无托槽隐形矫治器内收上前牙后, 治疗前后相比, 上颌前牙近中、腭侧牙槽骨高度显著降低; 上颌侧切牙、上颌尖牙根颈部及根中部腭侧牙槽骨厚度显著减少, 上颌中切牙唇侧牙槽骨厚度在根中、根尖部显著增加。保持期牙槽骨高度和厚度部分恢复, 但未达治疗前水平, 治疗期骨吸收程度可能影响保持期修复潜力。

[关键词] 无托槽隐形矫治; 前牙内收; 上颌前突; 牙槽骨高度; 牙槽骨厚度

[中图分类号] R783.5 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/hxkq.2025.2025316



本文链接

开放科学标识码

Follow-up study evaluating morphological changes in alveolar bone in the maxillary anterior region after extraction retraction in adult patients treated with clear aligners on the basis of cone beam computed tomography data

Hong Xinyu, Zhang Wenxuan, Qi Siyao, Yang Lan, Shen Wenxin, Liu Jian

Dept. of Orthodontics, Affiliated Stomatological Hospital of Nanchang University & Jiangxi Provincial Key Laboratory of Oral Biomedicine & Jiangxi Provincial Clinical Research Center for Oral Diseases, Nanchang 330006, China

Correspondence: Liu Jian, E-mail: 1052604322@qq.com

[Abstract] **Objective** Alveolar bone height and thickness changes in the maxillary anterior region were assessed before treatment (T1), after treatment (T2), and during the retention phase (T3) in patients with maxillary protrusion treated with clear aligners combined with premolar extraction. The aim was to provide clinical insights for safely retracting anterior teeth with clear aligners. **Methods** This retrospective study included 15 patients (2 males and 13 females) with maxillary protrusion, who underwent bilateral maxillary first premolar extraction and anterior tooth retraction with clear aligners. Cone beam computed tomography images were collected at T1, T2, and T3 (≥ 18 months post-treatment) for the measurement of vertical alveolar bone height (labial, palatal, mesial, and distal as-

[收稿日期] 2025-08-01

[第一作者] 洪欣玉, 住院医师, 硕士, E-mail: 306364947@qq.com

[通信作者] 刘剑, 主任医师, 副教授, 硕士, E-mail: 1052604322

@qq.com

tion with clear aligners. Cone beam computed tomography images were collected at T1, T2, and T3 (≥ 18 months post-treatment) for the measurement of vertical alveolar bone height (labial, palatal, mesial, and distal as-

pects) and horizontal alveolar bone thickness (labial, palatal, and total). Statistical analysis was performed using SPSS 26.0, and changes across phases and correlations were assessed. **Results** After orthodontic treatment, the palatal and mesial alveolar bone height of the maxillary anterior teeth significantly decreased ($P<0.05$). Concurrently, the labial midroot and apical thickness of the maxillary central incisors showed a significant increase, whereas the palatal cervical alveolar bone of the maxillary lateral incisors and canines exhibited significant thinning ($P<0.05$). At T3, the labio-palatal alveolar bone height of the maxillary central incisors significantly increased (palatal height increase: $0.46\text{ mm}\pm 0.57\text{ mm}$; $P<0.05$). Although the palatal alveolar bone thickness of the maxillary lateral incisors and canines continued to decrease, the differences were not statistically significant ($P>0.05$). A negative correlation was observed between alveolar bone resorption during treatment and bone regeneration during retention (labial height of maxillary central incisors: $r=-0.597$, $P<0.05$). **Conclusion** After the retraction of maxillary anterior teeth with clear aligners, the alveolar bone height on the mesial and palatal sides of the upper anterior teeth showed considerable reduction. The palatal alveolar bone thickness at the cervical and middle root levels of the upper lateral incisors and canines decreased remarkably. By contrast, the labial alveolar bone thickness at the middle and apical root levels of the upper central incisors significantly increased. At T3-T2, the partial recovery of alveolar bone height and thickness was observed, but pretreatment levels were not reached. Notably, the degree of bone resorption during treatment may influence the remodeling potential at T3.

[Key words] clear aligner; anterior tooth retraction; maxillary protrusion; alveolar bone height; alveolar bone thickness

上颌前突是临床中常见的错殆畸形之一,患者常伴随切牙过度唇倾,前牙深覆盖,上前牙前突,开唇露齿,牙槽骨或牙齿的前突严重影响患者的侧貌和牙周组织,临床上通常采取拔除第一前磨牙,最大支抗内收前牙的方法来改善侧貌^[1]。对于上颌前突患者来说,前牙区牙槽骨薄,移动范围大,在内收过程中可能会使牙根突破牙槽骨的“解剖学限制”,接触到牙槽骨的骨皮质,引起牙根及牙槽骨吸收,出现骨开窗、骨开裂等并发症^[2]。

无托槽隐形矫治技术具有美观、可摘、舒适等优点,已成为目前主流矫治器之一^[3],然而在正畸治疗中,无托槽隐形矫治技术与固定矫治技术相比,对牙周硬组织的影响谁更具优势,至今尚无定论^[4]。

目前关于无托槽隐形矫治治疗前后的牙槽骨形态变化的研究较少,对治疗结束后牙槽骨高度和厚度变化的相关追踪研究尚未见报道。本研究借助锥形束CT (cone beam computed tomography, CBCT) 技术,针对采用无托槽隐形矫治,拔除2颗上颌第一前磨牙并内收上前牙,且矫治结束至少18个月的上颌前突成年患者展开追踪分析。分析对比矫治前、矫治后及随访期牙槽骨形态变化特点,为临床医师对上颌前突患者使用无托槽隐形矫治器进行前牙内收提供一定参考。

1 材料和方法

本研究为回顾性研究,研究已通过南昌大学附属口腔医院医学伦理委员会审查批准,伦理审查编号为:2024第(071)号。

1.1 研究对象

样本来源于2016年—2019年间在南昌大学附属口腔医院正畸科寻求治疗的患者群体。依据既定的纳入与排除准则,对患者进行筛选。初始选取了16例患者,后因1例患者资料缺失,最终成功收集到15例患者的数据,其中男性2例,女性13例,平均年龄为(31.33 ± 6.46)岁。

纳入标准:1)上牙列完整,上中切牙长轴与前颅底平面相交的下内角(U1-SN角) $>105^\circ$,上前牙拥挤度 $\leq 4\text{ mm}$,有前突主诉^[5],年龄 ≥ 18 岁;2)使用无托槽隐形矫治器;3)矫治设计需拔除上颌双侧第一前磨牙,上颌使用种植钉增强支抗,进行前牙大量内收,下颌不限;4)治疗前X线片及临床检查显示无牙周病,无附着丧失;5)无正畸治疗史、牙外伤史、颞下颌关节疾病史,女性未处于妊娠期,无影响骨代谢的系统性疾病;6)口腔卫生良好,患者按时复诊并按医嘱佩戴矫治器,依从性良好;7)病例资料完整,CBCT影像清晰;8)治疗结束后咬合关系良好,无咬合干扰。

排除标准：1) 治疗前后影像资料不完整者；2) 患有全身性系统性疾病；3) 上前牙拥挤度>4 mm，上前牙数目形态异常、形态不完整及异位萌出者；4) 术后保持时间不满18个月者。

1.2 治疗过程

所有纳入病例均采用 Invisalign 矫治器进行拔牙矫治，上颌拔除双侧第一前磨牙，下颌不限。所有患者被告知每日需佩戴隐形矫治器时长为20~22 h，矫治器更换时间为7~10 d 1副，每日摘戴时需配合咬胶以达到矫治效果。患者方案中上颌牙齿移动步骤如下：磨牙向后倾斜以实现备抗，之后尖牙进行远中移动，远移2 mm后前牙整体内收，最后完成后牙的近中移动。所有患者上颌均使用种植钉增强支抗。

1.3 图像拍摄及处理

使用美国 Kavo Dental GmbH 公司制造的专业设备实施 CBCT，并运用德国西诺德公司生产的 ORTHOPHOS XG5 设备进行头颅侧位 X 线片拍摄。在 CBCT 扫描过程中，技术参数设定为：管电压

120 kV，管电流 5 mA，曝光时间 26.9 s，层厚 0.25 mm，扫描视野 16 cm×13 cm，扫描范围呈 360° 环形；头颅侧位 X 线片的拍摄参数为：管电压 77 kV，管电流 14 mA，曝光时间 14.9 s。拍摄时间点界定为治疗前 (T1)、治疗完成即刻 (T2) 及保持期不少于 18 个月时 (T3)。经采集所获得的全部 CBCT 影像数据，均依据医学数字成像和通信 (DICOM) 标准格式进行存储。

1.4 图像测量

将患者的 CBCT 资料导入 Dolphin Imaging 11.9，三维重建后进行相关测量 (图 1)。

1.4.1 测量平面的获取

在横断面上选择要测量的牙位，调整矢状向截面 (红线) 通过颊舌面最突点 (图 2A)；冠状面上调整矢状向截面 (红线) 通过牙长轴 (图 2B)，再调整轴向截面 (蓝线)，使其通过左侧釉牙骨质界；矢状面上调整冠状向截面 (绿线) 通过牙长轴 (图 2C)。重复以上步骤，进一步调整平面，以获得牙齿矢状面上最大颊舌截面面积^[6-8]。

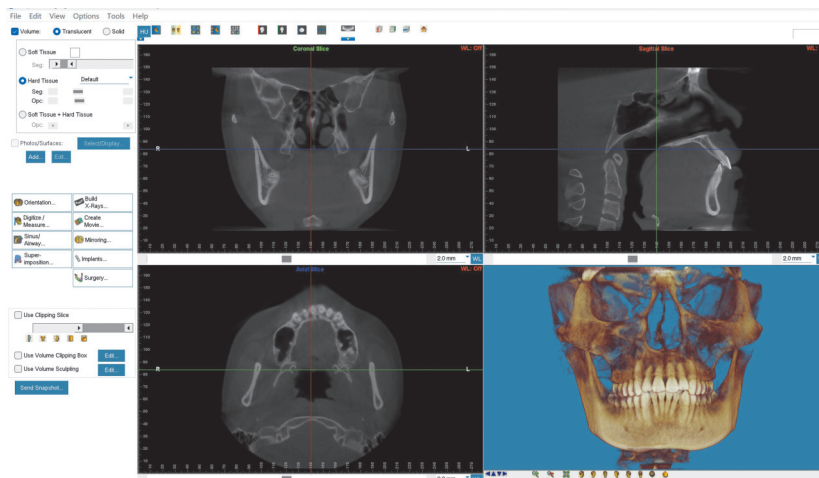
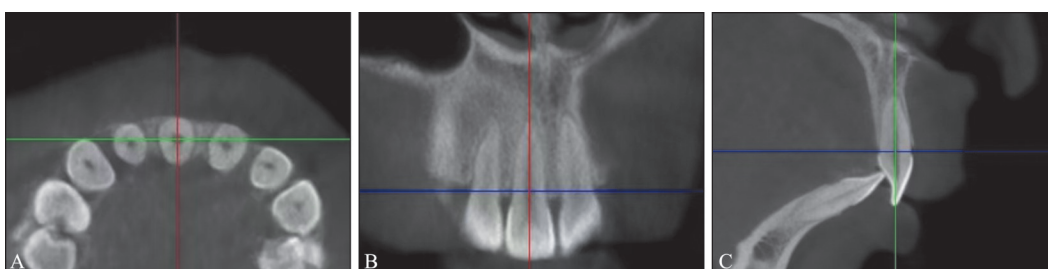


图 1 CBCT 三维重建

Fig 1 CBCT 3D reconstruction



A: 横断面; B: 冠状面; C: 矢状面。

图 2 测量平面的获取

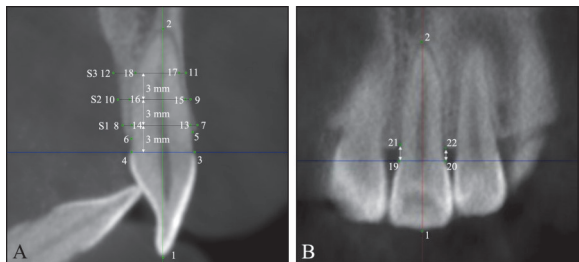
Fig 2 Acquisition of measurement plane

1.4.2 标记点

沿牙长轴自唇腭侧釉牙骨质界连线往根尖方

向每隔 3 mm 作一个与唇腭侧釉牙骨质界连线平行的线，记为 S1、S2、S3，分别代表牙根颈部、根

中部、根尖部^[8]。S1、S2、S3与唇腭侧骨皮质及牙根唇腭侧固有牙槽骨交点分别标为点7~18(图3)。



A: 矢状面; B: 冠状面。线条S1、S2、S3分别为牙根颈部、根中部、根尖部平面; 点1为前牙切缘点; 点2为前牙根尖点; 点3、4为唇、腭侧釉质牙骨质界点; 点5、6为唇、腭侧牙槽嵴顶; 点7、8为S1平面与唇、腭侧骨皮质交点; 点9、10为S2平面与唇、腭侧骨皮质交点; 点11、12为S3平面与唇、腭侧骨皮质交点; 13、14: S1与牙槽窝内唇、腭侧固有牙槽骨交点; 15、16: S2与牙槽窝内唇、腭侧固有牙槽骨交点; 17、18: S3与牙槽窝内唇、腭侧固有牙槽骨交点; 19、20: 近、远中釉牙骨质界点; 21、22: 近、远中牙槽嵴顶。

图3 矢状面和冠状面测量标记点

Fig 3 Sagittally and coronally measurement landmarks

1.4.3 测量项目

测量项目如下。唇侧釉牙骨质界-牙槽嵴顶距离(LVBL): 点3—点5在牙长轴上连线长度; 腭侧釉牙骨质界-牙槽嵴顶距离(PVBL): 点4—点6在牙长轴上连线长度; 根颈部牙槽骨总厚度(TB-T1): 点7—点8连线长度; 根中部牙槽骨总厚度(TBT2): 点9—点10连线长度; 根尖部牙槽骨总厚度(TBT3): 点11—点12连线长度; 唇侧根颈部牙槽骨厚度(LTBT1): 点7—点13连线长度;

唇侧根中部牙槽骨厚度(LTBT2): 点9—点15连线长度; 唇侧根尖部牙槽骨厚度(LTBT3): 点11—点17连线长度; 腭侧根颈部牙槽骨厚度(PTBT1): 点8—点14连线长度; 腭侧根中部牙槽骨厚度(PTBT2): 点10—点16连线长度; 腭侧根尖部牙槽骨厚度(PTBT3): 点12—点18连线长度; 近中釉牙骨质界-牙槽嵴顶距离(MVBL): 点19—点21在牙长轴上连线长度; 远中釉牙骨质界-牙槽嵴顶距离(DVBL): 点20—点22在牙长轴上连线长度。

1.4.4 牙冠移动量的测量

使用Dolphin Imaging 11.9软件进行治疗前与治疗后上颌骨的三维重叠, 以前颅底区域为参照区域, 进行基于体素的三维重叠^[9](图4、5)。在T1-T2三维重叠模型上测量牙齿移动量, 测量平面上上颌中切牙切缘的位移 ΔI 投影在水平向(蓝线)的分量 ΔI_x 即为切缘的水平向位移, 舌向移动为正值, 唇向移动为负值(图6)。 ΔI 投影在垂直向(绿线)的分量 ΔI_y 即为切缘的垂直向位移, 龈向移动为正值, 骀向移动为负值。

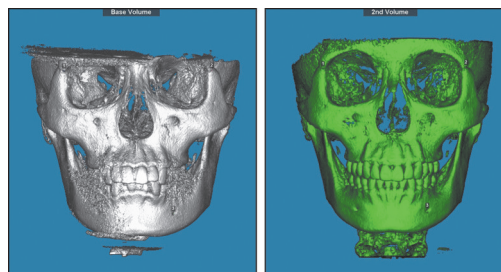


图4 T1和T2的3D图像进行初步配准

Fig 4 Preliminary registration of T1 and T2 3D images

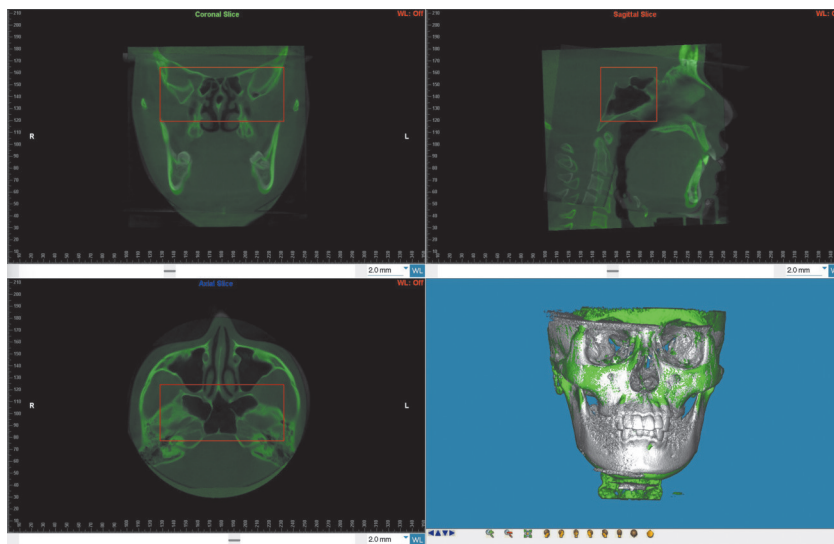


图5 基于体素的重叠

Fig 5 Voxel-based overlap

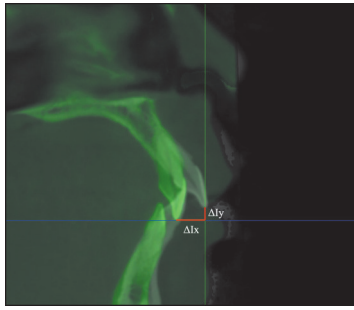


图 6 切缘移动量的测量

Fig 6 Measurement of tooth movement

1.4.5 前牙唇倾角的测量

将患者治疗前后头颅侧位片导入 Winceph 9.0 软件，测量并记录 U1-SN 角。

1.5 统计学分析

对于本实验设计使用的重复测量方差分析检验方法，使用 G*Power 3.1 软件，显著性水平设定为 0.05，统计功效 (power) 为 0.90，以预实验结果上颌尖牙近中釉牙骨质界到牙槽嵴顶的距离 (T1: 1.56 mm±0.63 mm, T2: 1.92 mm±0.49 mm, T3: 2.10 mm±0.89 mm) 作为观测指标，相关系数 0.5，球形检测相关性 1，计算出效应量为 0.44，所需样本量为 13 例患者，每组至少 26 颗牙齿。

采用 SPSS 26.0 统计软件进行数据分析，由同

一研究者完成上述项目的测量并在至少间隔 4 周进行重复测量，进行组内相关系数分析检验 2 次测量的一致性。所有计量资料均采用均数±标准差表示，采用 Shapiro-Wilk 检验对数据进行正态性检验，T1、T2 和 T3 时的组间比较，数据呈正态分布，采用重复测量方差分析，数据呈非正态分布，采用 Friedman 检验。保持阶段 (T3-T2) 与正畸阶段 (T2-T1) 牙槽骨高度和厚度变化量的相关性分析，以及内收量、压低量与牙槽骨高度和厚度变化量之间的相关性分析，若数据呈正态分布，采用 Pearson 相关性分析，若数据为非正态分布，则选用 Spearman 相关性分析。相关系数 $|r| < 0.2$ 为极弱相关或无相关， $0.2 \leq |r| < 0.4$ 为弱相关， $0.4 \leq |r| < 0.6$ 为中等程度相关， $0.6 \leq |r| < 0.8$ 为强相关， $|r| \geq 0.8$ 为极强相关^[8]。检测水准为双侧 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果

2.1 牙槽骨高度的变化

正畸阶段 (T2-T1)，上颌中切牙 LVBL 显著增加 ($P < 0.05$)，上颌前牙 PVBL、MVBL 显著增加 ($P < 0.05$)。保持阶段 (T3-T2)，上颌中切牙 LVBL、PVBL 显著减小 ($P < 0.05$) (表 1)。

表 1 矫治前后及保持阶段上前牙牙槽骨高度的比较

Tab 1 Comparison of alveolar bone height in the maxillary anterior region pre-treatment, post-treatment, and during the retention phase n=15

测量项目		T1	T2	T3	P 值			
					T2 和 T1	T3 和 T2	T3 和 T1	Overall
上颌中切牙	LVBL	1.92±0.68	2.48±0.83	2.12±0.82	0.002 ^{b*}	0.012 ^{b*}	0.180 ^b	0.000 ^{b*}
	PVBL	1.51±0.56	2.27±0.71	1.81±0.58	0.000 ^{b*}	0.003 ^{b*}	0.636 ^b	0.000 ^{b*}
	MVBL	1.59±0.44	2.23±0.87	1.63±0.41	0.023 ^{a*}	0.056 ^a	1.000 ^a	0.032 ^{a*}
	DVBL	1.80±0.50	2.08±0.47	2.00±0.50	0.186 ^a	1.000 ^a	0.522 ^a	0.165 ^a
上颌侧切牙	LVBL	2.20±0.87	2.05±0.80	2.20±0.83	-	-	-	0.964 ^b
	PVBL	1.42±0.37	1.85±0.55	1.76±0.50	0.002 ^{b*}	1.000 ^a	0.005 ^{a*}	0.002 ^{a*}
	MVBL	1.73±0.61	2.14±0.58	2.01±0.64	0.000 ^{b*}	0.045 ^{b*}	0.045 ^{b*}	0.000 ^{b*}
	DVBL	2.24±0.55	2.26±0.66	2.15±0.63	-	-	-	0.218 ^b
上颌尖牙	LVBL	2.13±0.87	2.14±0.72	2.19±0.82	1.000 ^a	1.000 ^a	1.000 ^a	0.863 ^a
	PVBL	2.10±0.98	2.97±1.38	2.83±1.36	0.029 ^{b*}	1.000 ^b	0.043 ^{b*}	0.015 ^{b*}
	MVBL	1.68±0.84	2.06±0.77	2.01±0.57	0.001 ^{b*}	1.000 ^b	0.001 ^{b*}	0.000 ^{b*}
	DVBL	1.95±0.59	2.19±0.80	2.07±0.79	0.218 ^a	0.781 ^a	0.827 ^a	0.124 ^a

注：a 表示使用重复测量方差分析，b 表示使用 Friedman 检验，* $P < 0.05$ 。

2.2 牙槽骨厚度的变化

正畸阶段 (T2-T1)，上颌中切牙 LTBT2、LTBT3 及上颌侧切牙 LTBT1、LTBT3 显著增加 ($P < 0.05$)。随访期相对于治疗前，上颌中切牙 LTBT1、LTBT2、LTBT3 显著增加 (表 2)。

2.3 T2-T1 期与 T3-T2 期上前牙牙槽骨高度变化量的相关性

上颌中切牙唇腭侧及近远中、侧切牙腭侧、尖牙唇侧及远中牙槽骨高度，在治疗期与随访期的变化呈负相关 (表 3)。

表 2 矫治前后及保持阶段上前牙牙槽骨厚度的比较

Tab 2 Comparison of alveolar bone thickness in the maxillary anterior region pre-treatment, post-treatment, and during the retention phase n=15

测量项目	T1	T2	T3	P值			Overall	
				T2和T1	T3和T2	T3和T1		
上颌中切牙	LTBT1	1.00±0.47	1.27±0.80	1.37±0.75	0.054 ^a	1.000 ^a	0.030 ^{a*}	0.011 ^a
	LTBT2	0.92±0.21	1.47±0.45	1.46±0.64	0.000 ^{b*}	0.304 ^b	0.002 ^{b*}	0.000 ^{b*}
	LTBT3	1.06±0.32	1.68±0.76	1.60±0.85	0.011 ^{b*}	1.000 ^b	0.022 ^{b*}	0.005 ^{b*}
	PTBT1	1.20±0.44	1.03±0.53	1.29±0.56	-	-	-	0.134 ^b
	PTBT2	2.43±0.51	2.18±0.83	2.43±0.83	-	-	-	0.086 ^b
	PTBT3	4.06±1.03	4.60±1.45	4.52±1.47	0.652 ^a	1.000 ^a	0.870 ^a	0.066 ^a
	TBT1	8.44±0.38	8.90±0.66	9.00±0.70	0.015 ^{a*}	1.000 ^a	0.008 ^{a*}	0.001 ^{a*}
	TBT2	8.82±0.66	9.41±0.88	9.37±0.96	0.002 ^{a*}	1.000 ^a	0.002 ^{a*}	0.000 ^a
	TBT3	9.20±1.33	10.50±1.73	10.20±1.64	0.000 ^{a*}	0.089 ^a	0.000 ^{a*}	0.000 ^{a*}
上颌侧切牙	LTBT1	0.90±0.61	1.40±0.75	1.18±0.76	0.007 ^{b*}	0.066 ^b	0.221 ^b	0.007 ^b
	LTBT2	1.09±0.48	1.38±0.64	1.38±0.83	0.052 ^b	1.000 ^b	0.267 ^b	0.048 ^{b*}
	LTBT3	0.92±0.86	1.19±0.77	1.15±1.03	0.037 ^{b*}	0.055 ^b	1.000 ^b	0.423 ^b
	PTBT1	1.46±0.61	1.06±0.63	0.98±0.37	0.005 ^{b*}	1.000 ^b	0.002 ^{b*}	0.001 ^b
	PTBT2	2.61±1.23	1.99±1.05	1.92±0.91	0.014 ^{a*}	1.000 ^a	0.006 ^{a*}	0.003 ^{a*}
	PTBT3	4.17±2.05	3.97±2.00	3.85±1.98	-	-	-	0.935 ^b
	TBT1	8.17±0.91	8.13±0.90	7.95±0.75	-	-	-	0.368 ^b
	TBT2	8.74±1.60	8.31±1.25	8.24±1.04	-	-	-	0.576 ^b
	TBT3	8.88±2.18	8.91±2.01	8.69±2.04	-	-	-	0.340 ^b
上颌尖牙	LTBT1	1.00±0.55	1.19±0.70	1.16±0.73	0.064 ^a	1.000 ^a	0.246 ^a	0.054 ^a
	LTBT2	1.02±0.32	1.01±0.31	1.12±0.40	1.000 ^a	0.112 ^a	0.137 ^a	0.048 ^{a*}
	LTBT3	0.75±0.30	0.75±0.30	0.80±0.32	-	-	-	0.663 ^b
	PTBT1	1.11±0.59	0.58±0.54	0.54±0.48	0.003 ^{b*}	1.000 ^b	0.001 ^{b*}	0.000 ^{b*}
	PTBT2	2.26±0.72	1.81±0.76	1.66±0.63	0.007 ^{b*}	1.000 ^b	0.000 ^{b*}	0.000 ^{b*}
	PTBT3	3.95±1.26	3.29±0.94	3.16±0.95	0.005 ^{a*}	0.957 ^a	0.004 ^{a*}	0.004 ^{a*}
	TBT1	9.42±1.01	9.30±0.96	9.17±1.16	0.951 ^a	0.714 ^a	0.136 ^a	0.104 ^a
	TBT2	9.86±1.23	9.50±1.25	9.43±1.10	0.024 ^{a*}	1.000 ^a	0.017 ^{a*}	0.004 ^{a*}
	TBT3	10.12±1.36	9.46±1.35	9.41±1.35	0.001 ^{a*}	1.000 ^a	0.004 ^{a*}	0.002 ^{a*}

注: a表示使用重复测量方差分析, b表示使用Friedman检验, *P<0.05。

2.4 T2-T1期与T3-T2期上前牙牙槽骨厚度变化量的相关性

上颌中切牙PTBT2, 上颌侧切牙腭侧PTBT1、PTBT2、PTBT3, 上颌尖牙LTBT1、LTBT2和PTBT1, 在治疗期和随访期的变化呈负相关(表4)。上颌中切牙TBT2、TBT3, 上颌侧切牙和上颌尖牙TBT1、TBT2, 在治疗期和随访期的变化也呈负相关(表4)。

2.5 上颌中切牙切缘内收量与T2-T1、T3-T2期上前牙牙槽骨高度、厚度变化量的相关性

上颌中切牙切缘内收量(6.98 mm±1.12 mm)与T2-T1期PTBT3变化量呈正相关, 与T3-T2期DVBL变化量呈正相关(表5)。

2.6 上颌中切牙切缘压低量与T2-T1、T3-T2期上前牙牙槽骨高度、厚度变化量的相关性

上颌中切牙切缘压低量(-0.14 mm±1.65 mm)与T2-T1期LTBT3变化量呈负相关; 压低量与T3-T2期LVBL变化量呈正相关, 与PTBT1变化量呈负相关(表6)。

2.7 治疗前后切牙唇倾度

治疗后切牙U1-SN角(90.6°±4.2°)小于治疗前(111.0°±5.8°)(P<0.05), 即唇倾度变小。

3 讨论

有大量文献研究^[8,10-11]显示固定矫治拔牙内收

的患者前牙区牙槽骨会出现牙槽骨丧失的现象，Guo等^[10]对26篇文献进行总结后表明正畸拔牙矫治后，牙槽骨的变化主要为舌侧吸收，而唇侧的骨沉积是有限的，治疗后前牙牙根颈部牙槽骨高度和厚度都变小。与固定矫治器相比，有学者认为隐形矫治器与牙冠大面积直接接触，使得矫治力作用更均匀广泛^[12]，且隐形矫治的轻力、间断力矫治，可能更有利于牙周硬组织的改建^[13]。然而有学者^[14]认为隐形矫治器对牙齿转矩控制能力有限，易引起牙齿倾斜移动，使牙周局部组织应力集中，更容易损害牙周支持组织的健康，目前隐形矫治器与固定矫治器对牙周硬组织的影响是否存在差异，以及隐形矫治器是否有利于牙周硬组织的改建，尚无定论。

表 3 矫治阶段与保持阶段前牙牙槽骨高度变化量的相关性分析

Tab 3 Correlation of anterior alveolar bone height changes between treatment and retention phases

测量项目		T2-T1	T3-T2	r 值	P 值
上颌中切牙	LVBL	0.56±0.75	-0.36±0.58	-0.597 ^b	0.001*
	PVBL	0.76±0.70	-0.46±0.57	-0.407 ^b	0.039*
	MVBL	0.64±0.94	-0.60±1.01	-0.863 ^b	<0.001*
	DVBL	0.28±0.61	-0.08±0.70	-0.578 ^a	0.010*
上颌侧切牙	LVBL	-0.25±0.78	0.17±0.62	-0.254 ^a	0.200
	PVBL	0.43±0.60	-0.09±0.71	-0.691 ^a	<0.001*
	MVBL	0.41±0.55	-0.12±0.42	-0.142 ^a	0.472
	DVBL	0.03±0.57	-0.11±0.35	-0.154 ^a	0.433
上颌尖牙	LVBL	0.01±0.60	0.05±0.69	-0.598 ^a	<0.001*
	PVBL	0.87±1.50	-0.15±1.13	-0.298 ^a	0.110
	MVBL	0.38±0.49	-0.05±0.64	0.031 ^a	0.873
	DVBL	0.24±0.70	-0.12±0.55	-0.564 ^a	0.001*

注：T2-T1、T3-T1表示2个时间点测量值的差值，数值为正表示牙槽骨高度减少，数值为负表示牙槽骨高度增加。r值为正表示2个差值之间的变化为相同方向，r值为负表示2个差值之间的变化为相反方向。a表示使用Pearson相关性分析，b表示使用Spearman相关性分析，*P<0.05。

关于保持期牙槽骨的改建能力，目前尚未达成共识。Mulie等^[15]认为，牙齿发生移动至少6个月后才会出现牙槽骨的改建。Sarikaya等^[16]发现，在前牙内收结束4个月，原有牙槽骨缺损处发生了少量的增生。Guo等^[17]研究发现正畸治疗1年之后，唇侧骨开窗和腭侧骨开窗的发生率显著降低。Wang等^[18]评估保持18~24个月后牙槽骨形态变化情况，结果显示保持期内上颌侧切牙根尖、下颌侧切牙根中水平牙槽骨厚度显著下降，上下颌前

牙根颈部牙槽骨厚度显著增加。但以上研究均为固定矫治后牙槽骨形态变化的追踪研究，目前未见隐形矫治器治疗结束后保持阶段的相关追踪报道，故本研究对隐形矫治结束18个月以上的患者进行随访期牙槽骨形态变化的观察。

表 4 矫治阶段与保持阶段前牙牙槽骨厚度变化量的相关性分析

Tab 4 Correlation of anterior alveolar bone thickness changes between treatment and retention phases

测量项目		T2-T1	T3-T2	r 值	P 值
上颌中切牙	LTBT1	0.27±0.50	0.11±0.54	-0.378 ^b	0.100 ^b
	LTBT2	0.55±0.47	-0.01±0.40	0.043 ^a	0.856
	LTBT3	0.62±0.90	-0.08±0.53	0.078 ^b	0.751
	PTBT1	-0.30±0.32	0.29±0.44	-0.106 ^b	0.719
	PTBT2	-0.25±0.65	0.25±0.53	-0.558 ^a	0.011*
	PTBT3	0.54±0.91	-0.08±0.48	-0.409 ^a	0.082
	TBT1	0.45±0.64	0.10±0.50	-0.215 ^a	0.362
	TBT2	0.59±0.65	-0.04±0.52	-0.503 ^a	0.024*
	TBT3	1.30±1.09	-0.30±0.56	-0.720 ^a	0.001*
上颌侧切牙	LTBT1	0.50±0.76	-0.22±0.46	-0.254 ^a	0.202
	LTBT2	0.29±0.52	0.00±0.41	-0.175 ^a	0.384
	LTBT3	0.27±0.84	-0.04±0.60	-0.209 ^a	0.338
	PTBT1	-0.43±0.75	-0.08±0.68	-0.553 ^b	0.002*
	PTBT2	-0.62±1.30	-0.07±0.65	-0.446 ^b	0.015*
	PTBT3	-0.20±2.13	-0.12±0.87	-0.452 ^a	0.023*
	TBT1	-0.04±1.06	-0.18±0.72	-0.454 ^b	0.015*
	TBT2	-0.43±1.50	-0.08±0.74	-0.422 ^a	0.023*
	TBT3	-0.24±1.89	-0.22±0.98	-0.368 ^a	0.070
上颌尖牙	LTBT1	0.19±0.41	-0.03±0.42	-0.464 ^b	0.011*
	LTBT2	-0.01±0.26	0.11±0.29	-0.485 ^a	0.007*
	LTBT3	0.00±0.40	0.04±0.35	-0.331 ^a	0.074
	PTBT1	-0.53±0.81	0.04±0.55	-0.460 ^a	0.012*
	PTBT2	-0.45±0.81	0.16±0.53	-0.318 ^a	0.087
	PTBT3	-0.65±1.04	-0.13±0.73	-0.127 ^b	0.503
	TBT1	-0.12±0.64	-0.36±0.69	-0.471 ^a	0.009*
	TBT2	-0.36±0.70	0.66±0.88	-0.653 ^a	<0.001*
	TBT3	-0.66±0.88	-0.05±0.66	-0.045 ^a	0.814

注：T2-T1、T3-T1表示2个时间点测量值的差值，数值为正表示牙槽骨厚度增加，数值为负表示牙槽骨厚度减少；r值为正表示2个差值之间的变化为相同方向，r值为负表示2个差值之间的变化为相反方向；a表示使用Pearson相关性分析，b表示使用Spearman相关性分析，*P<0.05。

本研究结果显示，治疗阶段(T2-T1)上颌中切牙唇侧牙槽骨高度显著减小，上颌前牙腭侧牙槽骨高度显著减小，这与其他研究^[19-20]结果基本一致。本研究纳入病例上颌中切牙内收量较大，正畸治疗过程中，腭侧牙槽骨作为内收的主要压力

区,持续的压缩力导致骨吸收显著,其骨吸收程度显著高于唇侧,隐形矫治器的力学优化可能不足以抵抗大范围内收带来的牙槽骨高度丢失。正畸治疗后,上前牙近中和远中牙槽骨均出现了高度的丢失,近中牙槽骨的丢失更为显著,这与温馥嘉等^[21]固定矫治后牙槽骨改建的研究结果基本一致。隐形矫治器对切牙施加压低力,中切牙周围组织的应力主要集中在近中唇侧区域,并且切

牙唇倾角越大、唇侧牙槽骨越薄时,这种应力会更加明显。无托槽隐形矫治器由于自身刚度有限,在实施长距离间隙关闭的正畸治疗时,容易出现“过山车”效应^[22],在本研究的方案设计中,前牙均增加了压低的过矫正处理以避免过山车效应,且上牙弓前突患者切牙唇倾角较大,进一步增加了近中牙槽嵴的应力集中。

表 5 上颌中切牙切缘内收量与 T2-T1、T3-T2 期上前牙牙槽骨高度、厚度变化量的相关性

Tab 5 Correlation between retraction amount of maxillary central incisors and changes in alveolar bone height and thickness of anterior teeth during T2-T1 and T3-T2 periods n=15

测量项目	T2-T1	T3-T2	r1 值	P1 值	r2 值	P2 值
LVBL	0.56±0.75	-0.36±0.58	0.221 ^b	0.349	0.422 ^b	0.064
PVBL	0.76±0.70	-0.46±0.57	0.091 ^a	0.702	-0.160 ^a	0.500
MVBL	0.64±0.94	-0.60±1.01	-0.182 ^b	0.457	0.412 ^a	0.080
DVBL	0.28±0.61	-0.08±0.70	0.096 ^a	0.694	0.462 ^b	0.030*
LTBT1	0.27±0.50	0.11±0.54	-0.228 ^a	0.333	-0.299 ^b	0.201
LTBT2	0.55±0.47	-0.01±0.40	-0.350 ^a	0.130	-0.151 ^a	0.524
LTBT3	0.62±0.90	-0.08±0.53	-0.205 ^b	0.399	0.179 ^a	0.463
PTBT1	-0.30±0.32	0.29±0.44	-0.128 ^b	0.664	0.280 ^a	0.333
PTBT2	-0.25±0.65	0.25±0.53	0.294 ^a	0.208	-0.228 ^b	0.334
PTBT3	0.54±0.91	-0.08±0.48	0.682 ^a	0.001*	0.005 ^a	0.983
TBT1	0.45±0.64	0.10±0.50	-0.333 ^a	0.152	0.314 ^a	0.178
TBT2	0.59±0.65	-0.04±0.52	0.060 ^a	0.801	-0.307 ^a	0.188
TBT3	1.30±1.09	-0.30±0.56	0.043 ^a	0.861	-0.109 ^a	0.657

注: T2-T1、T3-T2 表示 2 个时间点测量值的差值,数值为正表示牙槽骨厚度增加/牙槽骨高度减少,数值为负表示牙槽骨厚度减少/牙槽骨高度增加; r1、r2 分别为内收量与 T2-T1、T3-T2 期牙槽骨变化量之间的相关系数,正值表示 2 个差值之间的变化为相同方向,负值表示 2 个差值之间的变化为相反方向; a 表示使用 Pearson 相关性分析, b 表示使用 Spearman 相关性分析, *P<0.05。

表 6 上颌中切牙切缘压低量与 T2-T1、T3-T2 期上前牙牙槽骨高度、厚度变化量的相关性

Tab 6 Correlation between intrusion amount of maxillary central incisors and changes in alveolar bone height and thickness of anterior teeth during T2-T1 and T3-T2 periods n=15

测量项目	T2-T1	T3-T2	r1 值	P1 值	r2 值	P2 值
LVBL	0.56±0.75	-0.36±0.58	0.077 ^b	0.748	0.499 ^b	0.010*
PVBL	0.76±0.70	-0.46±0.57	-0.074 ^a	0.755	-0.114 ^b	0.633
MVBL	0.64±0.94	-0.60±1.01	-0.064 ^b	0.796	-0.076 ^b	0.759
DVBL	0.28±0.61	-0.08±0.70	0.063 ^b	0.792	-0.037 ^b	0.878
LTBT1	0.27±0.50	0.11±0.54	-0.182 ^b	0.442	-0.029 ^b	0.902
LTBT2	0.55±0.47	-0.01±0.40	-0.341 ^b	0.142	-0.076 ^b	0.750
LTBT3	0.62±0.90	-0.08±0.53	-0.642 ^b	0.003*	-0.195 ^b	0.424
PTBT1	-0.30±0.32	0.29±0.44	-0.135 ^b	0.644	-0.611 ^b	0.020*
PTBT2	-0.25±0.65	0.25±0.53	0.010 ^b	0.967	0.028 ^b	0.907
PTBT3	0.54±0.91	-0.08±0.48	0.080 ^b	0.745	-0.015 ^b	0.950
TBT1	0.45±0.64	0.10±0.50	-0.197 ^b	0.469	0.222 ^b	0.927
TBT2	0.59±0.65	-0.04±0.52	-0.267 ^b	0.255	0.092 ^b	0.700
TBT3	1.30±1.09	-0.30±0.56	-0.040 ^b	0.870	0.031 ^b	0.901

注: T2-T1、T3-T2 表示 2 个时间点测量值的差值,数值为正表示牙槽骨厚度增加/牙槽骨高度减少,数值为负表示牙槽骨厚度减少/牙槽骨高度增加; r1、r2 分别为压低量与 T2-T1、T3-T2 期牙槽骨变化量之间的相关系数,正值表示 2 个差值之间的变化为相同方向,负值表示 2 个差值之间的变化为相反方向; a 表示使用 Pearson 相关性分析, b 表示使用 Spearman 相关性分析, *P<0.05。

正畸阶段 (T2-T1), 除上颌尖牙根中 1/3 唇侧牙槽骨变薄, 上颌前牙其余各位点的唇侧牙槽骨厚度均变厚, 并且上颌中切牙 LTBT2 和 LTBT3 及上颌侧切牙 LTBT1、LTBT3 显著增加。这与 Guo 等^[23]关于隐形矫治后牙槽骨改建情况的研究结果基本一致。本研究纳入上颌前突患者, 上前牙唇倾角较大 (平均 U1-SN=111.0°±5.8°), 上颌前牙过度唇倾的长期机械压力导致唇侧骨质吸收变薄, 正畸治疗大量内收前牙后, 上前牙唇倾度显著减小 (平均 U1-SN=90.6°±4.2°), 唇侧骨质受牵张应力, 唇侧牙槽骨增厚。此外, 成年患者骨改建活性较未成年低, 其骨吸收和骨沉积相对缓慢, 骨转化率低^[24-26], 较慢的骨重塑能力可能会导致治疗结束时唇侧牙槽骨的增厚^[27]。与唇侧相反, 腭侧牙槽骨厚度在正畸阶段显著减少, 上颌中切牙根颈部、根中部, 上颌侧切牙和上颌尖牙根颈部、根中部、根尖部腭侧牙槽骨均变薄, 腭侧牙槽骨在内收过程中承受持续性压力, 压力侧骨表面破骨细胞活性增强, 导致骨基质溶解, 而腭侧颈部应力易于集中, 故本研究中上颌前牙腭侧牙颈部处牙槽骨均出现了显著的变薄。而本研究结果中, 上颌中切牙根尖 1/3 腭侧牙槽骨治疗出现增厚, 可能是因为隐形矫治过程中, 隐形矫治器对牙根控制不足, 较难实现上切牙的整体移动, 更容易出现控制性的倾斜移动, 上颌中切牙牙冠腭向移动, 而根略向唇方移动, 从而导致腭侧牙周膜受到牵张力, 刺激根尖腭侧牙槽骨的增生。正畸阶段上颌中切牙各观测位点牙槽骨总厚度显著变厚, 与刘映鸿等^[28]的研究结果一致, 上中切牙内收后, 唇侧牙槽骨增厚量也大于其腭侧牙槽骨减少量, 故治疗后总牙槽骨厚度表现为增加趋势。

保持阶段 (T3-T2), 上颌中切牙唇腭侧牙槽骨高度显著增加, 但未达治疗前水平, 与以往关于固定矫治的随访研究^[17-18,27]基本一致。保持阶段骨改建可能受局部血供、机械刺激减少及患者年龄的影响。有研究表明, 保持期间, 成年人和青少年的前牙区牙槽唇侧骨变化量并无显著差异, 但在舌侧, 成年人前牙区舌侧牙槽骨的增量较青少年少, 这可能是因为, 在牙齿移动过程中, 青少年的骨重塑比成年人完成得更快, 青少年在正畸阶段已完成大部分骨重塑, 从而使得青少年在保持阶段的骨重塑活动少于成年人, 并且牙槽嵴顶区域的骨量可能需要更长时间进行重建^[18,27]。本研究纳入的患者均为成年患者, 年龄≥18岁, 保持阶段牙槽骨继续发生改建, 但受限于成骨细胞活性

或局部血供恢复不完全, 骨髓间充质干细胞分化能力减弱等^[29], 成年患者骨改建能力较青少年降低, 可能导致腭侧骨吸收后再生受限。Remmelink 等^[30]认为牙槽骨的完全修复依赖于复发情况的出现, 皮质骨板的重建与前牙转矩的复发存在显著相关性。本研究结果中, 保持期腭侧牙槽骨高度显著增加, 平均增加量为 0.46 mm±0.57 mm, 然而 0.46 mm 的变化量在临床实践中意义有限, 这一微小的变化既不会改变牙齿的冠根比例, 也不会对牙龈缘的美学轮廓 (如黑三角、龈乳头高度) 产生肉眼可见的积极或消极影响。本结果的真正临床价值并不在于骨高度增加了, 而在于没有发生持续的骨吸收。结果表明, 在经过内收治疗后, 腭侧牙槽嵴顶在保持期处于一个稳定甚至略有改善的状态, 在至少 18 个月的保持期间, 腭侧牙槽嵴顶没有出现进行性的骨丧失。这对于评估治疗的长期稳定性是一个积极的信号。在 Bac 等^[31]的病例报道中, 1 例拔牙矫治的成年患者, 在前牙内收后出现上前牙腭侧牙槽骨开裂, 在治疗结束 10 年后, 出现了明显的恢复。本研究结果中腭侧牙槽骨有限的恢复量可能与观察时间有关, 未来可进行更长时间的随访研究。

与以往固定矫治随访期的相关研究基本一致^[8], 无托槽隐形矫治治疗阶段牙槽骨吸收程度越大, 保持期内牙槽骨恢复潜力越高。然而在平均 29.53±12.59 个月的随访期内, 上颌前牙牙槽骨发生缺损的位点难以恢复到治疗前水平, 说明恢复能力有一定限度。

本研究结果显示, 上颌中切牙切缘内收量与 T2-T1 期 PTBT3 变化量呈正相关, 即上颌中切牙切缘内收量越大, 治疗后中切牙根尖部腭侧牙槽骨厚度增加越多, 这可能是因为内收过程中上颌中切牙倾斜移动, 腭侧骨皮质受到牵张应力发生增厚; 在 T3-T2 期, 内收量与 DVBL 变化量呈正相关, 即上颌中切牙内收量越大, 保持期远中牙槽骨高度越难恢复, 这提示在临床上要合理控制内收范围, 注意内收过程中远中牙槽嵴顶的骨量变化。上颌中切牙切缘压低量与 T2-T1 期 LTBT3 变化量呈负相关, 即压低量越大, 唇侧根尖部牙槽骨厚度丢失越多; 压低量与 T3-T2 期 LVBL 变化量呈正相关, 与 PTBT1 变化量呈负相关, 压低量越大, 保持期间唇侧牙槽嵴顶骨高度、腭侧根颈部牙槽骨厚度越难恢复。对于需要大量内收的病例, 应重点关注腭侧牙槽骨的适应性改建能力, 必要时可通过 CBCT 评估骨条件。而对于压入移动, 须

谨慎评估风险:术前应详细评估唇侧骨板厚度,术中应控制压入力和速度,术后需长期监控牙槽嵴顶高度变化。

本研究纳入的样本量较小(15例),且性别分布不均衡(女性占多数),可能导致结果存在一定偏倚,降低统计效率。未来需扩大样本量并平衡性别比例,以增强结论的普适性。且本研究为单组回顾性分析,未设置固定矫治器对照组,未能直接比较隐形矫治与固定矫治对牙槽骨改建的差异。后续研究可设计前瞻性对照试验以研究不同矫治技术的牙槽骨改建情况。

综上所述,上颌前突患者使用无托槽隐形矫治器拔牙矫治后,上颌前牙近中、腭侧牙槽骨高度显著降低;上颌侧切牙、上颌尖牙根颈部及根中部腭侧牙槽骨厚度显著减少,上颌中切牙唇侧牙槽骨厚度在根中、根尖部显著增加。保持期牙槽骨高度厚度部分恢复,但未达治疗前水平,治疗期骨吸收程度可能影响保持期修复潜力。

利益冲突声明:作者声明本文无利益冲突。

[参考文献]

- [1] Xu Y, Xie J. Comparison of the effects of mini-implant and traditional anchorage on patients with maxillary dentoalveolar protrusion[J]. *Angle Orthod*, 2017, 87(2): 320-327.
- [2] Hahn W, Dathe H, Fialka-Fricke J, et al. Influence of thermoplastic appliance thickness on the magnitude of force delivered to a maxillary central incisor during tipping[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2009, 136(1): 12.e1-7; discussion 12-13.
- [3] Lu H, Tang H, Zhou T, et al. Assessment of the periodontal health status in patients undergoing orthodontic treatment with fixed appliances and Invisalign system: a meta-analysis[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2018, 97(13): e0248.
- [4] 张瑞洁, 郭子煜, 秦文, 等. 无托槽隐形矫治器矫治错殆畸形与牙槽骨缺损发生的研究进展[J]. *实用口腔医学杂志*, 2023, 39(4): 527-531.
Zhang RJ, Guo ZY, Qin W, et al. Progress on clear aligners in the treatment of malocclusion and the occurrence of alveolar bone defects (translation)[J]. *J Pract Stomatol*, 2023, 39(4): 527-531.
- [5] 齐娟, 李淑芳. 无托槽隐形矫治器与固定矫治器在上颌前突拔牙病例中的疗效对比[J]. *临床口腔医学杂志*, 2023, 39(3): 163-167.
Qi J, Li SF. Retrospective clinical study on treatment effectiveness with clear aligners and fixed appliances in extraction cases[J]. *J Clin Stomatol*, 2023, 39(3): 163-167.
- [6] 王宇. 成人患者拔牙内收后前牙区牙槽骨变化的CBCT追踪研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
Wang Y. Follow-up study of changes in the anterior alveolar bone in adult patients after retraction of anterior teeth with cone beam computed tomography[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021.
- [7] 谢飘. 青少年双颌前突患者拔牙矫治后及随访期前牙区牙槽骨变化的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
Xie P. The study of anterior alveolar bone change in adolescent patients with bimaxillary protrusion involving tooth extraction after orthodontic treatment and retention phase[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.
- [8] 王宇, 谢飘, 沈涛, 等. 成年双颌前突患者减数矫治后前牙区牙槽骨变化的锥形束CT分析[J]. *中华口腔医学杂志*, 2023, 58(2): 143-150.
Wang Y, Xie P, Shen T, et al. Analysis of morphometric changes in the anterior alveolar bone in bimaxillary protrusion adult patients after retraction with cone-beam CT [J]. *Chin J Stomatol*, 2023, 58(2): 143-150.
- [9] Bazina M, Cevidanes L, Ruellas A, et al. Precision and reliability of Dolphin 3-dimensional voxel-based superimposition[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2018, 153(4): 599-606.
- [10] Guo R, Zhang L, Hu M, et al. Alveolar bone changes in maxillary and mandibular anterior teeth during orthodontic treatment: a systematic review and meta-analysis[J]. *Orthod Craniofac Res*, 2021, 24(2): 165-179.
- [11] 杨安迪, 毛慧敏, 雷浪. 成人双颌前突患者正畸前后上颌切牙区唇腭侧牙槽骨的变化[J]. *口腔医学研究*, 2021, 37(1): 48-52.
Yang AD, Mao HM, Lei L. Changes of labial-palatal alveolar bone in maxillary incisor region in adult patients with bimaxillary protrusion before and after orthodontic treatment[J]. *J Oral Sci Res*, 2021, 37(1): 48-52.
- [12] 唐娜, 赵志河, 王军, 等. 无托槽隐形矫治技术生物力学效应的有限元法研究[J]. *医用生物力学*, 2010, 25(6): 399-405.
Tang N, Zhao ZH, Wang J, et al. Biomechanical effects of bracketless appliance technology: a finite element method study[J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(6): 399-405.

- [13] Elhaddaoui R, Qoraich HS, Bahije L, et al. Orthodontic aligners and root resorption: a systematic review[J]. *Int Orthod*, 2017, 15(1): 1-12.
- [14] Jiang T, Wang JK, Jiang YY, et al. How well do integrated 3D models predict alveolar defects after treatment with clear aligners[J]. *Angle Orthod*, 2021, 91(3): 313-319.
- [15] Mulie RM, Hoeve AT. The limitations of tooth movement within the symphysis, studied with laminagraphy and standardized occlusal films[J]. *J Clin Orthod*, 1976, 10(12): 882-893.
- [16] Sarikaya S, Haydar B, Cığır S, et al. Changes in alveolar bone thickness due to retraction of anterior teeth[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2002, 122(1): 15-26.
- [17] Guo R, Li L, Lin Y, et al. Long-term bone remodeling of maxillary anterior teeth with post-treatment alveolar bone defect in adult patients with maxillary protrusion: a prospective follow-up study[J]. *Prog Orthod*, 2023, 24(1): 36.
- [18] Wang J, Zhou W, Wu Y, et al. Long-term changes in the anterior alveolar bone after orthodontic treatment with premolar extraction: a retrospective study[J]. *Orthod Craniofac Res*, 2022, 25(2): 174-182.
- [19] Almagrabi I, Almashraqi AA, Almaqrabi BS, et al. A quantitative three-dimensional comparative study of alveolar bone changes and apical root resorption between clear aligners and fixed orthodontic appliances[J]. *Prog Orthod*, 2023, 24(1): 6.
- [20] Gupta S, Singh VK, Pandey S, et al. 3D assessment of alveolar bone alterations in orthodontic movement among Indians[J]. *Bioinformation*, 2023, 19(6): 764-769.
- [21] 温馥嘉, 陈贵, 刘怡. 基于锥形束CT的强支抗内收上前牙病例牙根及牙槽骨的形态学分析[J]. *北京大学学报(医学版)*, 2016, 48(4): 702-708.
Wen FJ, Chen G, Liu Y. Morphological analysis of roots and alveolar bone changes after upper anterior retraction with maximum anchorage based on cone-beam computed tomography[J]. *J Peking Univ(Health Sci)*, 2016, 48(4): 702-708.
- [22] Simon M, Keilig L, Schwarze J, et al. Forces and moments generated by removable thermoplastic aligners: incisor torque, premolar derotation, and molar distalization[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2014, 145(6): 728-736.
- [23] Guo Z, Zhang R, Guo C, et al. A retrospective study of alveolar bone remodelling after anterior retraction in orthodontic tooth extraction cases with clear aligners and fixed appliances[J]. *Orthod Craniofac Res*, 2024, 27(2): 220-227.
- [24] Nishimoto SK, Chang CH, Gendler E, et al. The effect of aging on bone formation in rats: biochemical and histological evidence for decreased bone formation capacity[J]. *Calcif Tissue Int*, 1985, 37(6): 617-624.
- [25] Szulc P, Seeman E, Delmas PD. Biochemical measurements of bone turnover in children and adolescents[J]. *Osteoporos Int*, 2000, 11(4): 281-294.
- [26] Misawa-Kageyama Y, Kageyama T, Moriyama K, et al. Histomorphometric study on the effects of age on orthodontic tooth movement and alveolar bone turnover in rats[J]. *Eur J Oral Sci*, 2007, 115(2): 124-130.
- [27] Li L, Chen Y, Wang J, et al. Long-term morphometric changes in the anterior alveolar bone in adolescents and adults after space closure: a retrospective study[J]. *Orthod Craniofac Res*, 2023, 26(4): 618-631.
- [28] 刘映鸿, 周泽渊, 赵奎, 等. 青少年患者前牙内收过程中牙槽骨改建情况的锥形束CT研究[J]. *华西口腔医学杂志*, 2016, 34(1): 78-84.
Liu YH, Zhou ZY, Zhao K, et al. Morphometric evaluation of changes in the alveolar bone of adolescents with bimaxillary protrusion via cone beam computed tomography[J]. *West China J Stomatol*, 2016, 34(1): 78-84.
- [29] Li X, Li M, Lu J, et al. Age-related effects on osteoclastic activities after orthodontic tooth movement[J]. *Bone Joint Res*, 2016, 5(10): 492-499.
- [30] Rimmelink HJ, van der Molen AL. Effects of anteroposterior incisor repositioning on the root and cortical plate: a follow-up study[J]. *J Clin Orthod*, 1984, 18(1): 42-49.
- [31] Bae SM, Kim HJ, Kyung HM. Long-term changes of the anterior palatal alveolar bone after treatment with bialveolar protrusion, evaluated with computed tomography[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2018, 153(1): 108-117.

(本文编辑 杜冰)