

文章编号: 1004-7220(2024)02-0326-06

两种隐形正畸序列磨牙远移的有限元比较

李慧¹, 张栋梁²

(1. 北京市医用内植物工程技术研究中心, 北京 100194; 2. 首都医科大学附属北京口腔医院, 北京 100050)

摘要: **目的** 比较两种远中移动序列的无托槽隐形矫治在磨牙远移方面的执行效果。**方法** 建立包含牙体、牙周膜、牙槽骨及隐形矫治器的下颌右侧7颗牙齿有限元模型, 分别选用两种推磨牙远中移动对牙齿进行模拟第二磨牙远移0.5 mm的过程, 采用牙槽骨重建技术模拟长期牙齿移动效果。**结果** V型、ZC远中移动序列第二磨牙最大远中位移分别为0.27、0.34 mm, ZC远中移动执行效率增大13.34%; 牙齿内倾分别矫正0.18、0.44 mm, 舌侧内倾角度分别矫正1.15°、2.69°, ZC舌侧内倾矫正率提高15.01%; 远端倾斜分别增大1.83°、0.84°, ZC远端倾斜角度减小54.10%。**结论** ZC远中移动序列方法在无托槽隐形矫治中能够更有效地实现磨牙远中移动, 减少磨牙远中倾斜和矫正磨牙舌侧内倾, 为无托槽隐形矫治创造前牙间隙提供有利条件。

关键词: 无托槽隐形矫治; 牙齿移动序列; 下颌磨牙远移; 有限元分析

中图分类号: R 318.01

文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.02.020

Molar Distalization with Two Invisible Orthodontic Sequences: A Finite Element Comparison

LI Hui¹, ZHANG Dongliang²

(1. Beijing Engineering and Technology Research Center for Medical Endopants, Beijing 100194, China;

2. Beijing Stomatological Hospital, Capital Medical University, Beijing 100050, China)

Abstract: **Objective** To compare the effects of clear-aligner orthodontics with two orthodontic sequences on molar distalization. **Methods** A finite-element model of seven right mandibular teeth with periodontal alveolar bone and braces was established. Two molar distalization sequences were selected to simulate the distal movement of the second molar (0.5 mm), and the long-term tooth movement was simulated using the alveolar bone reconstruction technique. **Results** The maximum distal displacement of the second molar with V-pattern and ZC sequences was 0.27 mm and 0.34 mm, respectively, and the ZC distal displacement efficiency was increased by 13.34%. The tooth inclination was corrected by 0.18 mm and 0.44 mm, the lingual inclination was corrected by 1.15° and 2.69°, respectively, and the correction rate of ZC lingual inclination was increased by 15.01%. The distal tilt of the ZC increased by 1.83° and 0.84°, and the distal tilt of the ZC decreased by 54.10%. **Conclusions** The ZC sequence method can realize distal molar movement more effectively, reduce the distal inclination of the molar, and correct the lingual inclination of the molar, providing favorable conditions for orthodontic treatment of anterior teeth.

Key words: clear Aligner orthodontics; tooth movement sequence; mandibular molar distalization finite element analysis

收稿日期: 2023-08-21; 修回日期: 2023-10-09

基金项目: 教育部科技发展中心, 中国高校产学研创新基金项目(2021JH039), 北京市科技新星计划交叉合作课题(20220484231)

通信作者: 张栋梁, 教授, E-mail: zhangdongliang@mail.ccmu.edu.cn

无托槽隐形矫治牙齿移动实现率仅为 30% ~ 50%^[1]。引发这种现象的原因很多,如材料的力学强度不足,附件设计不合理,制造精度不够,以及热塑材料膨胀变形导致的形状差异等。牙齿移动路径的设计也是一个对最终矫治效果有影响的因素^[2],但有关这方面的研究报道还较少。理论上,不同牙齿移动路径将影响隐形矫治器的结构,进而影响隐形矫治器施加矫治力的大小和方向,直接体现为牙齿矫治效果的差异。

磨牙远中移动是拥挤牙列矫治的重要步骤。隐适美的 V 型远中移动序列 (V-pattern 序列) 方法目前是最常用的排牙方案,在推磨牙阶段,该序列给出的方案为不断增大第一、第二磨牙的间隙,持续推第二磨牙。近年来,由于远中移动磨牙失败导致重启的隐适美案例时有发生^[3],但针对牙齿移动路径设计即排牙序列因素的影响目前还鲜有相关分析报道。本文采用一种新型排序方法——ZC 推磨牙远中移动序列 (ZC 序列),该方法改变了 V 型远中移动序列模式,采用整体微调的周期规律,其基本逻辑如下:首先,确定牙齿最需要排齐的位置,从间隙最近的牙齿开始移动,每颗牙齿不连续移动,以最小单元向最先排齐的位置进行移动,单侧象限最多同时移动两颗牙,一般是 1 颗前牙和 1 颗后牙,基础序列示意为 7/6/5/4/73/62/51/4,并根据实际情况做灵活调整。该方法已申请了发明专利(专利号 CN113499153 B)。本文利用有限元仿真方法,通过模拟佩戴多套隐形矫治器的长期效果,比较两种移动序列在磨牙远中移动过程的执行效果。

1 材料与方法

1.1 有限元模型建立

选择 1 例年龄 24 岁男性患者 CBCT 数据作为建模参考,该患者下前牙列拥挤,磨牙舌侧倾斜,需要延长和扩宽牙弓,以及牙齿排齐操作,属于安氏 II 类错殆畸形。本研究的数字化扫描操作均符合相关导则要求。建立右下颌(从下颌中切牙到第二磨牙)牙齿模型、牙周膜 (periodontal ligament, PDL) 及牙槽骨三维有限元模型,其中牙齿模型通过将 CT 数据导入 Mimics 24.0 (Materialise 公司,比利时),获得牙冠及牙根的 STL 模型,再导入 Geomagic 2013

(Geomagic 公司,美国),得到牙齿模型 [见图 1(a)]。PDL 厚度为 0.25 mm,建立 0.5 mm 厚度^[4]模拟牙槽骨组织。隐形矫治器通过将牙冠外轮廓偏置 0.5 mm^[5]厚度得到。隐形矫治器分别按照 V-pattern 序列方法和 ZC 序列方法设计。其中, V1~V3 为 V-pattern 序列第二磨牙远移 0.5 mm 佩戴隐形矫治器, Z1~Z7 为 ZC 序列第二磨牙远移 0.5 mm 佩戴隐形矫治器 [见图 1(b)]。

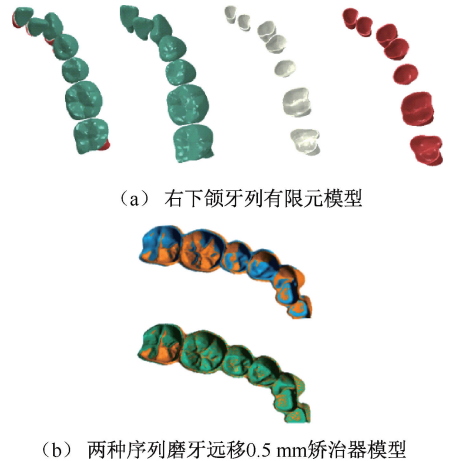


图 1 牙齿有限元模型及隐形矫治器模型

Fig. 1 Tooth finite element model and invisible appliance model (a) Finite element model of right mandibular dentition, (b) Invisible appliance model with two sequences for molar distalization by 0.5 mm

注:图 1(b)蓝色为 Z7,绿色为 V3,黄色为 V1 和 Z1。

1.2 材料接触及边界条件设置

PDL 与牙根、牙根与牙冠均设定为绑定接触^[6],牙槽骨与 PDL 设定为接触。材料属性及网格信息如表 1 所示。设置隐形矫治器与牙冠之间法向为硬接触。为防止隐形矫治器上移,选择隐形矫治器与牙冠不允许分离的选项。切向为摩擦接触,

表 1 材料属性设置及网格信息

Tab. 1 Material properties and mesh information

材料	E/MPa	ν	网格数量		网格尺寸/mm	网格类型
			切牙	磨牙		
牙槽骨	1 370 ^[7-8]	0.30	1 721	2 364	0.3	C3D8R
PDL	超弹性	0.49	1 721	2 364	0.3	C3D8R
牙冠	19 600 ^[5]	0.30	2 360	5 896	0.7	C3D4
牙根	19 600 ^[5]	0.30	2 006	5 074	0.7	C3D4
隐形矫治器	528 ^[5]	0.36	ZC	V 型	0.3	C3D10M
			104 473	103 706		

注: E 为弹性模量; ν 泊松比。

摩擦因数为 $0.2^{[9]}$ 。设置过盈接触,选择自动收缩适配方式,进行逐步地去除从面节点过盈量。这种方法可以将隐形矫治器和牙冠去过盈过程体现为力相互作用,模拟加载矫形力。其中,PDL 外层与牙槽骨内层为切向粗糙接触,法向硬接触同时不允许分离。ALE 区域为整个牙槽骨区域,网格类型为 C3D8R,需要选中沙漏增强设置。PDL 材料根据 Vollmer 的双线性应力-应变曲线,设置为非线性超弹性材料,当应变 $\varepsilon < 7.5\%$, $E_1 = 0.05 \text{ MPa}$; $\varepsilon > 7.5\%$, $E_2 = 0.22 \text{ MPa}^{[10]}$ 。网格收敛性通过比较 PDL 应力的波动度体现,计算网格为 0.2、0.3、0.4 mm,最终考虑计算应力的波动小于 5%,选择 0.3 mm 能够满足计算精度和计算代价的平衡。

装配好的模型导入 ABAQUS 2016 软件进行求解。牙槽骨外层单元为固定约束。下一套隐形矫治器的牙齿初始位置模型需要从上一套牙齿移动结束的结果文件中导入,这一过程通过二次开发程序实现。

1.3 牙齿移动设置

牙齿移动设置参考之前研究的方法执行^[11]。判定法则是选择自适应单元的绝对值最大的主应变,以绝对值最大的主应变的方向作为网格移动的方向,移动量的具体数值参考如下:

$$f_i(\varepsilon_i, u_i) = \begin{cases} \text{sign}(u_i) | \varepsilon_i | k_a, & \varepsilon_i \geq 0 \\ \text{sign}(u_i) | \varepsilon_i | k_d, & \varepsilon_i < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: k_a 为成骨速率, k_d 为破骨速率, $k_a : k_d = 7 : 5$ 时,模型成骨和破骨的效果符合真实情况。 k_a 和 k_d 可以根据模型网格的收敛性来选择。为了体现牙齿移动的直观效果,在单元不发生畸变计算收敛的情况下将 k_a 和 k_d 分别设置较大数值, $k_a = 3.5$, $k_d = 2.5$,设置模拟移动迭代计算 400~800 次。当 PDL 绝对值最大的主应变接近 0 时,则模拟佩戴完成。

1.4 坐标系建立方法

以图 2 所示的前磨牙模型为例阐述本文坐标系建立方法。唇舌侧面和近中面上牙齿的绿轴(Y轴)平分橙色轮廓夹角,曲线轮廓弧度拉直;咬合面上红轴(X轴)平行于牙齿实际切缘,当 Y 轴和 X 轴确定后,Z 轴通过将 Y 轴和 X 轴进行叉乘获得。另外,牙齿牙冠上的坐标轴原点位于牙冠重心位置。

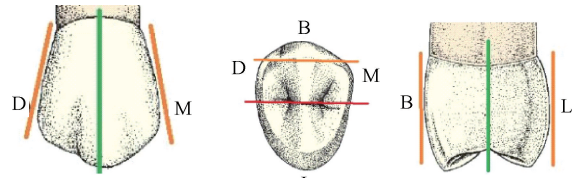


图 2 坐标系建立方法说明示例

Fig. 2 Illustration for the method of establishing the coordinate system

注: D 为远中方向, M 为近中方向, B 为颊侧, L 为舌侧。

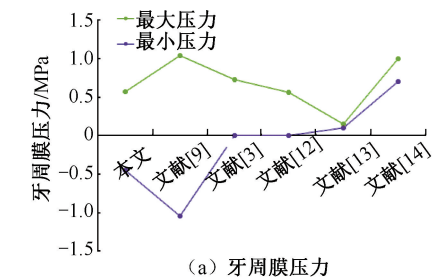
1.5 评价指标

通过比较第 1 副隐形矫治器后即刻牙周膜应力和牙齿即刻位移量,对模型进行验证;将 V-pattern 序列和 ZC 序列执行第二磨牙远移的隐形矫治器在第二磨牙的反力进行比较;将牙齿移动结束第二磨牙的移动量、舌侧倾斜矫正量和远中倾斜量进行比较分析。

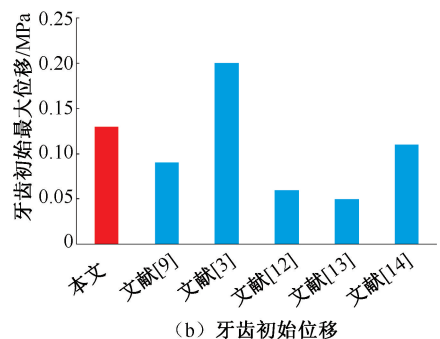
2 结果

2.1 模型验证结果

V1(Z1) 佩戴完成后产生的即刻 PDL 压力为 $-0.40 \sim 0.50 \text{ MPa}$,其中拉力侧压力为负,压力侧为正。产生的即刻位移为 0.13 mm 。经过与文献对比,压力的结果文献报道结果相近(见图 3)。



(a) 牙周膜压力



(b) 牙齿初始位移

图 3 对比验证结果

Fig. 3 Verification results (a) Periodontal membrane pressure, (b) Initial tooth displacement

2.2 第二磨牙反力比较结果

将第二磨牙阻抗中心处所受反力输出,得到 V1~V3 及 Z1~Z7 的反力。结果表明,V-pattern、ZC 序列的平均反力分别为 1.64、2.49 N。

2.3 第二磨牙的移动量、舌侧倾斜矫正量和远中倾斜量比较结果

图 4 分别给出了 V-pattern 序列(黄色)和 ZC 序列(红色)佩戴后牙齿移动与初始牙位置(绿色)

重叠后效果图。由图 4(b)可见,下颌第二磨牙最外侧为红色,说明 ZC 序列移动量更大。从图 4(c)可见,所有牙的最外层均为红色,说明 ZC 序列对牙弓的扩开效果和牙内倾矫正效果更好。同时,下颌第二磨牙内侧为绿色,外侧为红色和黄色,而红色分布在整体外侧,说明整体平移大于倾斜,而黄色分布在牙冠,牙根没有黄色,说明 V-pattern 序列远中倾斜更明显。

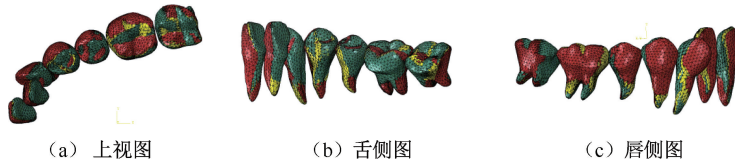


图 4 V-pattern 序列(黄色)和 ZC 序列(红色)牙齿移动与初始牙位置(绿色)重叠图

Fig. 4 V-pattern (yellow) and ZC sequences (red) overlap tooth movement with initial tooth position (green) (a) Top view, (b) Lingual view, (c) Buccal view

进一步通过二次开发,将最后一次位移结果与初始位置进行求差,对结果进行后处理。V-pattern 序列下颌第二磨牙最大远中位移为 0.27 mm,牙齿内倾矫正 0.18 mm,舌侧内倾角度矫正 1.15°,远端倾斜角度增大了 1.83°。ZC 序列的下颌第二磨牙

最大远中移动位移为 0.34 mm,牙齿内倾矫正 0.44 mm,舌侧内倾角度矫正 2.69°,远端倾斜角度增大 0.84°。ZC 序列在磨牙远移执行效率提高了 13.34%,舌侧内倾矫正率提高了 15.01%,远端倾斜角度减小了 54.10%(见图 5)。

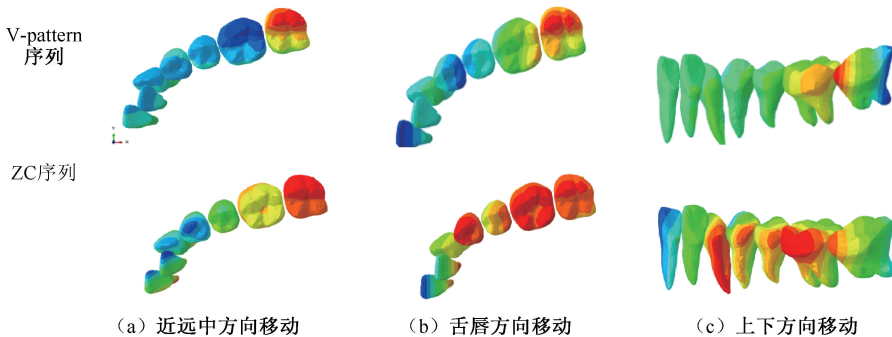


图 5 相同目标位的两种排牙序列不同方向牙齿移动结果

Fig. 5 Different direction tooth movement results of the two sequences with same target position

(a) Mesial and distal direction, (b) Lingual and buccal direction, (c) Up and down direction

3 讨论

3.1 计算结果讨论

目前大部分对无托槽隐形矫治的有限元研究还局限于佩戴即刻的状态,而单个隐形矫治器的佩戴效果分析对临床的指导意义非常有限。本文通过利用牙槽骨改建算法模拟隐形矫治器佩戴后的长期效果,并且通过迭代的方式,实现模拟佩戴多套隐形矫治器后的牙齿移动效果。

Goemez 等^[15]计算得到上犬牙移动 0.15 mm 时的平移力为 2.80 N。本文计算得到的 ZC、V-pattern 序列平均力分别为 2.49、1.64 N。由于有关隐形矫治器产生的矫形力的测量值鲜有报道,本文并没有对力值进行与文献的标定。实际临床中力值范围不会超过 3 N^[16],本文的力值更多体现 ZC 序列比 V-pattern 序列效果好,一种内在原因是 ZC 序列产生的矫形力较大。吴冬雪等^[17]等报告了 20 例患者佩戴隐适美远中移动第二磨牙的效果,发现牙冠和

牙根的有效移动率分别为 74% 和 49%, 远中倾斜 2.10°。本文发现, V-pattern 序列和 ZC 序列分别出现 1.83° 和 0.86° 远端倾斜, 说明 ZC 序列在磨牙移动中具有较好的平移效果。Saif 等^[18]报道了上颌磨牙远移的执行率在 73.8%, 本文计算的隐适美执行率略低为 54%, 推测原因如下: ① 本研究对象为下颌, 下颌切牙较小, 反力较小, 上颌切牙较大反力较大, 故上颌执行效率较高; ② 本文预期移动量为 0.5 mm, 文献[18]中数据均为完成全部佩戴的结果, 同等条件下 ZC 序列的牙齿移动实现率为 67.3%, V-pattern 序列牙齿移动实现率为 54%, 说明 ZC 序列具有更好的牙齿移动效果。

3.2 优势与不足

Hohmann 等^[19]研究认为, 牙周膜最佳受力水平范围在 2.0~4.7 kPa 之间, 超出 4.7 kPa 则会发生局部的牙根吸收。目前大部分的长期模拟牙齿移动的文献鲜有考虑牙根吸收的问题, 推测原因如下: ① 大部分研究侧重于比较研究, 以及与真实临床宏观效果进行对标, 对结论影响不大。② 牙根吸收的临床机制还没有完全清晰, 包括牙周膜材料属性、牙周膜和牙槽骨力学信号通路的定量化等问题, 科学上还悬而未决。未来若将此技术应用在指导正畸规划上, 还需要考虑牙根吸收效应。后续随着调节机制的研究进展, 将逐步把牙根吸收预测融入牙齿移动预测过程中。本文所采用的牙齿运动模拟迭代计算方法的准确性有待进一步的临床证明和提高。③ 目前的骨重塑模拟方法没有考虑个体因素, 如骨密度、骨皮质边界、对正畸力的不同反应水平等, 这些因素可能会干扰磨牙远移的真实值。

4 结论

本文利用有限元分析方法, 通过模拟实现相同预期推磨牙, 佩戴多个隐形矫治器后长期的牙齿移动过程, 比较了 V-pattern 和 ZC 两种排牙序列的磨牙远移实现率。结果表明, ZC 排牙序列能够提高磨牙远移的效率, 同时可以对其他畸形牙骀进行有效矫治。

利益冲突声明: 无。

作者贡献声明: 李慧负责建模和仿真计算和论文撰写; 张栋梁负责实验设计和论文修改。

参考文献:

- [1] MAO B, TIAN Y, Li J, *et al.* Expansion rebound deformation of clear aligners and its biomechanical influence: A three-dimensional morphologic analysis and finite element analysis study [J]. *Angle Orthod*, 2023, 93(5): 572-579.
- [2] MEHTA S, PATEL D, YADAV S. Staging orthodontic aligners for complex orthodontic tooth movement [J]. *Turk J Orthod*, 2021, 34(3): 202-206.
- [3] PAN S, ZOU D, PAN X, *et al.* Effect of attachment on movement control of the central incisor using invisible orthodontics: *In-silico* finite element analysis [J]. *J Shanghai Jiao Tong Univ (Sci)*, 2021, 26(3): 383-390.
- [4] USMANOVA Z, SUNBULOGLU E. An *In-silico* approach to modeling orthodontic tooth movement using stimulus-induced external bone adaptation [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2021(124): 104827.
- [5] LIU L, SONG Q, ZHOU J, *et al.* The effects of aligner overtreatment on torque control and intrusion of incisors for anterior retraction with clear aligners: A finite-element study [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2022(1): 162.
- [6] 李淑娟, 马宗民, 高文波, 等. 动静组合载荷加速正畸牙移动的动力学分析[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(2): 251-256.
LI SX, MA ZM, GAO WB, *et al.* Dynamic analysis on static-vibration coupled loading in accelerating orthodontic tooth movement [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(2): 251-256.
- [7] XU N, LEI X, YANG X, *et al.* Three-dimensional finite element analysis on canine teeth distalization by different accessories of bracket-free invisible orthodontics technology [C]//*Proceedings of American Institute of Physics Conference Series*. Xi'an: [s. n.], 2018: 030034.
- [8] COMBA B, PARRINI S, ROSSINI G, *et al.* A Three-dimensional finite element analysis of upper-canine distalization with clear aligners, composite attachments, and class II elastics [J]. *J Clin Orthod*, 2017, 51(1): 24-28.
- [9] JIA L, WANG C, Li L, *et al.* The effects of lingual buttons, precision cuts, and patient-specific attachments during maxillary molar distalization with clear aligners: Comparison of finite element analysis [J]. *Am J Orthod Dentofac*, 2023, 163(1): e1-e12.
- [10] ORTIZ PO, LAZARO AA, DE MEDRANO, *et al.* Influence of implantposition in implant-assisted removable partial

- denture: A three-dimensional finite element analysis [J]. *J Prosthodont*, 2019, 28(2): E675-681.
- [11] 李慧, 张栋梁. 基于自适应网格技术方法的牙齿移动骨改建过程模拟[J]. *医用生物力学*, 2023, 38(5): 894-898.
LI H, ZHANG DL. Simulation of tooth movement and bone remodeling process using adaptive mesh technology [J]. *J Med Biomech*, 2023, 38(5): 894-898.
- [12] CORTONA A, ROSSINI G, PARRINI S, *et al.* Clear aligner orthodontic therapy of rotated mandibular round-shaped teeth: A finite element study [J]. *Angle Orthod*, 2019, 90(2): 247-254.
- [13] LAOCHACHAIAROON P, SAMRUAJBENJAKUN B, CHAICHANASIRI E. Initial displacement and stress distribution of upper central incisor extrusion with clear aligners and various shapes of composite attachments using the finite element method [J]. *Dent J*, 2022, 10(6): 114.
- [14] SEO JH, EGHAN AE, KIM MS, *et al.* Comparative analysis of stress in the periodontal ligament and center of rotation in the tooth after orthodontic treatment depending on clear aligner thickness—Finite element analysis study [J]. *Materials*, 2021(14): 324.
- [15] GOMEZ JP, PENA FM, MARTINEZ V, *et al.* Initial force systems during bodily tooth movement with plastic aligners and composite attachments: A three-dimensional finite element analysis [J]. *Angle Orthod*, 2015, 85(3): 454-460.
- [16] 李再金. 口腔正畸力模拟及牙齿移动调制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [17] 吴冬雪, 赵云山, 马萌, 等. 无托槽隐形矫治器远移下颌磨牙的疗效[J]. *中南大学学报(医学版)*, 2021, 46(10): 1114-1121.
- [18] SAIF BS, PAN F, MOU Q, *et al.* Efficiency evaluation of maxillary molar distalization using Invisalign based on palatal rugae registration [J]. *Am J Orthod Dentofac*, 2022, 161(4): e372-e379.
- [19] HOHMANN A, WOLFRAM U, GEIGER M., *et al.* Periodontal ligament hydrostatic pressure with areas of root resorption after application of a continuous torque moment—A study using identical extracted maxillary human premolars [J]. *Angle Orthod*, 2007, 77(4): 653-659.