

直丝化舌侧矫治不同微种植体高度内收上前牙的生物力学分析

刘海燕¹ 荆璇¹ 李冰¹ HEE-Moon Kyung² 李世锋² 武秀萍^{1*}
 (1. 山西医科大学口腔医学院·口腔医院正畸科 山西太原 030001;
 2. 韩国庆北国立大学齿科医院正畸科 韩国大邱 427-724)

[摘要] **目的:**建立微种植体-直丝化舌侧矫治系统内收上颌前牙的三维有限元模型,分析微种植体处于不同植入高度时上前牙的位移趋势及应力变化,为舌侧矫治临床应用提供一定的生物力学参考。**方法:**利用锥形束 CT 扫描片建立上颌骨、上颌牙列、牙周膜的三维几何模型,分别在第一磨牙与第二磨牙之间,距牙槽嵴顶 4 mm、8 mm 和 12 mm 处植入微种植体,建立微种植体-直丝化舌侧矫治内收上颌前牙的有限元模型。分析同时施加唇侧压低力和舌侧回收力后上前牙的位移及应力变化。**结果:**内收前牙的过程中,前牙均表现出了一定程度的冠舌向倾斜,随着腭侧微种植体高度的增加,前牙冠舌向倾斜移动逐渐减小,中切牙较侧切牙及尖牙的变化最为显著。当微种植体高度为 8 mm 时,上前牙的牙根及牙周膜应力最小。**结论:**在舌侧矫治中,关闭拔牙间隙阶段选择恰当的腭侧微种植体植入高度同时应用适当的唇侧压低力可有效控制前牙转矩。

[关键词] 直丝化舌侧矫治 有限元模型 微种植体 生物力学 转矩

[文献标识码] A **[文章编号]** 1671—7651(2019)02—0180—05

[doi] 10.13701/j.cnki.kqxyj.2019.02.019

Tooth Movement Tendency with Different Micro Implant Heights in Lingual Straight Wire: A 3-dimensional Finite Element Analysis. LIU Hai-yan¹, JING Xuan¹, LI Bing¹, HEE-Moon Kyung², LI Shi-feng², WU Xiu-ping^{1*}.
 1. Department of Orthodontics, School and Hospital of Stomatology, Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, China; 2. Department of Orthodontics, School of Dentistry, Kyungpook National University, Daegu 427-724, Korea.

[Abstract] **Objective:** To establish the three-dimensional finite element models of micro-implants-lingual straight wire about anterior teeth retraction; and to analyze the teeth movement tendency with different micro-implant heights for providing the biomechanical reference for clinical application of lingual orthodontics. **Methods:** Three dimensional model of maxilla, teeth, and periodontal ligament was obtained by CBCT scan. The palatal micro-implants between first and second molars were set respectively with different heights (4 mm, 8 mm and 12 mm) from the alveolar crest. The obtained three-dimensional finite element models of micro-implants-lingual straight wire were used to analyze the teeth movement tendency and stress changes when labial intrusion force and lingual retraction force were applied. **Results:** All of the anterior teeth showed a degree of buccal root torque during the retraction. With the increase of palatal micro-implant height from the alveolar crest, the tendency of the buccal root torque of anterior teeth were significantly reduced, and the change of central incisors was the most obvious compared with the lateral incisors and canines. When the height of micro-implant was 8mm, the root and periodontal ligament stress was the minimum. **Conclusion:** It can effectively control the anterior teeth torque during the retraction in the lingual orthodontics treatment by choosing the right height of micro-implant and applying the labial intrusion force in anterior teeth.

[Key words] Lingual straight wire Finite element model Micro-implant Biomechanics Torque

基金项目 国家自然科学基金(编号:81400553)

山西省重点研发计划项目(编号:201803D31065)

作者简介 刘海燕(1992~),女,山西吕梁人,硕士在读,主要从事口腔正畸生物力学研究。

* 通讯作者 武秀萍,电话:15003511666

上颌前突是东方人种常见的错殆畸形类型,常表现为上前牙前突、开唇露齿和闭唇困难,极影响侧貌美观。临床上常采用拔除上颌第一前磨牙内收前牙的方式进行矫治以改善面型。近年来,舌侧矫治技术由于绝对隐形的特点逐渐被成年正畸患者广泛

地认知和接受^[1]。但是与唇侧矫治相比较,舌侧矫治由于较小的托槽间距对弓丝刚性和摩擦力的影响以及正畸力点与牙齿阻抗中心的垂直距离较大等原因,在拔牙病例关闭间隙阶段,极易出现上前牙的过度舌倾及牙弓垂直向和水平向的“拱形效应”,影响矫治效果的同时也限制了舌侧矫治技术的推广应用^[2]。

本研究通过建立基于舌侧矫治设计理念的“上颌骨-微种植体-双槽沟舌侧托槽-舌侧直丝弓”的三维有限元模型,在不同高度的腭侧微种植体上施加回收力利用滑动法关闭拔牙间隙,分析上前牙的移动规律及牙根、牙周膜的应力分布,探索可以在此阶段更好控制前牙转矩的力学系统,为直丝化舌侧矫治的生物力学研究奠定一定的基础,从而更好地指导正畸医师的临床工作。

1 材料与方法

1.1 直丝化舌侧矫治系统内收上颌前牙三维有限元模型的建立

选取个别正常殆 1 例,应用锥形束 CT(KAVO 公司,德国)进行扫描,输出 DICOM 格式文件,并导入 Mimics 17.0(Materialise 公司,比利时)软件中。通过调整阈值分别提取上颌骨及牙列的三维信息,通过布尔运算剪切得到包含有整齐牙列的上颌骨模型,以模拟经过正畸治疗完全排齐整平后的牙列。将上述模型输入到逆向工程软件 Geomagic Studio 2013(3D Systems 公司,美国)中去噪点,对颌骨和牙齿的表面进行优化形成曲面模型。将上述 3D 模型导入到三维机械制图专用软件 Unigraphics NX 8.5(Siemens 公司,德国)建立舌侧托槽和弓丝模型;托槽的规格参照 DLB 托槽数据(Dentos 公司,韩国)。将前述所得模型依据临床情况与生物材料特性区分为骨皮质、骨松质、牙齿、牙周膜、弓丝、牵引钩、拉簧、微种植体和托槽,其中骨皮质假设为均匀的 1.50 mm 厚度,牙周膜在牙根区域假设为均匀的 0.20 mm 厚度^[3],骨皮质和牙周膜均采用壳单元模拟。模型中的各种材料都假设为均质、各向同性的线弹性材料,材料变形为小变形。各种材料的弹性模量和泊松比如表 1 所示^[4,5]。调整模型,定义坐标系:Y 轴(矢状向)向舌侧为正;X 轴(水平向)向左侧为正;Z 轴(垂直向)向龈方为正。

1.2 边界约束

用有限元分析专用软件 Ansys Workbench 15.0(ANSYS 公司,美国)进行四面体十节点单元网格划分,整个模型节点数为 684956,网格数为 396434。假设上颌骨顶面为固定端,牙齿-托槽、牙周膜-牙齿、牙槽骨-牙周膜、骨皮质-骨松

质之间用 Bonded 连接;托槽-弓丝采用 No separation 连接,无摩擦或存在微小摩擦;使用接触关系的 Spring 单元模拟拉簧的弹力,模型为小变形,建立“微种植体-直丝化舌侧矫治系统”三维有限元模型。

表 1 三维有限元模型的材料参数

Tab. 1 Material properties required in the three-dimensional finite element model

力学参数	弹性模量/MPa	泊松比
牙本质	20300	0.30
牙周膜	50	0.45
骨皮质	13700	0.30
骨松质	1370	0.30
牵引钩/托槽/弓丝	206000	0.30
微种植体	103400	0.35

1.3 加载条件

前牙唇侧区微种植体(2 颗中切牙根尖区之间)上利用拉簧施加压低位 0.5 N、两侧腭侧回收力各 1.5 N、腭侧牵引钩(放置在侧切牙与尖牙之间)长度 6 mm、加载弓丝为 0.016 英寸×0.022 英寸不锈钢方丝(如图 1)。分别将腭侧微种植体(第一、第二磨牙根尖区之间)设置在距牙槽嵴顶 4 mm、8 mm、12 mm 的牙槽骨中,分析 3 种情况

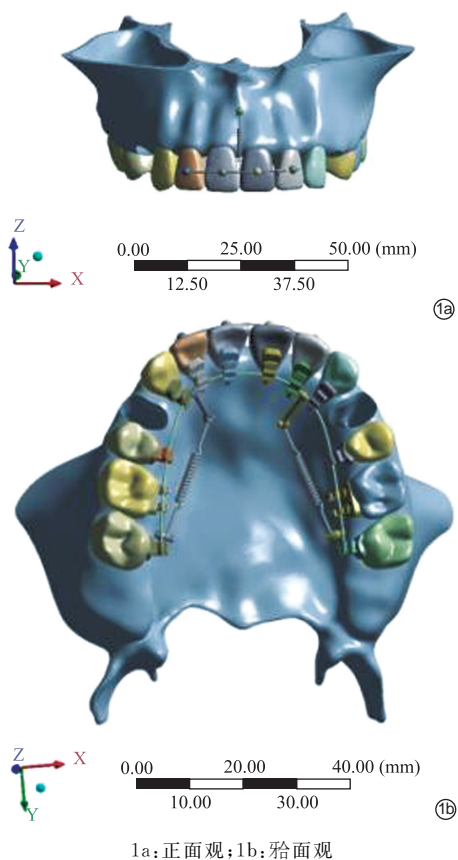


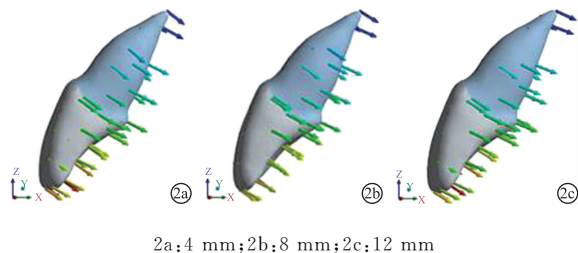
图 1 微种植体—直丝化舌侧矫治系统加力后三维有限元模型
Fig. 1 FEM of “MIA—LSW” lingual orthodontic system after loading the force.

下内收上前牙时,中切牙、侧切牙、尖牙的初始位移趋势以及牙根、牙周膜的应力情况。

2 结果

2.1 前牙列位移分析

2.1.1 中切牙位移趋势 中切牙的远中切角处表现出最大位移,随着腭侧微种植体高度的增加,中切牙切缘与根尖的位移都相应减小。矢状向上,牙冠与牙根都表现为舌向移动(+Y),且牙冠位移均大于牙根,两者位移差值随着微种植体高度的增加而减小,可见12 mm组中切牙转矩控制较好。垂直向上,牙冠与牙根都表现为伸长(-Z),随着微种植体高度增加,伸长量减少。水平向上,中切牙表现为牙冠近中倾斜(+X),牙根远中倾斜(-X)的趋势。(如图2、表2、表3)



2a:4 mm;2b:8 mm;2c:12 mm

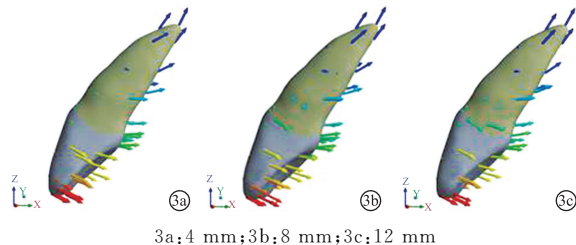
图2 中切牙初始位移趋势

Fig. 2 Initial displacement of central incisor.

2.1.2 侧切牙位移趋势 侧切牙牙冠表现出最大位移趋势。在矢状向上,牙冠与牙根均舌向移动(+Y),表现为牙冠大于牙根的倾斜移动,且冠根位移差远大于中切牙,说明3个实验组侧切牙的转矩控制均不如中切牙。随着微种植体位置的增高,侧切牙冠根差值变化较小,说明腭侧微种植体高度对侧切牙转矩的控制影响较小。垂直向上,牙冠都为伸长趋势(-Z),而牙根为压低趋势(+Z),与转矩控制不佳相符。水平向上,侧切牙表现为牙冠向近中,牙根向远中的移动趋势,随着微种植体高度的增加,倾斜程度越小。(如图3、表2、表3)

2.1.3 尖牙位移趋势 尖牙的牙尖表现为最大位移。矢状向上,牙冠表现为舌向移动(+Y),而牙根

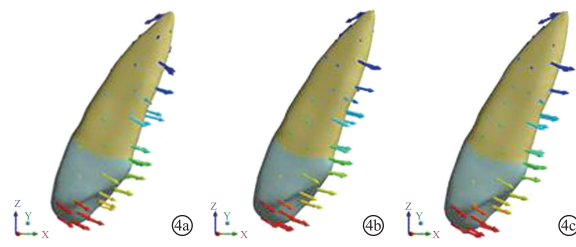
为唇向移动(-Y),当微种植体高度为4 mm和12 mm时,尖牙冠根位移差相对较小。垂直向上,尖牙牙尖与牙根都表现为伸长趋势(-Z),且随着微种植体高度增加,伸长程度越小。水平向上,尖牙牙尖和牙根都表现为远中唇向移动趋势(-X),表现为尖牙段扩弓效应。(如图4、表2、表3)



3a:4 mm;3b:8 mm;3c:12 mm

图3 侧切牙初始位移趋势

Fig. 3 Initial displacement of lateral incisor.



4a:4 mm;4b:8 mm;4c:12 mm

图4 尖牙初始位移趋势

Fig. 4 Initial displacement of canine.

2.2 前牙牙根及牙周膜应力分析 牙根部的应力分布与牙根外吸收有直接关系。模型分析结果显示前牙牙根最大应力区主要集中在侧切牙及尖牙的颈部,这也提示上前牙舌侧的牙颈部是一个关键的应力-应变区域,这与骨改建后出现的继发性牙移动趋势一致。当腭侧微种植体高度为8 mm时,牙根应力最小,为1.1297 MPa。

3组的牙周膜应力集中区与牙根应力集中区相似,基本都在侧切牙的牙颈部。当腭侧微种植体高度为4 mm时,牙周膜最大应力为0.1452 MPa;当高度为8 mm时,牙周膜应力为3组最小,最大应力为0.1406 MPa;高度为12 mm时,最大应力为

表2 3个实验组各前牙牙冠及根尖三维方向的初始位移

Tab. 2 Initial displacement of crown and root on X, Y, and Z axis of the anterior teeth in three groups

项目	4 mm			8 mm			12 mm		
	X轴	Y轴	Z轴	X轴	Y轴	Z轴	X轴	Y轴	Z轴
U1冠	9.21e-05	1.93e-04	-1.12e-04	7.96e-05	1.77e-04	-9.91e-05	7.06e-05	1.64e-04	-8.79e-05
U1根	-3.89e-06	4.12e-05	-2.73e-05	-4.00e-06	3.95e-05	-2.15e-05	-3.56e-06	3.78e-05	-1.61e-05
U2冠	2.68e-04	7.21e-04	-4.07e-04	2.61e-04	7.26e-04	-4.01e-04	2.47e-04	7.07e-04	-3.81e-04
U2根	-9.26e-06	2.34e-05	4.40e-05	-9.01e-06	2.68e-05	4.80e-05	-8.21e-06	3.02e-05	5.07e-05
U3冠	-4.05e-05	3.04e-04	-1.87e-04	-5.00e-05	3.10e-04	-1.88e-04	-5.44e-05	3.07e-04	-1.83e-04
U3根	-8.35e-06	-1.71e-05	-4.33e-06	-8.59e-06	-1.58e-05	-3.41e-06	-8.47e-06	-1.37e-05	-2.22e-06

注:U1:代表右侧上中切牙;U2:代表右侧上侧切牙;U3:代表右侧上尖牙

0.1496 MPa。可见与牙根应力相似,当微种植体高度为 8 mm 时,牙周膜应力最小。

表 3 3 个实验组各前牙牙冠、牙根矢状向初始位移及其差值

Tab. 3 Initial displacement of crown and root on Y axis of the anterior teeth in three groups mm

项目	牙冠	牙根	冠根差值	差值绝对值	
4 mm	U1	1.93e-04	4.12e-05	1.52e-04	1.52e-04
	U2	7.21e-04	2.34e-05	6.98e-04	6.98e-04
	U3	3.04e-04	-1.71e-05	3.21e-04	3.21e-04
8 mm	U1	1.77e-04	3.95e-05	1.38e-04	1.38e-04
	U2	7.26e-04	2.68e-05	6.99e-04	6.99e-04
	U3	3.10e-04	-1.58e-05	3.26e-04	3.26e-04
12 mm	U1	1.64e-04	4.78e-05	1.16e-04	1.16e-04
	U2	7.07e-04	3.02e-05	6.77e-04	6.77e-04
	U3	3.07e-04	-1.37e-05	3.21e-04	3.21e-04

注:U1:代表右侧上中切牙;U2:代表右侧上侧切牙;U3:代表右侧上尖牙

3 讨论

自 20 世纪 70 年代舌侧矫治被发明以来,其因巨大的美观优势受到越来越多正畸患者的青睐^[6,7]。由于全尺寸弓丝会引起患者的不适且增大摩擦阻力,临床舌侧矫治中常使用 0.016 英寸×0.022 英寸的不锈钢方丝进行拔牙间隙的关闭。因此,舌侧托槽本身在临床应用中不足以提供所需的转矩力。尤其在拔牙病例中,为防止舌侧矫治出现“拱形效应”,常设计配合不同部位的微种植体以加强支抗。

众多学者希望通过改变微种植体高度或牵引钩长度以使作用力线通过前牙的阻抗中心以实现前牙的整体移动。Liang 等^[8]通过建立三维有限元模型,分析颊舌侧同时施加力和力矩时牙齿的初始位移以及牙周膜应力应变分布,发现舌侧矫治力系较唇侧更易使上前牙发生舌向倾斜移动,需寻求根舌向的转矩力,所以本实验设计了 0.5 N 唇侧压低力以更好控制前牙转矩。Kojima 等^[9]研究发现高位种植(8 mm)较低位(4 mm)的牙列更易于整体移动,但高位种植相对困难且易引起黏膜激惹。Ishii 等^[10]发现牙槽嵴根方 6~8 mm 处牙槽间隔较宽,且不易损伤上颌窦底,是微种植体植入的最佳部位。本实验结果表明使用中位(8 mm)腭侧微种植体,同时满足了良好控制前牙转矩与减小牙根应力及减少黏膜刺激等条件,这一位置植入的微种植体能够很好地保持稳定,避免邻近组织结构的损伤,同时其水平向分力能够有效的内收前牙改善面型,垂直向分力可以起到少量压低前牙的效果,避免内收过程中前牙过度舌倾。侧切牙及尖牙的总体位移趋势结果

提示正畸医师在该阶段可以在尖牙处适当增加负转矩,而在侧切牙处增加正转矩;并且在减小腭侧回收力的同时适当增加唇侧压低力。

研究认为天然牙牙周膜可以承受的最大应力为 0.026 MPa,若超过强度极限,牙周膜将受到永久损伤^[11]。在舌侧矫治前牙内收过程中,整体移动是很难实现的,当牙齿发生一定程度的舌向倾斜时,牙根极易碰触唇侧牙槽骨骨皮质,造成牙根外吸收,所以正畸医生应密切关注如何有效控制前牙转矩,尤其上颌侧切牙牙颈部^[12-14]。本实验中 4 mm、8 mm、12 mm 组的牙周膜应力最大值分别为 0.1452 MPa、0.1406 MPa 和 0.1496 MPa,均大于 0.026 MPa,可能会对牙周膜造成永久损伤。使用唇侧压低力和增加腭侧微种植体的高度,可以减轻前牙舌向倾斜,并且当腭侧微种植体距牙槽嵴顶 8 mm 时,前牙牙根及牙周膜应力较小,不易造成牙根吸收。

随着数字化技术的高速发展,有限元分析法已成为口腔生物力学的一种有效研究手段^[15]。有限元法是将连续实体离散成有限个单元,并逐个研究各单元的力学性质,根据给定的载荷条件求解总体方程组,并据此计算总体应力^[16,17]。运用有限元方法,可以系统地研究正畸力作用下每个牙齿的初始位移,牙根、牙周膜的应力应变,从而分析牙齿移动趋势以及牙根、牙槽骨发生吸收的可能性,是有效的正畸生物力学研究方法。然而临床正畸治疗中牙齿的移动是一个动态过程,且牙齿受力也是持续的并随着牙齿位置的变化而变化,因此其由于只能模拟牙齿的初始位移及受力情况,有一定的局限性,还需与临床正畸实际情况相结合^[7]。

综上所述,本研究通过建立“微种植体-直丝化舌侧矫治”内收上颌前牙的三维有限元模型,分析了舌侧矫治关闭拔牙间隙阶段在加载唇侧压低力的情况下不同高度腭侧微种植体支抗对前牙移动的生物力学效应,为该技术的临床应用提供了可靠的生物力学依据。

参考文献

- [1] Owen B, Gullion G, Heo G, et al. Measurement of forces and moments around the maxillary arch for treatment of a simulated lingual incisor and high canine malocclusion using straight and mushroom archwires in fixed lingual appliances[J]. Eur J Orthod, 2017, 5(23): 1-8.
- [2] 刘小东. 个体化舌侧矫治微种植体支抗整体远移上颌牙列的三维有限元研究[D]. 郑州大学, 2016.
- [3] Xia Z, Jiang F, Chen J. Estimation of periodontal ligament's equivalent mechanical parameters for finite element modeling

- [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2013, 143(23): 486-491.
- [4] 柳大为,李晶,郭亮,等.舌侧矫治器关闭间隙上前牙牙周膜应力变化的三维有限元分析[J].*北京大学学报(医学版)*, 2018, 50(1): 141-147.
- [5] 吕志鹏,张翼,王超,等.三维有限元分析唇侧矫治器的位置改变对上前牙组牙阻抗中心的影响[J].*口腔医学研究*, 2017, 33(4): 416-419.
- [6] Romano R, Geron S, Echarri P. *Lingual & esthetic orthodontics*[M]. London: Quintessence Publishing, 2011. 677-679.
- [7] 高雪,张栋梁.三维有限元法在舌侧正畸领域的应用[J].*口腔医学研究*, 2017, 33(3): 342-344.
- [8] Liang W, Rong Q, Lin J, et al. Torque control of the maxillary incisors in lingual and labial orthodontics: a 3-dimensional finite element analysis[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2009, 135(3): 316-322.
- [9] Kojima Y, Kawamura J, Fukui H. Finite element analysis of the effect of force directions on tooth movement in extraction space closure with miniscrew sliding mechanics[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2012, 142(5): 501-508.
- [10] Ishii T, Nojima K, Nishii Y, et al. Evaluation of the implantation position of mini-screws for orthodontics treatment in the maxillary molar area by a micro CT[J]. *Bull Tokyo Dent Coll*, 2004, 45(3): 165-172.
- [11] Nassif CE, Cotrim-Ferreira A, Conti ACCF, et al. Comparative study of root resorption of maxillary incisors in patients treated with lingual and buccal orthodontics[J]. *Angle Orthod*, 2017, 87(6): 795-800.
- [12] Gorbunkova A, Pagni G, Brizhak A, et al. Impact of orthodontic treatment on periodontal tissues: a narrative review of multidisciplinary literature[J]. *Int J Dent*, 2016, 2016: 4723589.
- [13] Fritz U, Diedrich P, Wiechmann D. Apical root resorption after lingual orthodontic therapy[J]. *J Orofac Orthop*, 2003, 64(6): 434-442.
- [14] Chen W, Han AA, Zhou Y. Root resorption of self-ligating and conventional preadjusted brackets in severe anterior crowding Class I patients: a longitudinal retrospective study[J]. *BMC Oral Health*, 2015, 15: 115.
- [15] 张晓娟,郭宏铭,白玉兴,等.舌侧矫治种植支抗关闭拔牙间隙阶段三维有限元模型的建立[J].*北京口腔医学*, 2014, 22(4): 214-217.
- [16] Murakami N, Wakabayashi N. Finite element contact analysis as a critical technique in dental biomechanics: a review[J]. *J Prosthodont Res*, 2014, 58(2): 92-101.
- [17] 刘广美,刘海霞,吴晓亚,等.上颌牙列生理性支抗控制矫治器三维有限元模型的建立及应力分析[J].*口腔医学研究*, 2017, 33(3): 320-323.

[收稿日期: 2018-07-23]

(本文编辑 李四群)

《口腔疾病防治》杂志征稿及征订启事

《口腔疾病防治》是国内外公开发行的口腔医学学术类期刊,月刊,CN 44-1724/R,ISSN 2096-1456, CODEN KJFOA4,为中国科技核心期刊,被国内外多家重要数据库收录,由南方医科大学口腔医院(广东省口腔医院)、广东省牙病防治指导中心主办,中南大学、郑州大学、南昌大学、重庆医科大学、福建医科大学等五所大学口腔医学院协办;主要报道国内外口腔医学研究新进展和口腔疾病防治新成果、新技术、新经验,服务口腔疾病预防治疗领域学术交流和口腔疾病防控工作。

本刊图随文走、全铜版纸彩色印刷,设有专家论坛、专家述评、专栏论著、基础研究、临床研究、防治实践、综述等栏目。本刊对录用论文实行免费快速发表,不收取作者任何费用并支付稿酬。

本刊官网及投稿网址为 <http://www.kjbfz.com>,本刊官网文献实行开放获取(Open Access, OA),免费为读者提供全文服务。《口腔疾病防治》已开设微信公众号,每月推出专家论坛文章及当期全文,读者可通过扫描杂志封面的二维码或者搜索微信公众账号“口腔疾病防治杂志”、微信号“kjbfz”关注本刊。

本刊没有授权或委托任何其他网站受理作者投稿,谨防诈骗。欢迎广大读者订阅。全国各地邮局均可订阅,邮发代号 46-225。每月 20 日出版,定价为每册 5.00 元,全年 60 元。如错过邮局订阅时间,可直接向编辑部订购。请将款项汇入开户银行:广州市建行昌岗路支行,账号:44001430402050202779,户名:南方医科大学口腔医院,并且将订阅者的邮政编码、详细地址、姓名、联系电话、订阅年度、份数及汇款回执扫描件发送至本刊邮箱(kjbfz@126.com)。编辑部电话:020-84403311, Email: kjbfz@126.com。