

正畸治疗诱发牙根吸收的研究进展

兰 丹, 周建萍*

重庆医科大学附属口腔医院正畸科, 重庆

收稿日期: 2024年11月25日; 录用日期: 2024年12月18日; 发布日期: 2024年12月30日

摘 要

牙根吸收作为正畸治疗常见的并发症之一, 了解正畸诱发牙根吸收的机制、风险因素、诊断、预防和管理策略, 对于正畸医生优化治疗效果和确保患者长期口腔健康至关重要。本综述系统地探讨了正畸治疗诱发牙根吸收的研究现状, 旨在加深对正畸治疗中牙根吸收的认识, 促进相关研究的进一步发展, 为患者提供更加安全、有效的正畸治疗。

关键词

正畸治疗, 牙根吸收, 风险因素, 预防管理, 治疗进展

Advances in Orthodontic Treatment-Induced Root Resorption

Dan Lan, Jianping Zhou*

Department of Orthodontics, Stomatological Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: Nov. 25th, 2024; accepted: Dec. 18th, 2024; published: Dec. 30th, 2024

Abstract

As one of the common complications of orthodontic treatment, understanding the mechanisms, risk factors, diagnosis, prevention and management strategies of orthodontic-induced root resorption is crucial for orthodontists to optimise treatment outcomes and ensure long-term oral health of patients. This review systematically explores the current status of research on root resorption induced by orthodontic treatment, aiming to deepen the understanding of root resorption in orthodontic treatment, promote the further development of related research, and provide patients with safer and more effective orthodontic treatment.

*通讯作者。

文章引用: 兰丹, 周建萍. 正畸治疗诱发牙根吸收的研究进展[J]. 临床个性化医学, 2024, 3(4): 2154-2160.
DOI: 10.12677/jcpm.2024.34305

Keywords

Orthodontic Treatment, Root Resorption, Risk Factors, Preventive Management, Treatment Progress

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

正畸治疗是现代口腔医学重要的组成部分之一，其目的是通过施加适当的力量移动牙齿，来矫正错颌畸形并改善美观。现代口腔正畸学倡导“健康正畸”，追求在健康的基础上实现美观、功能及长期稳定的效果，而牙周组织和牙根是衡量健康正畸的重要指标[1]。在临床实践过程中，牙根吸收问题越来越受到重视。它不仅影响治疗效果，还可能对患者的长期口腔健康造成不利影响。

牙根吸收是牙根尖部分永久性或不可逆性的丧失，是正畸治疗常见的医源性副作用，其可能导致牙根变短甚至造成牙齿松动脱落，在临床上难以完全避免[2]-[4]。所以，了解相关牙根吸收的原因，制定有效的预防措施，对牙根的吸收非常重要。随着正畸技术的不断进步和患者对治疗效果期望的不断提高，正畸医生需要重视牙根吸收的诊断和处理。因此，深入探讨正畸治疗与牙根吸收之间的关系，对优化治疗方案和减少并发症具有重要意义。本综述旨在通过分析牙根吸收的相关病因、发病机制、风险因素、诊疗手段及预后等，期望为临床医生和科研人员提供有关正畸牙齿移动引起牙根吸收的认识与参考。

2. 正畸治疗与牙根吸收

牙根吸收是一种非细菌性损害，主要由破牙骨质细胞与牙齿软、硬组织相互作用，对矿化的牙骨质或牙本质产生影响。在正畸治疗中，为移动牙齿施加的机械力引发了无菌性炎症反应，导致压迫区域出现无菌性坏死，并伴随组织的透明变性，这是正畸牙齿移动造成牙根吸收的生物学基础[5][6]。正畸力对牙槽骨和牙骨质均会产生作用。在适宜的矫治力作用下，牙齿会在不断改建的牙槽骨中移动，而牙骨质保持相对的稳定；当正畸力超过毛细血管压力时，牙骨质在正畸移动过程中受到压力，也可能出现吸收现象[7]。牙根吸收的发生与破牙骨质细胞和成牙骨质细胞之间的动态平衡被打破有关。在正畸力的作用下，牙周组织发生重塑，破牙骨质细胞活跃，成牙骨质细胞缺失，牙根表面的牙骨质被破坏，启动牙根吸收。虽然成牙骨质细胞也在进行新骨形成，但在某些情况下，骨吸收速度可能超出形成速度，从而导致牙根吸收[8]。

研究表明，接受正畸治疗的患者中几乎普遍存在不同程度的根尖吸收[3]。通常，正畸治疗不会导致显著的牙根吸收，但牙根在微观水平上可能出现变化，而这些变化在放射学检查中往往难以检测。牙根吸收会导致牙根根尖变平或变钝，从而使受影响的牙齿看起来比邻近牙齿短[9]。牙根吸收通常是无症状的；只有在严重吸收导致部分牙根丧失时，才可能影响牙齿的功能和固位[10]。临床上，48%~66%的正畸患者会出现轻至中度牙根吸收，仅1%~5%的患者会发生严重牙根吸收(>4 mm 或超过原根长的 1/3) [11]。当牙根长度丧失 1~2 mm (约 1/4 牙根长度)时，被认为具有重要的临床意义[12]，并可能对治疗成功产生影响。

然而，正畸牙齿移动会增加牙根吸收的风险和严重程度，这是不可逆的，也可能带来牙龈改变或颜色变化[13]。虽然正畸源性牙根吸收可发生于任何牙齿上，但上颌切牙尤为常见，其次是下颌切牙，在尖牙、前磨牙和磨牙也时有发生[14]。

3. 正畸牙根吸收的影响因素

正畸诱导的根尖吸收是正畸治疗常见且复杂的一种并发症, 其发生受到多种因素的综合影响。牙根吸收的发生与正畸过程中施加的机械力密切相关。研究发现, 矫治力的大小与牙根吸收程度呈非线性变化[15]。Kuznetsova 等学者指出, 过大或不均匀的力可能破坏牙根结构, 从而引发牙根吸收现象, 这为临床医生施加矫治力提供了重要的参考依据[16]。此外, Paetyangkul 等[17]学者研究一致得出当施加的正畸力值增大时, 根尖吸收会增加。即使施加较轻的力, 但随着正畸治疗时间增加, 也会增加牙根尖吸收的风险, 因此定期监测和评估显得尤为重要[18]。目前有证据表明, 0.5 N~1 N 的力是优化牙齿移动速度和患者舒适度的最佳范围, 并会产生较少的副作用[19]。此外, 多数研究认为拔牙会增加牙根吸收风险, 可能是由于拔牙后牙齿移动距离更大, 距离越远意味着治疗的正畸力和持续时间越大, 因此牙根吸收也越大[2]。正畸力的大小和方向决定了牙齿的移动方式和速度, 进而影响牙根的吸收程度。不同牙齿的移动方式对牙根吸收量有统计学意义, 整体牙移动会对牙根产生压力, 引起牙根的表面吸收; 倾斜性移动则将压力集中在根尖区, 容易导致该区域的吸收[20]。压低移动通常伴随着更多的牙根吸收, 可能与此运动下根尖承受更大的压力和应力有关[21], 但一般在临床可接受范围内。

矫治器的类型也是影响正畸源性牙根吸收的重要因素之一。不同类型的矫治器对牙齿施加的力量和方式各不相同, 导致的牙根吸收程度也不同。固定矫治器在施力方式上与活动矫治器存在差异: 前者为持续力, 后者是间歇力。持续性力量产生迅速的牙移动更易造成牙根的吸收, 而间歇性力量则可以提供牙槽骨和牙骨质重建时间, 有利于减少牙根吸收的发生[22]。传统的固定矫治器由于力量较大且分布不均, 可能增加牙根吸收的风险; 而隐形矫治器施加的力量更加柔和、均匀, 有助于减少牙根吸收的风险。此外, 上颌快速扩弓产生的强力也可能导致附着的前磨牙和磨牙的牙根吸收, 甚至未附着的第二前磨牙也可能出现吸收现象[23]。

牙根吸收的发生过程复杂, 其中包括环境和遗传因素的影响, 这些因素共同影响正畸牙根吸收的易感性。不同患者的生理特征、遗传背景以及年龄等因素可能导致其对正畸力的反应存在显著差异, 从而影响牙根的健康状况[24]。研究发现, 由于年龄增长会导致牙周膜血管减少和骨密度增加, 牙根吸收的风险会随年龄而增加[25]。Mavragani 等[26]发现正畸治疗对年轻恒牙的牙根发育起到积极的促进作用, 正畸治疗后的牙根长度显著大于治疗前; 而老年患者因骨质疏松等原因, 牙根吸收风险更高。患者的口腔健康状况和牙周组织状态与牙根吸收密切相关。正畸治疗通过排齐牙齿和平衡咬合来改善牙周健康, 进而通过使患者更容易接触牙齿和减少咬合创伤来改善卫生健康状况。固定正畸装置可促进龈上生物膜的形成, 并使牙周组织状况恶化[27]。牙周病患者正畸治疗时牙根吸收的风险会增加, 这与正畸压力会导致牙周组织的炎症反应密切相关[28]。综上所述, 牙根吸收的影响因素复杂多样, 临床医生在制定治疗方案时应综合考虑这些因素, 以降低牙根吸收的风险, 提升正畸治疗的安全性和效果。

4. 正畸牙根吸收的诊断

正畸源性牙根吸收的检测可以通过传统的 X 线技术(全景片或根尖片)、锥形束 CT (CBCT)、扫描电镜和组织病理切片等完成。在根尖片上, 通过测量釉牙骨质界到根尖的垂直距离来确定牙根长度, 并将牙根吸收分为轻(1~2 度)、中(3 度)、重度(4 度) [29]。轻度(1~2 度): 根尖区牙根轮廓不规则或牙根长度吸收小于 2 mm; 中度(3 度): 牙根长度减少大于 2 mm 但小于牙根全长的 1/3; 重度(4 度): 牙根长度减少大于 4 mm, 或超过牙根原长度的 1/3 [14]。

CBCT 是诊断正畸牙根吸收的有效成像方法, 通过三维重建技术从任意角度观察, 有助于增强三维截面的研究, 可清晰显示牙根结构, 从而更准确地定性判断牙根吸收, 能显示出更高的准确性和灵敏度[30]。Wang [31]的研究表明, CBCT 能准确测量牙齿和牙根吸收体积, 是一种更准确可靠的三维测量方

法。通过测量釉质牙骨质界到根尖的体积变化,可评估牙根吸收量,其中轻度吸收是牙根体积减少<10%,中度吸收是牙根体积减少在 10%~20%,重度吸收指减少>20% [32]。

此外,龈沟液分析技术可以通过直接测定龈沟液中生化成分的变化,来间接检测牙根吸收的情况[33]。庄丽等人[34]研究发现龈沟液中基质金属蛋白酶-9 (MMP-9)与正畸治疗中的牙根吸收密切相关。现有证据显示牙本质涎蛋白(DSP)可能是监测正畸治疗期间牙根吸收的生物标记物[35],检测龈沟液中牙本质涎蛋白的浓度和含量可以帮助判断牙根吸收的程度[36]。

5. 正畸牙根吸收的预后及治疗

正畸治疗的理想情况是完全避免牙根吸收。但在实际治疗中,牙根吸收的问题常常难以避免,因此,控制可控因素,尽量将牙根吸收程度降至最小,显得尤为重要。牙根吸收的初期,患者可能并没有明显的自觉症状,但随着吸收的加重,牙齿的稳定性会逐渐降低,甚至可能出现松动的情况。有研究表明,经过 10~25 年随访观察发现正畸牙根吸收的预后良好,牙齿能在口腔内长期存在并正常发挥功能[37];但当引起牙槽骨吸收时,可能会影响出现牙根吸收的牙齿的预后和寿命。

有证据显示,正畸治疗可能增加根尖吸收的发生率和严重程度。在正畸干预后,牙根长度和体积均有减小,但这些变化均在临床可接受范围内。牙根明显缩短可能会导致牙冠与牙根的比例不恰当,同时也会破坏与牙周组织的邻近关系。根尖吸收 3 mm 相当于牙周附着丧失 1 mm,这会加速牙周病的进展[38]。如果发现牙根严重吸收,需重新评估治疗方案[30]。在这种情况下,建议暂停正畸治疗 2~3 个月,必要时可中断治疗 6 个月,给予牙骨质修复的时间。治疗结束后,应进行影像学随访评估,尤其是使用固定保持器时,要避免保持期内的咬合创伤[11]。

治疗牙根吸收的临床措施主要包括激光治疗、药物干预、干细胞治疗和骨皮质切开术[39]。低水平激光治疗以及低强度超声治疗等方法能促进牙槽骨的改建,加速正畸牙齿的移动,并减少牙根吸收的发生。有研究表明,低水平激光联合同种异体冻干骨移植可显著降低牙根吸收的程度[40]。万哲等研究表明骨疏康能促进正畸治疗过程中的成骨分化,说明适当的药物干预可以有效减轻牙根吸收的程度,为临床提供新的思路和方法[41]。张丹等发现皮下脂肪来源干细胞通过降低正畸牙齿移动过程中破牙骨质细胞和破骨细胞的数量来减小牙根吸收面积和深度,从而抑制正畸源性牙根吸收,干细胞的应用可显著降低牙根吸收的发生率,为未来的治疗提供了新的方向[42]。李欢研究发现,骨皮质切开手术与正畸牵引联合应用能够有效减轻牙周炎患者的牙根吸收现象,提示临床医生在处理复杂病例时应考虑综合治疗方案[43]。郑琳琳等学者比较了无托槽隐形矫治器与传统固定矫治器对正畸患者牙周状况及牙根吸收的影响,结果显示隐形矫治器在保护牙根方面具有明显优势,为正畸治疗的个性化选择提供了重要依据[44]。此外,基因治疗机制尚未明确,仍需进一步探索。

正畸牙根吸收无法避免且不可预测,为了将其风险降至最低,多位口腔正畸专家联合提出了正畸源性牙根吸收的临床处理建议[14]。在未来的正畸治疗中,采用新技术和治疗方法以控制或减少牙根吸收的发生将是重要的研究方向。

6. 结论

正畸诱导的牙根吸收是一个不可避免的过程,正畸医生必须密切监测和评估牙根吸收的风险因素,以便采取预防措施,尽量减少对牙齿的潜在不利影响,可以防止其发展到严重阶段。目前临床上主要采用轻力、短距离移动牙齿、间歇加力等方式来减少牙根吸收发生的比例[45]。为了更好地了解正畸治疗与牙根吸收的关系,有必要进行更深入、长期的研究。未来还需要更高质量的临床试验,以充分了解牙根吸收背后的复杂机制,并制定更有效的预防和治疗策略,得出更可靠的结论。

综上, 正畸医生需要采取一系列措施来预防牙根吸收的发生。首先, 在正畸治疗前, 应充分了解患者的具体情况和治疗需求, 全面评估患者状况, 选择最适合的矫治器类型, 制定个性化的治疗方案; 医生应与患者保持良好的沟通, 告知患者牙根吸收的风险及可能的后果, 增强患者的自我管理意识, 交代他们在治疗期间需要保持良好的口腔卫生习惯。其次, 在正畸治疗过程中, 正畸医生需要精准控制矫治力的大小和方向, 合理调整矫治器的力量, 以避免对牙齿施加过大的压力。定期进行影像学检查或生物标志物监测牙根吸收情况, 有助于及时调整治疗方案, 降低因牙根吸收导致的长期并发症风险, 并利用最新的研究成果对临床实践进行指导, 以长期稳定治疗效果和患者的牙齿健康。

参考文献

- [1] Silverstein, L.H. and Witkin, G. (2001) Adjunctive Orchestrated Orthodontic Therapy. *Journal of General Orthodontics*, **12**, 19-22.
- [2] Yassir, Y.A., McIntyre, G.T. and Bearn, D.R. (2020) Orthodontic Treatment and Root Resorption: An Overview of Systematic Reviews. *European Journal of Orthodontics*, **43**, 442-456. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjaa058>
- [3] Sondejijker, C.F.W., Lamberts, A.A., Beckmann, S.H., Kuitert, R.B., van Westing, K., Persoon, S., et al. (2019) Development of a Clinical Practice Guideline for Orthodontically Induced External Apical Root Resorption. *European Journal of Orthodontics*, **42**, 115-124. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjz034>
- [4] 白玉兴. 正畸治疗中的风险认识与风险管理[J]. 中华口腔医学杂志, 2019, 54(12): 793-797.
- [5] Brezniak, N. and Wasserstein, A. (2002) Orthodontically Induced Inflammatory Root Resorption. Part I: The Basic Science Aspects. *The Angle Orthodontist*, **72**, 175-179.
- [6] Brezniak, N. 2002Wasserstein, A. (2002) Orthodontically Induced Inflammatory Root Resorption. Part II: The Clinical Aspects. *The Angle Orthodontist*, **72**, 180-184.
- [7] 李晓彦. 超声对大鼠正畸性牙根吸收后牙骨质修复的作用及机制研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国人民解放军医学院, 2013.
- [8] Jung, Y. and Cho, B. (2011) External Root Resorption after Orthodontic Treatment: A Study of Contributing Factors. *Imaging Science in Dentistry*, **41**, Article No. 17. <https://doi.org/10.5624/isd.2011.41.1.17>
- [9] Patel, S., Saber, N., Pimental, T. and Teng, P. (2022) Present Status and Future Directions: Root Resorption. *International Endodontic Journal*, **55**, 892-921. <https://doi.org/10.1111/iej.13715>
- [10] Picanço, G.V., Freitas, K.M.S.d., Cançado, R.H., Valarelli, F.P., Picanço, P.R.B. and Feijão, C.P. (2013) Predisposing Factors to Severe External Root Resorption Associated to Orthodontic Treatment. *Dental Press Journal of Orthodontics*, **18**, 110-120. <https://doi.org/10.1590/s2176-94512013000100022>
- [11] Weltman, B., Vig, K.W.L., Fields, H.W., Shanker, S. and Kaizar, E.E. (2010) Root Resorption Associated with Orthodontic Tooth Movement: A Systematic Review. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **137**, 462-476. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2009.06.021>
- [12] Lopatiene, K. and Dumbravaite, A. (2008) Risk Factors of Root Resorption after Orthodontic Treatment. *Stomatologija*, **10**, 89-95.
- [13] Linkous, E.R., Trojan, T.M. and Harris, E.F. (2020) External Apical Root Resorption and Vectors of Orthodontic Tooth Movement. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **158**, 700-709. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2019.10.017>
- [14] 李煌, 等. 正畸根尖区牙根外吸收的风险因素及其临床处理建议的专家共识[J]. 华西口腔医学杂志, 2022, 40(6): 629-637.
- [15] 李翀乾, 刘继光. 正畸治疗中牙根吸收影响因素的研究进展[J]. 北京口腔医学, 2018, 26(3): 178-180.
- [16] Kuznetsova, M.Y., Sevbitov, A.V., Tikhonov, V.E., Platonova, V.V., Zangieva, O.T. and Enina, Y.I. (2022) The Quality of Life of Patients after Orthodontic Treatment Depending on the Use of Different Types of Retention Appliances. *Stomatologiya*, **101**, Article No. 40. <https://doi.org/10.17116/stomat202210101140>
- [17] Paetyangkul, A., Türk, T., Elekdağ-Türk, S., Jones, A.S., Petocz, P. and Darendeliler, M.A. (2009) Physical Properties of Root Cementum: Part 14. The Amount of Root Resorption after Force Application for 12 Weeks on Maxillary and Mandibular Premolars: A Microcomputed-Tomography Study. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **136**, 492.e1-492.e9. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2009.03.008>
- [18] Alotaibi, S.D., Alotaibi, A.S., Barashi, M.A., Khojah, M.Z. and Rajeh, M.T. (2022) The Influence of Obstructive Sleep Apnea on Self-Perceived Dental Aesthetics and Need for Orthodontic Treatment among the General Population in

- Makkah, Saudi Arabia. *Journal of Orthodontic Science*, **11**, Article No. 52. https://doi.org/10.4103/jos.jos_5_22
- [19] Theodorou, C.I., Kuijpers-Jagtman, A.M., Bronkhorst, E.M. and Wagener, F.A.D.T.G. (2019) Optimal Force Magnitude for Bodily Orthodontic Tooth Movement with Fixed Appliances: A Systematic Review. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **156**, 582-592. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2019.05.011>
- [20] Cuoghi, O.A., Aiello, C.A., Consolaro, A., Tondelli, P.M. and Mendonça, M.R.d. (2014) Resorption of Roots of Different Dimension Induced by Different Types of Forces. *Brazilian Oral Research*, **28**, 1-7. <https://doi.org/10.1590/1807-3107bor-2014.vol28.0013>
- [21] Bellini-Pereira, S.A., Almeida, J., Aliaga-Del Castillo, A., dos Santos, C.C.O., Henriques, J.F.C. and Janson, G. (2020) Evaluation of Root Resorption Following Orthodontic Intrusion: A Systematic Review and Meta-Analysis. *European Journal of Orthodontics*, **43**, 432-441. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjaa054>
- [22] 张莉, 房兵, 吴勇. 持续力和间歇力对牙移动骨改建的影响[J]. 中国口腔颌面外科杂志, 2012, 10(3): 257-260.
- [23] Dindaroğlu, F. and Doğan, S. (2015) Evaluation and Comparison of Root Resorption between Tooth-Borne and Tooth-Tissue Borne Rapid Maxillary Expansion Appliances: A CBCT Study. *The Angle Orthodontist*, **86**, 46-52. <https://doi.org/10.2319/010515-007.1>
- [24] Abdelhafez, R.S., Talib, A.A. and Al-Taani, D.S. (2021) The Effect of Orthodontic Treatment on the Periodontium and Soft Tissue Esthetics in Adult Patients. *Clinical and Experimental Dental Research*, **8**, 410-420. <https://doi.org/10.1002/cre2.480>
- [25] Brezniak, N. and Wasserstein, A. (1993) Root Resorption after Orthodontic Treatment: Part 2. Literature Review. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **103**, 138-146. [https://doi.org/10.1016/s0889-5406\(05\)81763-9](https://doi.org/10.1016/s0889-5406(05)81763-9)
- [26] Mavragani, M. (2002) Changes in Root Length during Orthodontic Treatment: Advantages for Immature Teeth. *The European Journal of Orthodontics*, **24**, 91-97. <https://doi.org/10.1093/ejo/24.1.91>
- [27] Alfuriji, S., Alhazmi, N., Alhamlan, N., Al-Ehaideb, A., Alruwaithi, M., Alkathheeri, N., *et al.* (2014) The Effect of Orthodontic Therapy on Periodontal Health: A Review of the Literature. *International Journal of Dentistry*, **2014**, Article ID: 585048. <https://doi.org/10.1155/2014/585048>
- [28] Cha, C., Huang, D., Kang, Q., Yin, M. and Yan, X. (2021) The Effects of Dehiscence and Fenestration before Orthodontic Treatment on External Apical Root Resorption in Maxillary Incisors. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **160**, 814-824. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2020.06.043>
- [29] Bayir, F. and Bolat Gumus, E. (2021) External Apical Root Resorption after Orthodontic Treatment: Incidence, Severity and Risk Factors. *Journal of Dental Research, Dental Clinics, Dental Prospects*, **15**, 100-105. <https://doi.org/10.34172/joddd.2021.017>
- [30] Deng, Y., Sun, Y. and Xu, T. (2018) Evaluation of Root Resorption after Comprehensive Orthodontic Treatment Using Cone Beam Computed Tomography (CBCT): A Meta-analysis. *BMC Oral Health*, **18**, Article No. 116. <https://doi.org/10.1186/s12903-018-0579-2>
- [31] Wang, Y., He, S., Guo, Y., Wang, S. and Chen, S. (2013) Accuracy of Volumetric Measurement of Simulated Root Resorption Lacunas Based on Cone Beam Computed Tomography. *Orthodontics & Craniofacial Research*, **16**, 169-176. <https://doi.org/10.1111/ocr.12016>
- [32] Liu, W., Shao, J., Li, S., Al-balaa, M., Xia, L., Li, H., *et al.* (2021) Volumetric Cone-Beam Computed Tomography Evaluation and Risk Factor Analysis of External Apical Root Resorption with Clear Aligner Therapy. *The Angle Orthodontist*, **91**, 597-603. <https://doi.org/10.2319/111820-943.1>
- [33] 王玉兰, 王铁军, 柳忠豪. 牙根吸收的研究进展[J]. 北京口腔医学, 2017, 25(1): 49-51.
- [34] 庄丽, 白玉兴, 李俊发. 龈沟液中基质金属蛋白酶-9 含量与正畸牙根吸收相关性的实验研究. 北京口腔医学, 2007, 15(2): 65-69.
- [35] Balducci, L., Ramachandran, A., Hao, J., Narayanan, K., Evans, C. and George, A. (2007) Biological Markers for Evaluation of Root Resorption. *Archives of Oral Biology*, **52**, 203-208. <https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2006.08.018>
- [36] 周鑫, 陈莉莉. 正畸治疗与牙根吸收的关系[J]. 中华口腔医学杂志, 2023, 58(9): 893-898.
- [37] Jonsson, A., Malmgren, O. and Levander, E. (2007) Long-Term Follow-Up of Tooth Mobility in Maxillary Incisors with Orthodontically Induced Apical Root Resorption. *The European Journal of Orthodontics*, **29**, 482-487. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjm047>
- [38] Remington, D.N., Joondeph, D.R., Årtun, J., Riedel, R.A. and Chapko, M.K. (1989) Long-Term Evaluation of Root Resorption Occurring during Orthodontic Treatment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **96**, 43-46. [https://doi.org/10.1016/0889-5406\(89\)90227-8](https://doi.org/10.1016/0889-5406(89)90227-8)
- [39] 周嘉瑶, 徐宇红. 正畸源性牙根吸收治疗的研究进展[J]. 中国美容医学, 2023, 32(5): 202-205.

- [40] Seifi, M., Atri, F. and Yazdani, M.M. (2014) Effects of Low-Level Laser Therapy on Orthodontic Tooth Movement and Root Resorption after Artificial Socket Preservation. *Dental Research Journal*, **11**, 61-66.
- [41] 万哲, 杜军, 何静, 等. 骨疏康干预 Beagle 犬正畸牙根吸收过程中的成骨分化及机制[J]. 中国组织工程研究, 2022, 26(17): 2654-2659.
- [42] 张丹, 杨春先, 胥鹏, 等. 皮下脂肪来源干细胞抑制正畸源性牙根吸收的实验研究[J]. 中国修复重建外科杂志, 2023, 37(12): 1533-1540.
- [43] 李欢. 骨皮质切开手术联合正畸牵引对牙周炎致错位前牙患者的疗效及对牙根吸收的影响[J]. 吉林医学, 2024, 45(6): 1310-1313.
- [44] 郑琳琳, 王秀奎, 范海霞, 等. 无托槽隐形矫治器和唇侧固定矫治器对正畸患者牙周状况及牙根吸收的影响[J]. 中国医师杂志, 2024, 26(1): 58-62.
- [45] 程涛, 张漫. 口腔正畸治疗中牙根吸收的研究进展[J]. 临床口腔医学杂志, 2016, 32(1): 59-61.