

三维分区量化正畸牙根吸收

黄 婧¹, 杨崇实^{1,2*}

¹重庆医科大学附属口腔医院正畸科, 重庆

²重庆市口腔疾病与生物医学重点实验室, 重庆

收稿日期: 2024年11月27日; 录用日期: 2024年12月21日; 发布日期: 2024年12月31日

摘 要

本文综述了三维分区量化在正畸治疗中牙根吸收问题的研究现状, 包括相关的评估方法、影响因素、研究进展以及未来发展方向, 旨在为正畸临床实践和研究提供全面的参考。

关键词

牙根吸收, 三维分区, 量化

Three-Dimensional Partition Quantification of Orthodontic Root Resorption

Jing Huang¹, Chongshi Yang^{1,2*}

¹Department of Orthodontics, Stomatological Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

²Chongqing Key Laboratory of Oral Diseases and Biomedical Sciences, Chongqing

Received: Nov. 27th, 2024; accepted: Dec. 21st, 2024; published: Dec. 31st, 2024

Abstract

This article reviews the current research on three-dimensional partition quantification of orthodontic root resorption, including related assessment methods, influencing factors, research progress, and future development directions. The aim is to provide a comprehensive reference for orthodontic clinical practice and research.

Keywords

Root Resorption, Three-Dimensional Partition, Quantification

*通讯作者。

文章引用: 黄婧, 杨崇实. 三维分区量化正畸牙根吸收[J]. 临床个性化医学, 2024, 3(4): 2719-2724.

DOI: 10.12677/jcpm.2024.34385



1. 引言

正畸治疗引发的牙根外部吸收(ERR), 是牙根硬组织发生的永久性损失, 作为正畸治疗常见的不良并发症之一, 受到广泛关注[1]-[3]。ERR 的病因错综复杂, 主要涵盖患者相关因素和治疗相关因素。患者相关因素包括遗传学、性别、年龄、牙齿类型、全身因素、牙根形态以及创伤史或既往根吸收情况[2] [4]; 而治疗相关因素涉及矫治器类型、治疗持续时间、牙齿运动类型、施加力的大小、正畸作用力持续时间以及是否拔牙治疗[5]。多数情况下, ERR 并无明显临床表现, 但病情严重时, 会对牙齿的功能产生损害, 甚至导致牙齿松动、脱落[2]。遗憾的是, 在正畸实践中, ERR 几乎难以完全避免, 其患病率在 20%~100% 之间波动[6]。

研究中 ERR 患病率的差异可归因于评估和检测 ERR 的不同标准。在之前文献报道中, 评估 ERR 主要方法有牙根长度变化[3], 牙根体积变化[7]及牙根形状变化[8], 不同评估方法间检测 ERR 患病率不同; 在 ERR 检测方面组织学和放射学在诊断之间存在区别。经正畸治疗的牙齿, 组织学检查 ERR 患病率通常达 90%以上[9], 而放射检测到的 ERR 患病率通常为较低的百分比。虽然组织学检查被认为是诊断疾病的金标准, 但它在正畸临床应用是有限的。因此, 影像学检查是检测 ERR 的主要方法。

二维 X 射线成像, 如根尖片、全景和头颅侧位 X 线片, 以前常用于检测 ERR [10][11]。然而, ERR 检测的准确性和精度总是会受到图像失真、解剖结构叠加和投影角度的影响[7]。随着技术的发展, 三维分区量化的方法为更准确地研究牙根吸收在正畸过程中的变化提供了新的途径, 在使用 CBCT 评估牙根吸收的研究中, 牙根吸收的患病率明显升高。

2. 三维分区量化的方法

(一) 锥形束计算机断层扫描(CBCT)

锥形束计算机断层扫描(CBCT)突破了二维成像的局限, 通过 1:1 的比例重建, 可提供无放大误差的三维信息[5] [7] [12]。在进行三维重建时, CBCT 能从任意角度呈现图像, 有效提高了精度和灵敏度。CBCT 不仅可实现二维线性或角度测量[13] [14], 还能通过三维体积测量来检测 ERR [15]-[17]。由于正畸治疗中牙齿呈多向运动[18]。ERR 可出现在牙根的任意一侧, 且大小和形状各异。因此, 仅进行如 ERR 长度测量等二维分析是不够的, 三维体积测量能够更准确、更全面地反映 ERR 的情况[19]。

(二) Micro-CT

Micro-CT 具备更高的分辨率[11], 能够更精细地展现牙根微观结构的变化。在研究牙根吸收的三维分区量化时, 可观察到牙骨质、牙周膜等在吸收过程中的微小变化。不过, Micro-CT 主要适用于动物实验或体外研究中对牙根吸收机制的深入探索, 不适用于临床体内实验。

(三) 软件分析系统

当前, 有多种专门用于牙科影像分析的软件, 如 ITK-Snap、Mimics 以及各种基于卷积计算机深度学习的算法[1] [7] [20], 这些软件可对三维影像数据(主要源自 CBCT)进行处理。通过设定特定阈值手动分层或利用算法自动识别牙齿轮廓来提取牙齿模型[18] [19]。在重建牙齿三维模型后, 依据牙根的解剖学标志点分割牙根, 随后根据不同研究目的划分为不同区域(如根尖区、根中 1/3 区和根颈 1/3 三个区域; 或者颊侧根尖区、根中 1/3 区和根颈 1/3 以及舌侧根尖区、根中 1/3 区和根颈 1/3 六个区域), 通过计算每个

区域体积的变化, 实现对牙根吸收的量化分析。

3. 三维量化正畸治疗中牙根吸收的影响因素

(一) CBCT 的分辨率

在 CBCT 成像中, 扫描体被重建为像素三维矩阵, 像素依据内部材料衰减获得灰度值。像素大小是影响 CBCT 图像分辨率的因素之一, 同时也导致噪声和空间分辨率相互制约。研究采用 3 种 3D 成像方式对离体牙齿体积差异进行量化时发现, CBCT 分割与参考标准相比, 体积存在 15.2% (81.6 mm^3)~28.1% (152.8 mm^3) 的人为增加, 重建体积随像素大小增加而增大, 高估的来源与像素大小、部分体积效应、散射 X 射线、视场大小和/或分割主观性有关。CBCT 成像可能无法有效检测 ERR, 使用 CBCT 评估 ERR 的专家和研究人員应了解其局限性, 明白所测体积可能高估, 从而掩盖真实的牙根变化[11]。并且, 在像素大小一致时, CBCT 分辨率的高低在研究中也会对 ERR 产生影响[21]。高分辨率 CBCT 图像的诊断精度高于低分辨率图像, 高分辨率图像在诊断根中部和重度 ERR 时精度最高, 而低分辨率图像在诊断根尖区轻度 ERRs 时精度最低。同样, 吸收的严重程度也会影响诊断准确性, 与中度和重度 ERR 相比, 轻度的 ERR 通常诊断准确性较低。

(二) 人工智能

在 CBCT 三维模型重建过程中, 以往对 ERR 的研究主要依赖人工阈值分割。然而, 这种方法在研究人员进行牙齿分割时往往会引入主观因素, 且耗时较长[22]。人工智能技术为这一问题提供了理想的解决方案。Trelenberg-Stoll V 证实了自动牙齿分割的准确性与被认为是最准确的逐片人工分割相当, 且速度比人工分割快约 81% [23]。此外, 赵等学者也证明了他们的 3D 牙齿分割深度学习算法在准确性和速度方面均优于最先进的深度学习方法[20]。除了在 CBCT 中提取牙齿 3D 模型之外, 人工智能在各种情况下的应用日益广泛, 并在测量、诊断、治疗设计等方面推动了正畸学的发展[24] [25]。

(三) 实验方法

正畸治疗前后检测部位的一致性 ERR 检测的另一个关键因素[3] [26]。通常在准确对齐正畸前后同名牙齿模型后, 进行牙冠牙齿分割才能获得准确的牙根模型。由于 CBCT 分辨率不高, 导致结构特征不明显, 降低了配准的准确性, 进而削弱了结果的说服力[22]。并且在后续的牙根分区测量时, 需依据不同的解剖标志点对手动牙根分割进行体积测量, 这不仅增加了人为操作, 也增大了误差。

4. 三维分区量化在牙根吸收研究中的进展

(一) 临床研究进展

在临床研究中[9], 通过对大量正畸患者治疗前后的三维影像进行分区量化分析, 掌握了牙根吸收与患者年龄、矫治力大小、矫治器类型等因素之间的基本规律。由于现有可用证据质量较低, 临床医生目前只能提供一些关于预防 ERR 的建议以及发生 ERR 后的处理方法。不过, 这种临床实践指南能够让临床医生依据当前知识对 ERR 做出应对, 有助于减少不同实践之间的差异, 并为患者提供适当信息。未来的研究应着重关注治疗过程中的诊断程序、危险因素、ERR 管理以及受影响牙齿的预后, 为临床医生调整矫治方案提供依据。

(二) 基础研究进展

在基础研究方面[27], 利用三维分区量化技术深入探究了牙根吸收的细胞学和分子生物学机制。研究发现, 在牙根吸收的不同分区, 破骨细胞和成骨细胞的活性存在差异。在牙根吸收早期, 根尖区的破骨细胞活性增强, 而在吸收修复阶段, 根中 1/3 区的成骨细胞功能更为活跃。同时, 通过对相关细胞因子在牙根三维空间上的分布研究, 进一步揭示了牙根吸收的复杂调控机制。

5. 挑战与未来发展方向

(一) 挑战

1. 数据标准化问题

目前不同研究中使用的三维影像设备和软件分析系统存在差异, 导致数据的标准化和可比性存在问题。不同 CBCT 设备的分辨率[21]、扫描参数以及软件对牙根分区和量化的算法不同[7] [27], 使得研究结果之间难以进行准确地比较和综合分析。

2. 多因素综合分析的复杂性

牙根吸收受多种因素的综合影响, 而当前研究在综合考虑这些因素时还存在欠缺[27]。如何在三维空间上准确把控这些多因素, 将个体生物学因素以及其他可能因素进行整合分析, 构建更准确的牙根吸收预测模型是一项挑战。

(二) 未来发展方向

1. 统一标准的建立

需要建立统一的三维影像采集和分析标准, 包括 CBCT 扫描参数、牙根分区方法以及量化指标等。这样有助于提高不同研究之间的可比性, 推动牙根吸收研究向纵深发展。

2. 个性化治疗方案的优化

基于三维分区量化的牙根吸收研究成果, 进一步优化个性化的正畸治疗方案。通过对患者个体牙根结构和生物学特性的精确评估, 在矫治过程中更精准地控制矫治力的大小、方向和作用时间, 减少牙根吸收的发生, 提高正畸治疗的安全性和有效性。

6. 结论

牙根吸收作为正畸治疗的不良后果, 通常表现为牙根长度和体积减少, 在正畸这一复杂的医疗实践中, 一直是核心关注点[28]。它对治疗效果和患者口腔健康影响深远, 因而备受关注。牙根吸收并非单一因素所致, 而是多种因素综合作用的结果, 这些因素包括矫治力相关的大小、方向、作用时间等参数, 患者自身的年龄、性别、牙根形态、牙槽骨密度等个体特征, 以及正畸治疗所选用的矫治器类型这一关键因素。三维分区量化技术宛如一把精准无比的钥匙, 为深入探究这些影响因素开启了一扇通往全新认知的大门[29], 它不仅弥补了二维 X 线片的不足, 使更多正畸医生能够从三维视角理解牙根吸收, 而且随着人工智能的发展与融入, 更使牙根吸收的研究变得更为简便和标准。

通过全面且深入地剖析上述众多三维分区量化对正畸牙根吸收的影响因素[30], 并结合相关技术在精度和效率等关键方面的持续发展与完善, 我们有充足的理由期待正畸治疗质量的进一步显著提升。这一提升意义重大, 能够最大程度地降低牙根吸收这一严重并发症的发生风险。一旦发生牙根吸收, 极有可能对患者口腔健康造成长期、多维度的不良影响, 严重威胁正畸治疗后牙齿的正常功能和美观。

然而, 我们必须清醒地认识到, 当前在这一研究领域仍存在诸多不容忽视的挑战。例如, 三维分区量化技术在临床实践中的标准面临重重困难, 包括但不限于 CBCT 分辨率[11] [21]、研究人员操作方法的不足等问题[1]。此外, 在数据采集和分析环节, 效率与准确性的平衡如履薄冰, 需要极为谨慎地权衡。而且, 不同研究结果之间的一致性和可重复性问题也如阴霾般笼罩着该领域, 给研究的深入推进带来了巨大阻碍。未来需要一种新的方法, 克服现存挑战, 积极推动该领域研究朝着更深入、更完善的方向持续发展, 减少人为误差, 确定一种测量牙根吸收的标准, 为正畸患者带来更优质、更安全的治疗方案。

参考文献

- [1] 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>
- [2] Kalra, S., Gupta, P., Tripathi, T. and Rai, P. (2020) External Apical Root Resorption in Orthodontic Patients: Molecular and Genetic Basis. *Journal of Family Medicine and Primary Care*, **9**, 3872-3882. https://doi.org/10.4103/jfmpc.jfmpc_802_20
 - [3] Akl, H.E., El-Beialy, A.R., El-Ghafour, M.A., Abouelezz, A.M. and El Sharaby, F.A. (2021) Root Resorption Associated with Maxillary Buccal Segment Intrusion Using Variable Force Magnitudes. *The Angle Orthodontist*, **91**, 733-742. <https://doi.org/10.2319/012121-62.1>
 - [4] Patel, S., Saberi, 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>
 - [5] Baysal, A., Karadede, I., Hekimoglu, S., Ucar, F., Ozer, T., Veli, İ., et al. (2012) Evaluation of Root Resorption Following Rapid Maxillary Expansion Using Cone-Beam Computed Tomography. *The Angle Orthodontist*, **82**, 488-494. <https://doi.org/10.2319/060411-367.1>
 - [6] Zhang, X., Zhou, H., Liao, X. and Liu, Y. (2022) The Influence of Bracket Torque on External Apical Root Resorption in Bimaxillary Protrusion Patients: A Retrospective Study. *BMC Oral Health*, **22**, Article No. 7. <https://doi.org/10.1186/s12903-022-02042-3>
 - [7] Puttaravuttiorn, P., Wongsuwanlert, M., Charoemratrote, C. and Leethanakul, C. (2018) Volumetric Evaluation of Root Resorption on the Upper Incisors Using Cone Beam Computed Tomography after 1 Year of Orthodontic Treatment in Adult Patients with Marginal Bone Loss. *The Angle Orthodontist*, **88**, 710-718. <https://doi.org/10.2319/121717-868.1>
 - [8] Dudic, A., Giannopoulou, C., Martinez, M., Montet, X. and Kiliaridis, S. (2008) Diagnostic Accuracy of Digitized Periapical Radiographs Validated against Micro-Computed Tomography Scanning in Evaluating Orthodontically Induced Apical Root Resorption. *European Journal of Oral Sciences*, **116**, 467-472. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0722.2008.00559.x>
 - [9] 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>
 - [10] Nassif, C.E., Cotrim-Ferreira, A., Conti, A.C.C.F., Valarelli, D.P., de Almeida Cardoso, M. and de Almeida-Pedrin, R.R. (2017) Comparative Study of Root Resorption of Maxillary Incisors in Patients Treated with Lingual and Buccal Orthodontics. *The Angle Orthodontist*, **87**, 795-800. <https://doi.org/10.2319/041117-247.1>
 - [11] Coutsiers Morell, G.F., Berlin-Broner, Y., Flores-Mir, C. and Heo, G. (2021) Tooth and Root Size as Determined from 0.25- and 0.30-Mm Voxel Size Cone-Beam CT Imaging When Contrasted to Micro-CT Scans (0.06 Mm): An Ex Vivo Study. *Journal of Orthodontics*, **49**, 174-178. <https://doi.org/10.1177/14653125211066106>
 - [12] Pairatchawan, N., Viteporn, S. and Thongudomporn, U. (2022) Mandibular Incisor Root Volume Changes between Anterior Bite Planes Fabricated from Acrylic Resin and Thermoplastic Materials: A Prospective Randomized Clinical Trial. *The Angle Orthodontist*, **92**, 755-763. <https://doi.org/10.2319/021622-141.1>
 - [13] Li, C., Teixeira, H., Tanna, N., Zheng, Z., Chen, S.H.Y., Zou, M., et al. (2021) The Reliability of Two- and Three-Dimensional Cephalometric Measurements: A CBCT Study. *Diagnostics*, **11**, Article No. 2292. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11122292>
 - [14] Jung, Y. and Cho, B. (2011) External Root Resorption after Orthodontic Treatment: A Study of Contributing Factors. *Imaging Science in Dentistry*, **41**, 17-21. <https://doi.org/10.5624/isd.2011.41.1.17>
 - [15] Lee, J., Byun, S., Yi, S., Park, I., Yang, B. and Lee, H. (2022) Efficacy of Constructing Digital Hybrid Skull-Dentition Images Using an Intraoral Scanner and Cone-Beam Computed Tomography. *Scanning*, **2022**, Article ID: 8221514. <https://doi.org/10.1155/2022/8221514>
 - [16] Dudic, A., Giannopoulou, C., Meda, P., Montet, X. and Kiliaridis, S. (2017) Orthodontically Induced Cervical Root Resorption in Humans Is Associated with the Amount of Tooth Movement. *European Journal of Orthodontics*, **39**, 534-540. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjw087>
 - [17] Lund, H., Gröndahl, K., Hansen, K. and Gröndahl, H. (2012) Apical Root Resorption during Orthodontic Treatment. *The Angle Orthodontist*, **82**, 480-487. <https://doi.org/10.2319/061311-390.1>
 - [18] 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>
 - [19] Brusveen, E.M.G., Brudvik, P., Bøe, O.E. and Mavragani, M. (2012) Apical Root Resorption of Incisors after Orthodontic Treatment of Impacted Maxillary Canines: A Radiographic Study. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **141**, 427-435. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2011.10.022>
 - [20] Zhao, Y., Zhang, L., Yang, C., Tan, Y., Liu, Y., Li, P., et al. (2021) 3D Dental Model Segmentation with Graph

- Attentional Convolution Network. *Pattern Recognition Letters*, **152**, 79-85. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2021.09.005>
- [21] Dabbaghi, A., Sharifi, S. and Esmaeili, M. (2020) Accuracy of High- and Low-Resolution Cone-Beam Computed Tomographic Scans in the Detection of Impacted Tooth-Induced External Root Resorption: An Ex-Vivo Study. *Frontiers in Dentistry*, **16**, 429-435. <https://doi.org/10.18502/fid.v16i6.3442>
 - [22] Lee, S., Hwang, H. and Lee, K.C. (2022) Accuracy of Deep Learning-Based Integrated Tooth Models by Merging Intraoral Scans and CBCT Scans for 3D Evaluation of Root Position during Orthodontic Treatment. *Progress in Orthodontics*, **23**, Article No. 15. <https://doi.org/10.1186/s40510-022-00410-x>
 - [23] Trelenberg-Stoll, V., Drescher, D., Wolf, M. and Becker, K. (2021) Automated Tooth Segmentation as an Innovative Tool to Assess 3d-Tooth Movement and Root Resorption in Rodents. *Head & Face Medicine*, **17**, Article No. 3. <https://doi.org/10.1186/s13005-020-00254-y>
 - [24] Zhu, J., Yang, Y. and Wong, H.M. (2023) Development and Accuracy of Artificial Intelligence-Generated Prediction of Facial Changes in Orthodontic Treatment: A Scoping Review. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE B*, **24**, 974-984. <https://doi.org/10.1631/jzus.b2300244>
 - [25] Al-Ubaydi, A.S. and Al-Groosh, D. (2023) The Validity and Reliability of Automatic Tooth Segmentation Generated Using Artificial Intelligence. *The Scientific World Journal*, **2023**, Article ID: 5933003. <https://doi.org/10.1155/2023/5933003>
 - [26] Lim, S., Moon, R., Kim, M., Oh, M., Lee, K., Hwang, H., et al. (2020) Construction Reproducibility of a Composite Tooth Model Composed of an Intraoral-Scanned Crown and a Cone-Beam Computed Tomography-Scanned Root. *Korean Journal of Orthodontics*, **50**, 229-237. <https://doi.org/10.4041/kjod.2020.50.4.229>
 - [27] Guo, Y., He, S., Gu, T., Liu, Y. and Chen, S. (2016) Genetic and Clinical Risk Factors of Root Resorption Associated with Orthodontic Treatment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **150**, 283-289. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2015.12.028>
 - [28] Apajalahti, S. and Peltola, J.S. (2007) Apical Root Resorption after Orthodontic Treatment a Retrospective Study. *The European Journal of Orthodontics*, **29**, 408-412. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjm016>
 - [29] Fan, W., Gao, D., Wang, Y., Chen, Y., Li, Y., Lu, S., et al. (2020) Three-dimensional Measurement and Analysis of Mandibular Characteristics in Subjects with Impacted Mandibular Second Molars. *Orthodontics & Craniofacial Research*, **23**, 332-341. <https://doi.org/10.1111/ocr.12375>
 - [30] Bornstein, M., Scarfe, W., Vaughn, V. and Jacobs, R. (2014) Cone Beam Computed Tomography in Implant Dentistry: A Systematic Review Focusing on Guidelines, Indications, and Radiation Dose Risks. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, **29**, 55-77. <https://doi.org/10.11607/jomi.2014suppl.g1.4>