MARPE 结合数字化在临床实践中的创新应用

王芯萌,李依梅,常　新

[摘要]　微种植钉辅助上颌快速扩弓(miniscrew-assisted rapid palatal expansion,MARPE)作为治疗成人上颌横向发育不足的创新技术,正逐步取代传统上颌扩弓技术。尽管 MARPE 技术在生物力学机制与临床疗效方面积累了丰富研究证据,但随着人工智能在医学领域应用愈加广泛,如何实现技术革新与数字化诊疗体系的有机融合仍待深入探索。本研究通过整合生物力学分析、临床疗效评估及新型装置设计三大研究方向,重点探索三维影像与人工智能技术的协同应用,致力于为成人上颌横向发育不足的精准矫治提供科学依据,推动正畸治疗向个性化、数字化方向发展。

[关键词]　微种植钉辅助上颌快速扩弓;上颌横向发育不足;腭中缝分期
[中图分类号]　R783.5　　[文献标识码]　A　　[文章编号]　1003-9872(2026)07-0555-06
[doi]　10.13591/j.cnki.kqyx.2026.07.011

Innovative clinical applications of MARPE techniques integrated with digital technologies

WANG Xinmeng, LI Yimei, CHANG Xin. (*Department of Orthodontics, The Second Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Dalian 116000, China*)

Abstract: Miniscrew-assisted rapid palatal expansion(MARPE), a transformative approach for adult maxillary transverse deficiency, is increasingly superseding conventional palatal expansion. While MARPE boasts robust evidence in biomechanical efficacy and clinical-outcomes, its seamless integration with AI-driven digital diagnostic systems remains under-explored. This study converges biomechanical analysis, clinical evaluation, and novel device design to pioneer synergistic applications of 3D imaging and AI technologies. By advancing data-driven protocols for customized force delivery and skeletal adaptation, this work aims to establish a scientific foundation for precision orthodontic correction, propelling the evolution of personalized and digitized treatment paradigms.

Key words: miniscrew-assisted rapid palatal expansion; transverse maxillary deficiency; palatal suture stage

Stomatology,2026,46(7):555-560

上颌横向发育不全(maxillary transverse deficiency,MTD)是以基骨宽度不足为特征的常见颌面畸形,常伴牙列拥挤、后牙反𬌗,严重者可导致阻塞性睡眠呼吸暂停(obstructive sleep apnea,OSA)等呼吸功能障碍[1]。最新研究表明,中国儿童和青少年上颌横向发育不足患病率为 31.1%[2],其治疗关键在于打开腭中缝,但是不同年龄阶段的干预方案存在一定差异,随着锥形束 CT 三维影像的广泛应用,临床医师可对腭中缝骨化程度进行定量评估,并基于骨密度分布特征智能规划微种植钉最佳植入位置,同时可结合有限元分析及个性化设计实现牙弓双侧的对称性扩展,突破以往扩弓技术的局限性。本研究将系统解析微种植钉辅助上颌快速扩弓(miniscrew-assisted rapid palatal expansion,MARPE)的生物力学机制、临床疗效评价、矫治器设计与数字化诊疗整合方面的最新进展。

1　作用机制

与传统上颌扩弓技术易导致支抗牙颊向倾斜不同,MARPE 通过微种植体将扩弓力直接传递至上颌骨,实现腭中缝骨性扩宽并降低牙槽骨开窗风险。研究表明,其扩弓阻力不仅源于腭中缝,更与上颌骨周围蝶骨、颧骨等复合结构密切相关[3]。Cho 等[4]证实,MARPE 在 16~27 岁骨骼成熟患者中可显著打开 9 条围绕上颌骨的颅缝,其中腭中缝前部打开最多((3.06±1.23)mm),前、后鼻嵴处次之,其次为额颧缝(0.66 mm),而鼻额缝((0.40±0.16)mm)及鼻颌缝下部((0.38±0.21)mm)变化较小,揭示了多骨缝联动的生物力学特性。

这种机制还可引发周边骨骼形态改变,如史晓扬等[5]发现成年女性使用上颌骨性扩弓器后眶周横向宽度及眼眶容积出现轻微增大效应。值得注意的是,有学者进一步发现腭中缝与翼腭缝扩张呈显著关联,当翼腭缝发生断裂时,腭中缝的扩张宽度显著增加,其 β 系数为 1.46,即每增加 1 mm 的翼腭缝分离,腭中缝扩张宽度将增加 1.46 mm[6]。此表明

作者单位:大连医科大学附属第二医院正畸科,辽宁大连(116000)
通信作者:常　新　E-mail:Chang_xin66@aliyun.com

骨缝系统在应力传递中存在协同效应,这为理解 MARPE 整体扩弓机制提供了关键依据。

2 临床疗效

2.1 上颌扩弓量

研究表明,MARPE 扩弓成功率为 81% ~ 100%[7],显著高于上颌快速扩弓(rapid palatal expansion,RPE)(87% ~ 90%)[8],且复发量更低,提高打开腭中缝骨性效应的同时降低了对牙周组织的损伤。最新研究发现,30~45 岁患者与 18~29 岁患者在基骨扩宽量、牙弓稳定性等方面差异并无统计学意义,成功病例年龄上限延伸至 45 岁,为中年患者治疗提供了循证依据[9]。学者通过有限元分析构建 4 类个性化 MARPE 模型(A ~ D 型),与传统 Hyrax(E 型)对比发现:骨-黏膜支持型(C 型)和骨-牙-黏膜支持型(D 型)表现最优,后牙扩展量较单纯骨/骨-牙支持型(A/B 型)提高16.26%,下颌磨牙倾斜率较 Hyrax 降低近 80%(C 型79.58%,D 型78.89%),揭示复合支抗设计既能提升扩弓效果,又能更稳定地控制牙齿的生物力学变化[10]。

2.2 气道与面部美学改善

2.2.1 气道容积

Li 等[11]与 Kim 等[12]基于锥形束 CT 三维重建证实 MARPE 可显著增加鼻腔及鼻咽容积,且 Kim 等发现这一效果在长期内保持稳定。但 Mehta 等[13]基于 6 个月随访数据提出异议认为鼻部容积改变未达统计学显著水平,并指出锥形束 CT 测量在鼻咽区域的测量可信度较低,而口咽区域测量结果更为准确,这提示研究所采用的评估时间节点和测量方法差异可能影响研究结论。Sin 团队开发了基于深度学习的咽气道智能测量系统,通过 306 例 CBCT 验证显示人工智能对气道的分割结果与人工测量高度一致,三维气道容积测量误差仅为 4.2%[14]。该算法通过自动化三维重建技术将检测效率提升近 20 倍,标志着气道分析进入智能数字化时代,提供了智能化的精准评估工具。

2.2.2 面部形态评估

Mehta 等[13]指出 MARPE 治疗后人中高度显著增加,但鼻翼宽度、鼻根宽度等参数未见显著改变;但又有学者发现成年患者的鼻部有变宽并向前、向下移动的趋势[15]。其中,鼻翼基底宽度的增幅最大,平均增加 1.214 mm,而鼻孔下缘宽度的增幅最小,平均增加 0.572 mm,相对于 MARPE 实现的扩展量,鼻部软组织扩大的比例为 8.1% ~ 17.3%。提示临床医生需在治疗前向患者充分说明可能的鼻部形态改变。同时有研究表明[16],MARPE 与 RPE 治疗虽可引发鼻翼基底侧向位移及人中、颏部软组织短暂形变,但 2 年随访显示这些改变均恢复至治疗前状态,证实软组织改变仅为适应性的暂时调整。在骨组织变化方面,治疗初期下颌角点下移现象亦随长期追踪趋于稳定,缓解了患者对颌面形态不可逆改变的担忧。

关于面部形态评估技术的最新进展,有研究证实了 3dMD 系统在面部形态评估中的独特优势。该系统通过 6 个摄像头协同工作,仅需 1.5 ms 即可获取患者三维影像,并实时分析正颌手术后软组织的动态变化,其高效率、高精度的特性,为未来评估上颌骨性扩弓后的面部软组织改变提供了理想工具[17]。对于不同场景的三维成像需求,有研究揭示手持式结构光扫描仪凭借其 0.1 mm 的精度,尤其适用于鼻基底扩宽等软组织细微变化的量化分析[18];而搭载 LiDAR(light detection and ranging)技术的智能手机应用程序虽精度略低于传统高成本 3dMD 系统,但其便携性与低成本特性更适合日常使用[19]。值得关注的是,LiDAR 技术在面部三维建模中的应用,不仅可以快速建立高精度面部模型,更推动了远程诊疗等数字化医疗的发展。综合现有研究证据,临床实践中建议依据具体需求选择成像技术。

2.3 疗效稳定性

短期稳定性研究:Choi 等[20]通过 30 个月随访发现基骨宽度复发量仅 0.07 mm;Tang 等[21]进一步证实 5.75% ~ 19.75% 的复发不影响长期稳定性;Zeng 等[22]研究发现 MARPE 治疗后基骨、牙槽骨及支抗牙的扩弓疗效在 2 个月内保持稳定。然而,现有证据多集中于 2 年内随访数据,5 年以上长期疗效评估仍缺乏充足证据支持,需要开展大规模长期追踪研究来验证。

3 MARPE 的创新实践

3.1 支抗设计的创新方向

MARPE 根据支抗来源可分为骨支持(bone-borne device,BB)、组织-骨支持式(tissue-bone-borne device,TBB)及牙-骨支持(tooth-bone-borne device,TB)三类[23]。

传统 TB 式装置(如 MSE)虽较传统扩弓器骨性效应增强,但仍存在支抗牙颊倾、牙槽骨吸收、牙龈损伤等风险。相比之下,BB 式扩弓器(如 Quad-expander),完全依赖微种植钉实现纯骨性支抗,研究显示其骨骼扩宽效果更显著(如上颌基底、鼻基底及颧骨间距),且可避免牙齿倾斜及牙槽骨吸收[24]。

Ponna 等[25]研究进一步发现 Quad-expander 临床成功率可达 100%，平均扩弓 7.74 mm（骨性效应占比 73%），且牙齿在牙槽骨内呈现直立趋势。TBB 式扩弓器（如 C-expander）通过腭部基托分散扩弓力，在成人患者中可实现显著腭部扩张的同时不会引起牙齿颊侧倾斜或显著的颊侧牙槽骨丧失，且在前、后鼻棘处可呈现近似平行的扩张模式[26]。ATOZ-expander 也是一种 BB 式扩弓器，位置较 C-expander 更靠近鼻上颌复合体的阻抗中心[27]，能够更均匀地分散力量，减少对特定区域（如颧骨）的压力，有助于面中部结构更加平行地位移，实现高达 8 mm 的扩弓量，进一步支持 MARPE 可以作为手术辅助上颌扩弓（surgically assisted arch expansion，SARPE）的替代方案。

总体而言，BB 式在骨骼扩展与不良反应控制方面最优，TB 式侧重牙槽骨扩宽但伴随风险，TBB 式可平衡两者特性，临床需根据患者解剖特征与治疗目标进行个性化选择。

3.2　加力方式的创新分析

为减小扩弓不良反应及增强扩弓疗效，Ceschi 等[28]在一项针对 50 岁上颌横向发育不足伴双侧后牙反𬌗的病例报告中，采用 MARPE 结合个性化缓慢扩弓方案（总疗程近 20 个月）成功实现腭中缝扩展，扩宽量达 6.6 mm。具体方案为：初始阶段每 2 d 加力一次（每次 0.2 mm），两周后调整为每日加力，累计加力 33 次。通过分阶段施力策略，既避免瞬时应力过大，又促进腭中缝的完全分离。治疗后锥形束 CT 显示上颌骨实现平行扩展，无牙根吸收或支抗牙颊倾，上颌尖牙间及磨牙间宽度各增加 6 mm，最终建立尖牙磨牙Ⅰ类关系。该研究采用的扩弓方案通过促进组织适应性重塑、减少牙周不良反应及维持腭部横向稳定性，为成年患者提供了安全有效的治疗选择，扩大了 MARPE 的年龄适用范围。

Winsauer 等[29]采用了一种新的两阶段扩弓加力方式（force-controlled polycyclic protocol，FCPC），旨在减少成人患者中可能出现的不良结果。该方式特点是通过两个阶段来实现稳定的腭中缝扩展：第一阶段持续一周，患者每天转动两次螺旋簧，每次 1/6 圈（0.17 mm）。第二阶段：患者每天转两次螺旋簧，先向后转 6 个面，15 min 后再向前转 6 个面。此外，每 3 d 额外激活 0.17 mm，直到达到所需的腭部扩展量。实现了腭中缝的 V 形扩展：前部和后部的扩展量分别为（5.4±1.5）mm 和（2.5±1.1）mm。

3.3　多学科协作的创新实践

针对腭中缝钙化程度高的成人，单纯应用 MARPE 存在骨折风险，近年来通过联合微创技术突破年龄限制：Meirelles 等[30]采用骨皮质穿刺技术辅助 MARPE 治疗，使硬腭后部骨厚度不足 2 mm 患者的成功率从 33.3%提升至 81.2%，其原理是通过局部骨皮质微损伤增强骨改建能力；罗卫红等[31]创新性结合超声骨刀精准劈开腭中缝与 MSE 扩弓器，临床数据显示 21 例患者中 90.5%实现 50%以上骨性扩弓，66.7%达到 75%以上，其中 33.3%患者骨性扩弓效率达 100%，且腭中缝平行稳定打开。相较于传统手术，该技术兼具门诊可完成、创伤小、成本低的特点，为严重上颌狭窄患者提供了高效安全的解决方案。

3.4　数字化技术的整合应用

3.4.1　三维影像与数字化技术的结合

关于腭中缝成熟度的判断方法，自 Angelieri 等[32]提出腭中缝成熟度五阶段分类法（midpalatal suture maturation，MPSM）以来，其临床应用价值持续受到关注与验证。Barbosa 等[33]的回顾性研究显示 MPSM 的可靠性仅为差至一般水平，主要是由于研究结果在很大程度上受观察者主观判断影响。Georgi 团队[34]通过使用高分辨率微计算机断层扫描（micro-computed tomography，μCT）对比发现，锥形束 CT 在评估 MPSM 与腭中缝微观形态特征间缺乏显著相关性。具体来说，在锥形束 CT 判定为骨融合完成阶段（E 阶段）的样本中，但 μCT 仍可明确识别腭中缝的间隙及不规则骨缝边界，表明常规锥形束 CT 成像技术可能无法准确表达骨缝闭合末期的细微形态特征。亦有学者将腭中缝密度比值（midpalatal suture density ratio，MPSD）[35]作为预测上颌扩弓的骨性效应大小指标并指出 MPSD 与上颌快速扩弓治疗后的骨骼反应之间存在显著负相关关系，但 Eguren 等[36]研究发现，MPSD 与腭部骨骼扩张量并无显著相关性，指出 MPSD 作为预测工具在整体应用上存在一定局限，建议临床需结合多维指标进行综合判断。以上研究结论之间的矛盾主要源于研究结果多基于单一图像截面，其定性或定量分析均由人工完成，会导致大量有价值的图像信息丢失、技术敏感性过高。

为突破上述限制，Gao 团队[37]开发了新方法——通过数字算法将多层 CT 图像融合为单张图像，不仅可以完整呈现腭中缝的全景结构，又能有效规避因扫描角度与腭穹隆结构带来的干扰。同时能结合颅面骨骼生长信息（如骨化特征）提升影像利用率。不过目前研究样本量偏少，未来需要增加样本数量以提升数据集的多样性和可靠性。同时有研

究提出一种基于锥形束 CT 伪彩色处理和多层冠状切片重建的腭中缝骨化分期新方法(midpalatal suture ossification staging,MPSO),其核心创新在于:①通过红、绿、蓝三原色叠加显示 CT 图像,显著提升骨密度及梯度变化的辨识度;②设计一种基于 Hounsfield 单位的颜色图谱,以更精细地分析腭中缝的形态特征,为临床应用提供更直观全面的信息[38]。但对硬腭厚度等解剖变异因素的适应性仍有不足,且目前主要用于评估硬腭后部,尚未完全整合整条腭中缝的三维结构。后续研究需融合人工智能技术,对各层骨质进行精准分期评估。

在微种植钉植入技术优化方面,“骨优先”原则通过锥形束 CT 三维成像优先选择骨质密度最佳区域进行植入,突破了“矫治器优先”原则因预先设置植入部位从而影响稳定性等限制[24,39]。虽然该原则为规避操作误差更建议分两次完成种植体植入与矫治器粘接,但 Al-Gazzawi 团队[40]引入的 3D 打印导板技术实现了同步规划,即通过数字化设计同步规划微螺钉路径,使植入精度达到水平/垂直方向平均误差<0.5 mm、最大水平误差≤1 mm,尤其适合口腔条件复杂的患者。在微螺钉长度的选择方面,Choi 等[41]发现,硬腭后部采用 6 mm 的微螺钉可实现双层骨皮质支抗,尤其适用于需扩大尖牙间宽度或矫正 V 字形牙弓的病例,但需注意过长螺钉可能穿透鼻腔黏膜引发不适。有研究通过测量不同年龄、性别的腭部解剖结构得出:硬腭前部推荐 6~12 mm 微种植钉以平衡双层骨皮质支抗与鼻腔穿透风险,而骨皮质致密的后部仅需 3 mm 即可实现双层骨皮质支抗,同时强调需依据患者黏膜厚度调整微螺钉跨黏膜段长度[42]。

这些研究系统性构建了 MARPE 的技术框架,为临床制定个体化治疗方案提供了理论依据与操作规范。未来研究需整合骨骼形态、骨密度和力学分析等多维度数据,建立智能化的治疗方案决策系统。

3.4.2 3D 打印制作个性化装置

Kapetanović等[43]研发的扩弓装置在个性化治疗领域取得重要突破。该装置利用口腔 3D 扫描数据,通过激光熔融技术实现个性化生产,针对患者牙弓形态与骨骼成熟度进行个性化设计。采用直径 2 mm 的微螺钉显著提升固位力的同时,在青少年晚期及成人患者中实现 94.1%的成功率,且效果优异。尽管观察到颊侧牙槽骨丧失等不良反应,但未对牙周健康者造成明显影响,证实了个性化力系设计的良好生物安全性。Mehta 等[13]研究进一步验证了 3D 打印 MARPE 装置的优势,通过数字化整合 CBCT 与口腔扫描数据,在前磨牙和磨牙区实现显著的骨性扩张,同时牙槽骨吸收保持在 0.05~0.52 mm,还带来上唇高度增加 1.17 mm 的附加美学改善。以上研究共同揭示了利用 3D 打印制作个性化 MARPE 的优势:Kapetanović等通过精准的解剖设计降低应力,减少支抗牙倾斜风险;Mehta 团队则在实现对称骨性扩展的同时维持鼻部软组织稳定,并将牙根吸收风险控制在安全范围内。

这些创新设计为成年患者提供了精准矫治设计方案,显著提升了非手术治疗的可靠性及可预测性。

4 临床挑战与未来展望

MARPE 结合数字化技术虽显著提升了上颌横向发育不全患者的治疗效果,但其临床应用仍面临挑战。研究表明,特定患者群体治疗失败风险较高,其中包括年龄超过 30 岁,腭中缝处于 E 期,骨厚度不足 2 mm,合并颅颌面综合征(如唇腭裂)及全身性骨代谢异常(如骨质疏松)的个体[27,29-30,44-45]。针对此类高风险病例,临床决策需基于多维度评估,包括影像学分析、骨密度检测及个体化风险预测等。此外,当前 MARPE 技术的局限性主要体现在三个方面:其一,微螺钉植入对定位精度的要求极高,细微偏差即可影响治疗效果;其二,高昂的治疗成本限制了技术的普及;其三,术后短期鼻腔不适等问题可能降低患者依从性。与此同时,创新应用设计的临床验证仍不足,长期疗效数据亦较为匮乏,这在一定程度上制约了技术的进一步推广。

未来研究方向可重点关注以下领域:首先,生物可降解材料(如医用镁合金微螺钉[46])的应用有望减少二次手术的需求;其次,通过人工智能与 3D 打印技术的结合,定制化支抗装置与有限元分析的协同优化,可提升扩弓力学的精准模拟能力。随着材料科学与智能技术的发展,MARPE 技术有望在适应证拓展、安全性提升及精准化治疗方面实现新的跨越,从而为更广泛的患者群体提供更优的治疗方案。

[参 考 文 献]

[1] 张赟,李小兵. 上颌扩弓疗效评价的临床意义及发展方向[J]. 口腔医学,2022,42(7):659-663.

[2] Shen J, Liu ZY, Shuai J, *et al*. Transverse dentoalveolar development in Chinese children and adolescents: A cross-sectional study using revised Andrews' Element Ⅲ analysis[J]. Am J Orthod Dentofac Orthop, 2025, 167(2): 144-153.

[3] Chaconas SJ, Caputo AA. Observation of orthopedic force distribution produced by maxillary orthodontic appliances[J]. Am J Orth-

od, 1982, 82(6): 492-501.

[4] Cho AR, Park JH, Moon W, *et al*. Short-term effects of microimplant-assisted rapid palatal expansion on the circummaxillary sutures in skeletally mature patients: A cone-beam computed tomography study[J]. Am J Orthod Dentofac Orthop, 2022, 161(2): e187-e197.

[5] 史晓扬,林雪芬,马驰,等. 上颌骨性扩弓器对成年女性眼眶容积的评价[J]. 华西口腔医学杂志,2022,40(3): 314-319.

[6] Lázaro-Abdulkarim A, Hernández-Alfaro F, Puigdollers-Pérez A, *et al*. Is efficacy of miniscrew-assisted rapid palatal expansion in mid to late adolescents and young adults related to craniofacial sutures opening? A systematic review and meta-analysis[J]. Med Oral, 2025: e271-e281.

[7] Chun JH, de Castro ACR, Oh S, *et al*. Skeletal and alveolar changes in conventional rapid palatal expansion(RPE) and miniscrew-assisted RPE(MARPE): A prospective randomized clinical trial using low-dose CBCT[J]. BMC Oral Health, 2022, 22(1): 114.

[8] Jia HC, Zhuang L, Zhang N, *et al*. Comparison of skeletal maxillary transverse deficiency treated by microimplant-assisted rapid palatal expansion and tooth-borne expansion during the postpubertal growth spurt stage[J]. Angle Orthod, 2021, 91(1): 36-45.

[9] Naveda R, Dos Santos AM, Miranda F, *et al*. Immediate dentoskeletal and periodontal effects of miniscrew-assisted rapid palatal expansion: Comparison between young *vs*. middle-aged adults[J]. Am J Orthod Dentofac Orthop, 2023, 164(3): 416-422.

[10] Pan SY, Gao X, Sun JC, *et al*. Effects of novel microimplant-assisted rapid palatal expanders manufactured by 3-dimensional printing technology: A finite element study[J]. Am J Orthod Dentofac Orthop, 2023, 164(5): 700-711.

[11] Li QM, Tang HY, Liu XY, *et al*. Comparison of dimensions and volume of upper airway before and after mini-implant assisted rapid maxillary expansion[J]. Angle Orthod, 2020, 90(3): 432-441.

[12] Kim SY, Park YC, Lee KJ, *et al*. Assessment of changes in the nasal airway after nonsurgical miniscrew-assisted rapid maxillary expansion in young adults[J]. Angle Orthod, 2018, 88(4): 435-441.

[13] Mehta P, Singh AK, Malhotra A, *et al*. Effect of customized 3D-printed MARPE appliance on hard tissues, soft tissues, and airway: A prospective CBCT study[J]. J World Fed Orthod, 2025, 14(3): 161-169.

[14] Sin Ç, Akkaya N, Aksoy S, *et al*. A deep learning algorithm proposal to automatic pharyngeal airway detection and segmentation on CBCT images[J]. Orthod Craniofacial Res, 2021, 24(S2): 117-123.

[15] Lee SR, Lee JW, Chung DH, *et al*. Short-term impact of microimplant-assisted rapid palatal expansion on the nasal soft tissues in adults: A three-dimensional stereophotogrammetry study[J]. Korean J Orthod, 2020, 50(2): 75.

[16] Mehta S, Vishwanath M, Patel A, *et al*. Long-term evaluation of soft-tissue changes after miniscrew-assisted and conventional rapid palatal expansion using voxel-based superimposition of cone-beam computed tomography scans[J]. Am J Orthod Dentofac Orthop, 2024, 165(3): 332-343.

[17] Büyükçavuş MH, Findik Y, Baykul T. Evaluation of changes in nasal projection after surgically assisted rapid maxillary expansion with 3dMD face system[J]. J Craniofacial Surg, 2020, 31(5): e462-e465.

[18] Alkhayer A, Becsei R, Hegedüs L, *et al*. Evaluation of the soft tissue changes after rapid maxillary expansion using a handheld three-dimensional scanner: A prospective study[J]. Int J Environ Res Public Health, 2021, 18(7): 3379.

[19] Seifert LB, Beyer M, Czok V, *et al*. Comparative accuracy of stationary and smartphone-based photogrammetry in oral and maxillofacial surgery: A clinical study[J]. J Clin Med, 2024, 13(22): 6678.

[20] Choi SH, Shi KK, Cha JY, *et al*. Nonsurgical miniscrew-assisted rapid maxillary expansion results in acceptable stability in young adults[J]. Angle Orthod, 2016, 86(5): 713-720.

[21] Tang HY, Liu PP, Liu XY, *et al*. Skeletal width changes after mini-implant-assisted rapid maxillary expansion (MARME) in young adults[J]. Angle Orthod, 2021, 91(3): 301-306.

[22] Zeng WQ, Yan SY, Yi YT, *et al*. Long-term efficacy and stability of miniscrew-assisted rapid palatal expansion in mid to late adolescents and adults: A systematic review and meta-analysis[J]. BMC Oral Health, 2023, 23(1): 829.

[23] Park JJ, Park KH, Kim SH, *et al*. Critical issues concerning miniscrew-assisted rapid palatal expanders: A narrative review[J]. Semin Orthod, 2025, 31(2): 179-186.

[24] Tarraf NE, Küffer M, de Gabriele O, *et al*. Principals for placement and expansion protocol for the bone-first Quadexpander in adolescents and adults[J]. Semin Orthod, 2025, 31(2): 197-206.

[25] Ponna P, Tarraf NE, Dalci K, *et al*. Dentoskeletal effects of miniscrew assisted, non-surgical palatal expansion in adults using a modified force-controlled polycyclic protocol: A single-centre retrospective study[J]. Eur J Orthod, 2024, 46(2): cjad080.

[26] Zhong XH, Wang HX. Dentoperiodontal and skeletal changes induced by miniscrew-assisted rapid maxillary expansion (C-expander) treatment in adults: A retrospective clinical trial[J]. Am J Orthod Dentofac Orthop, 2024, 165(3): 303-313.

[27] Bai J, Choi JY, Kim SH. The design of bone-borne maxillary expander affects the different dentoalveolar inclination and expansion pattern: A CBCT study[J]. Semin Orthod, 2025, 31(2): 258-270.

[28] Ceschi M, Riatti R, Di Leonardo B, *et al*. Skeletal expansion using a miniscrew-assisted rapid palatal expansion in a 50-year-old patient[J]. Am J Orthod Dentofac Orthop, 2022, 162(4): 568-579.

[29] Winsauer H, Walter A, Katsaros C, *et al*. Success and complication rate of miniscrew assisted non-surgical palatal expansion in adults: A consecutive study using a novel force-controlled polycyclic activation protocol[J]. Head Face Med, 2021, 17(1): 50.

[30] Meirelles CM, Ferreira RM, Suzuki H, *et al*. Analysis of factors associated with the success of microimplant-assisted rapid palatal

expansion[J]. Am J Orthod Dentofac Orthop, 2023, 164(1): 67-77.

[31] 罗卫红,徐晓南,王壬,等. 超声骨刀劈开腭中缝辅助 MSE 对上颌宽度不足扩弓效果的研究[J]. 实用口腔医学杂志,2022,38(2): 234-238.

[32] Angelieri F, Cevidanes LHS, Franchi L, *et al*. Midpalatal suture maturation: Classification method for individual assessment before rapid maxillary expansion[J]. Am J Orthod Dentofac Orthop, 2013, 144(5): 759-769.

[33] Barbosa NMV, de Castro AC, Conti F, *et al*. Reliability and reproducibility of the method of assessment of midpalatal suture maturation: A tomographic study[J]. Angle Orthod, 2019, 89(1): 71-77.

[34] Georgi GM, Knauth S, Hirsch E, *et al*. Age-related changes in the midpalatal suture: Comparison between CBCT staging and bone micromorphology[J]. Bone, 2024, 179: 116984.

[35] Grünheid T, Larson CE, Larson BE. Midpalatal suture density ratio: A novel predictor of skeletal response to rapid maxillary expansion[J]. Am J Orthod Dentofac Orthop, 2017, 151(2): 267-276.

[36] Eguren M, Liñán-Duran C, Quezada M, *et al*. Midpalatal suture density ratio after rapid maxillary expansion evaluated by cone-beam computed tomography[J]. Am J Orthod Dentofac Orthop, 2022, 161(2): 238-247.

[37] Gao L, Chen ZY, Zang L, *et al*. Midpalatal suture CBCT image quantitive characteristics analysis based on machine learning algorithm construction and optimization[J]. Bioengineering, 2022, 9(7): 316.

[38] Chung M, Zhang WY, Zhu YF, *et al*. A novel system for classification for midpalatal suture ossification based on pseudocolored and multilayer reconstructed coronal slices: Indication for selection of maxillary expansion methods[J]. Am J Orthod Dentofac Orthop, 2025, 167(4): 409-424.

[39] Wilmes B, De Gabriele R, Dallatana G, *et al*. "Bone first" principle with CAD/CAM insertion guides for mini-implant-assisted rapid palatal expansion[J]. J Clin Orthod, 2022, 56(3): 158-166.

[40] Al-Gazzawi AMQ, Knode V, Ludwig B, *et al*. Midpalatal miniscrew insertion: The accuracy of digital planning and surgical placement[J]. Am J Orthod Dentofac Orthop, 2024, 166(1): 69-75.

[41] Choi EA, Lee KJ, Choi SH, *et al*. Skeletal and dentoalveolar effects of miniscrew-assisted rapid palatal expansion based on the length of the miniscrew: A randomized clinical trial[J]. Angle Orthod, 2023, 93(4): 390-397.

[42] de Medeiros Alves AC, de Carvalho NO, de Paiva Cunha ÂCP, *et al*. Do the miniscrews of the prefabricated systems for the "appliance first" protocol of miniscrew-assisted rapid palatal expansion have lengths that meet the palatal thickness of patients? [J]. Am J Orthod Dentofac Orthop, 2023, 163(6): e152-e161.

[43] Kapetanović A, Odrosslij BMMJ, Baan F, *et al*. Efficacy of miniscrew-assisted rapid palatal expansion(MARPE) in late adolescents and adults with the Dutch maxillary expansion device: A prospective clinical cohort study[J]. Clin Oral Investig, 2022, 26(10): 6253-6263.

[44] Williams BJD, Currimbhoy S, Silva A, *et al*. Complications following surgically assisted rapid palatal expansion: A retrospective cohort study[J]. J Oral Maxillofac Surg, 2012, 70(10): 2394-2402.

[45] Loriato L, Ferreira CE. Surgically-assisted rapid maxillary expansion(SARME): Indications, planning and treatment of severe maxillary deficiency in an adult patient[J]. Dent Press J Orthod, 2020, 25(3): 73-84.

[46] Herber V, Okutan B, Antonoglou G, *et al*. Bioresorbable magnesium-based alloys as novel biomaterials in oral bone regeneration: General review and clinical perspectives[J]. J Clin Med, 2021, 10(9): 1842.

(收稿日期:2025-05-21)

(本文编辑:曹 丹)