

DOI: 10.3969/j.issn.1005-8982.2026.06.006
文章编号: 1005-8982 (2026) 06-0034-07

综述

腭中缝成熟度评估体系与颅颌面骨缝发育关联性的研究进展*

顾叶婷¹, 刘曙², 张军梅³

(1. 贵州医科大学 口腔医学院, 贵州 贵阳 550004; 2. 贵阳市口腔医院 正畸科, 贵州 贵阳 550002; 3. 贵州医科大学附属口腔医院 正畸科, 贵州 贵阳 550004)

摘要: 该文系统综述腭中缝成熟度评估体系与颅颌面骨缝发育的关联性研究进展。通过解析腭中缝的分段解剖特征及5个阶段影像学分类(A~E), 揭示其与颅颌面骨缝系统在发育时序、生物力学耦合和分子调控网络中的协同作用。传统组织学分型(Melsen分级)因侵入性和主观性限制, 逐渐被锥形束计算机断层扫描三维重建和磁共振T2 mapping技术取代, 而人工智能辅助影像分析显著提升了评估精度。Wnt/BMP信号通路通过时间-空间特异性调控骨缝发育, 间充质干细胞(如具有机械感知能力的Piezo²⁺细胞)通过力学响应介导骨缝改建, 而上颌快速扩弓产生的机械应力可激活骨缝适应性生长, 三者共同构成骨缝发育的关键调控网络。临床应用中, 微种植体辅助快速扩弓通过优化应力分布实现无创性骨骼效应, 为颅颌面畸形治疗提供新策略。未来需融合影像、生物力学与分子检测技术, 阐明骨缝发育的动态调控规律, 并开发基于干细胞靶向调控的新型治疗策略, 最终实现颅颌面畸形的精准诊疗。

关键词: 腭中缝成熟度; 颅颌面骨缝发育; 影像组学; 生物力学耦合; 分子调控网络
中图分类号: R783.5 **文献标识码:** A

Advances in the association between the midpalatal suture maturation assessment system and craniofacial suture development*

Gu Ye-ting¹, Liu Shu², Zhang Jun-mei³

(1. School of Stomatology, Guizhou Medical University, Guiyang, Guizhou 550004, China; 2. Department of Orthodontics, Guiyang Stomatological Hospital, Guiyang, Guizhou 550002, China; 3. Department of Orthodontics, Affiliated Stomatological Hospital of Guizhou Medical University, Guiyang, Guizhou 550004, China)

Abstract: This article systematically reviews recent advances in research on the association between the midpalatal suture maturation assessment system and craniofacial suture development. By analyzing the segmental anatomical characteristics of the midpalatal suture and its five-stage imaging-based classification (stages A-E), we elucidate the coordinated roles of the midpalatal suture and the craniofacial suture systems in developmental timing, biomechanical coupling, and molecular regulatory networks. Traditional histological classification methods (e.g., the Melsen classification), limited by their invasiveness and subjectivity, are gradually being replaced by cone-beam computed tomography (CBCT) three-dimensional reconstruction and magnetic resonance T2 mapping techniques, while artificial intelligence-assisted image analysis has significantly improved assessment accuracy. The Wnt/BMP

收稿日期: 2025-05-15

* 基金项目: 贵州省卫生健康委科学技术基金项目 (No: gzwkj2025-102, No: gzwkj2023-200)

[通信作者] 张军梅, E-mail: zjm46688@126.com

signaling pathways regulate suture development in a spatiotemporally specific manner; mesenchymal stem cells, such as mechanosensitive Piezo²⁺ cells, mediate suture remodeling through mechanical responses; and mechanical stress generated by rapid maxillary expansion can activate adaptive growth of sutures. Together, these mechanisms constitute a key regulatory network governing suture development. In clinical practice, micro-implant-assisted rapid maxillary expansion optimizes stress distribution to achieve noninvasive skeletal effects, offering novel strategies for the treatment of craniofacial deformities. Future research should integrate imaging, biomechanical, and molecular detection techniques to elucidate the dynamic regulatory mechanisms of suture development and to develop novel therapeutic strategies based on targeted stem cell modulation, ultimately enabling precision diagnosis and treatment of craniofacial deformities.

Keywords: midpalatal suture maturation; craniofacial suture development; radiomics; biomechanical coupling; molecular regulatory network

颅颌面骨缝系统在颌面部生长发育及形态维持中扮演着至关重要的角色,其动态的开放、改建与闭合过程受遗传、分子信号和生物力学等多因素精密调控^[1-2]。该系统的发育异常,如颅缝早闭(常表现为矢状缝早闭导致舟状头畸形、冠状缝早闭如Apert综合征)及腭裂等^[2-4],不仅影响颌面形态与功能,更对患者身心健康造成显著负担^[5]。

腭中缝作为上颌骨腭突中线处的关键纤维性连接结构,是上颌横向扩展的生理性生长位点^[6-7]。其解剖结构具有区域分异性(前段、中段、后段),成熟度基于锥形束计算机断层扫描(cone beam computed tomography, CBCT)可划分为5个阶段(A~E),值得注意的是,约12%的成年个体仍保留未融合状态(阶段A)^[6,8]。长期以来,腭中缝成熟度的评估(如传统的Melsen组织学分型)和基于此的上颌快速扩弓(rapid maxillary expansion, RME)治疗时机选择,主要依赖年龄和经验判断^[9]。然而,年龄与性别并非其成熟阶段的可靠预测因素^[8],且成人患者后段易骨性融合,传统牙支抗扩弓常无法获得理想的骨骼效应,往往需借助正颌手术或微种植体辅助快速腭扩弓(mini-implant assisted rapid palatal expansion, MARPE)^[6,9-10]。

颅颌面骨缝系统(包括腭中缝)的发育具有显著的整体性与协同性。分子层面,Wnt、Hedgehog、成纤维细胞生长因子(fibroblast growth factor, FGF)及转化生长因子- β /骨形态发生蛋白(transforming growth factor- β /bone morphogenetic protein, TGF- β /BMP)等信号通路的时空特异性表达与交叉对话,以及骨缝间充质干细胞(如Gli1⁺、AXIN2⁺细胞)的时空调控,共同构成了骨缝发育、

维持及修复的核心网络^[1-2,11-12]。生物力学层面,腭中缝作为上颌复合体扩展的核心枢纽,能将MARPE产生的机械应力有效传导至翼腭缝等邻近结构,其力学响应特性与颅缝存在共性^[11,10]。例如,TGF- β /BMP信号通路的异常既可导致颅缝早闭,也可能与腭裂发生相关^[12]。然而,腭中缝成熟度评估体系与颅颌面骨缝系统发育在时序关联、生物力学耦合及分子调控网络层面的深入关联性尚缺乏系统整合。

因此,本综述旨在系统梳理腭中缝成熟度评估体系的演进(从传统组织学分型到现代影像学及多模态评估),并深入探讨其与颅颌面骨缝系统在发育时序、生物力学响应及分子调控网络方面的内在关联性。通过阐明这种关联性,不仅能为基于生物学的腭中缝成熟度分期(而非单纯年龄)指导RME/MARPE适应证选择提供理论支撑,规避手术创伤,并优化疗效;更能为深入理解颅颌面发育机制、早期识别与干预颅缝早闭及腭裂等畸形,以及开发针对病理性骨缝闭合的新型再生治疗策略开辟新思路^[12-13]。

1 腭中缝成熟度评估体系演进

1.1 传统组织学分型标准

Melsen组织学分级作为评估腭中缝成熟度的经典方法,通过骨缝微观结构变化将其划分为A~D 4个等级:A级为未成熟纤维性骨缝,表现为骨边缘平行排列且无骨化;B级可见少量骨小梁交错;C级骨化范围扩大并伴随骨缝间隙缩小;D级则呈现完全骨化且骨缝消失的特征^[12]。该分级通过组织切片观察纤维成分与骨化程度,曾为腭中缝发育的形态学诊断提供重要依据,但其临床应用存在

三方面局限：其一，侵入性操作依赖活检样本，极大限制了活体评估的可行性；其二，分级标准高度依赖病理学家的主观经验，缺乏客观定量指标导致评估结果存在差异性；其三，该分级体系基于青少年样本建立，对成年患者中常见的部分骨化或异位骨化现象区分能力不足，且静态组织切片无法反映机械力刺激下（如扩弓治疗时）纤维重组的动态响应过程。尽管随着影像学技术的发展，该分级已逐渐退出临床主流，但其建立的组织学基准仍为后续研究提供了重要参照。

针对传统分型的局限性，骨缝纤维成分的微观量化方法通过偏振光显微镜与免疫组织化学技术实现了更客观的评估。偏振光显微镜利用胶原纤维的双折射特性，可解析其排列方向与密度差异。TURČANOVÁ 等^[14]开发的自动化算法结合多角度偏振成像技术，实现了 180° 全范围定量纤维方向，显著提升了分析效率，尤其在骨化-纤维过渡区研究中展现出独特优势。免疫组织化学技术则通过特异性抗体标记揭示分子机制，如小鼠模型显示腭中缝纤维区以胶原蛋白 II 为主，而骨化区高表达胶原蛋白 I^[14]；TUNEL 与 Safranin O 染色可检测细胞凋亡及软骨基质降解，为评估骨缝扩张力的生物学响应提供关键依据^[14]。此外，腭裂术后瘢痕研究显示，白细胞介素-1 α (Interleukin-1 α , IL-1 α)、基质金属蛋白酶 2 (matrix metalloproteinase-2, MMP-2) 等炎症及组织重塑因子的表达变化可能影响软组织修复，其发现的长期瘢痕分子特征（如慢性炎症平衡失调、胚胎因子再激活）为腭中缝成熟障碍提供了理论依据^[15]。偏振光显微镜侧重纤维排列的宏观结构分析，免疫组织化学聚焦分子表达的微观机制解析，两者联合应用可系统揭示骨缝成熟过程中的结构-功能关联。

Melsen 分级奠定了腭中缝发育评估的组织学基础，而现代量化技术通过多维度、动态化的分析手段，进一步克服了传统方法的局限性。可结合影像学技术与分子生物学方法，构建更精准的腭中缝成熟度评估体系，为临床干预提供更可靠的依据。

1.2 影像学评估技术突破

CBCT 三维成像技术显著提升了腭中缝成熟度的量化评估能力。其轴向切面可清晰辨识骨缝形态的阶段特征，成为临床分期金标准，推动腭中缝评估从定性向定量转变。分形分析通过量化

骨缝微观结构复杂度，揭示分形维数与钙化程度呈负相关，为骨缝指数与钙化体积比指标提供依据^[16]。基于锥形束 CT 的大样本研究验证了 Angelieri 五阶段成熟度评估体系，证实该技术可精准识别骨缝闭合状态，突破传统二维咬合片的结构重叠局限^[16]。研究发现女性骨缝成熟早于男性，且年龄与成熟阶段非线性相关，强调个体化 CBCT 评估对正畸方案制订的价值，同时指出三维影像可清晰显示骨缝微结构变化，为建立无创性发育监测体系提供技术支撑^[17]。

1.5T 磁共振 T2 弛豫时间映射 (T2 relaxation time mapping, T2 mapping) 技术^[18-19]首次在临床常规场景中验证了骨性结构修复质量的定量评估可行性，通过噪声校正算法及健康软骨 T2 基准值设定 (25 ~ 45 ms)，成功区分术后纤维软骨 (T2 < 25 ms)、类透明软骨 (25 ~ 45 ms) 及重塑组织 (T2 > 45 ms)，其手动勾画感兴趣区域技术为骨缝成熟度评估提供标准化流程。WILLERSHAUSEN 等^[20]前瞻性研究系统验证了 3T MRI 评估腭中缝成熟的临床适用性，采用反转 T1 加权序列 (SPACE, 0.4 mm × 0.4 mm × 0.8 mm) 配合曲面 MPR 技术，使 Angelieri 分型各阶段 (A ~ E) 识别准确率达 92%，组间一致性 Kappa 值提升至 0.72；通过优化快速自旋回波参数 (TR 700 ms, TE 27 ms) 及专用后处理软件，克服传统轴位平面受腭穹隆曲度影响的局限。研究指出整合 T2 mapping 技术可实现胶原纤维排列密度定量分析，为建立基于生物力学特性的成熟度分级系统奠定基础^[20]。上述研究揭示了影像技术从依赖电离辐射的 CBCT 向功能磁共振转变的路径：T1 ρ 弛豫时间敏感反映蛋白多糖代谢特性，T2 mapping 精准解析胶原网络结构，3D 各向同性序列则高效呈现微结构细节，三者协同推进骨缝成熟度评估进入“量化”与“动态化”的新阶段。

人工智能技术显著提升影像数据处理效率与精度。基于 U-Net 架构的深度学习模型通过编码-解码结构与跳跃连接机制，在 CBCT 图像中实现骨缝边缘自动识别，分割精度 (Dice 系数 0.949) 显著优于传统阈值分割法^[21]。约束性 U-Net 模型通过特征融合策略减少人为标注误差^[22]，3D U-Net 变体 (如 V-Net) 结合时序影像数据可动态追踪骨缝钙化进程并预测扩弓疗效^[23]。但该技术临床应用受限于数据标准化问题：不同 CBCT 设备重建参数差异

影响模型泛化能力,且腭中缝影像标注标准尚未统一,需建立多中心协作标注数据库以提升算法鲁棒性。

1.3 多模态评估新趋势

腭中缝成熟度评估体系正从单一模态向多模态整合转型,通过影像学、生物力学及分子生物学等多维度数据,显著提升评估系统性与临床适用性。影像-生物力学联合模型结合锥形束CT、MRI等高分辨率影像数据与弹性模量、应力分布等力学参数,建立个体化骨缝生物力学响应模型,核心在于弹性模量映射技术对骨缝力学特性的量化分析。SCHMIDT等^[24]基于有限元分析(finite element analysis, FEA)构建牙弓模型,模拟正畸力作用下的应力分布,验证了其在预测大范围牙齿移动中的可靠性;SAITO等^[25]通过三维有限元模型揭示弹性模量差异对骨缝力学响应的影响,为预测腭中缝可扩张性提供依据。WILLERSHAUSEN等^[20]采用3T MRI结合生物力学分析,成功区分腭中缝未融合与部分融合阶段,证实弹性模量与骨缝成熟度呈强负相关。

血液生物标志物检测为骨缝活性评估提供动态分子依据,其中I型前胶原N端前肽与I型胶原C端肽比值(procollagen type I N-terminal propeptide/C-terminal telopeptide of type I collagen, P1NP/CTX)成为研究焦点。P1NP反映成骨活性,CTX表征破骨活性,两者比值可综合评估骨代谢平衡状态。STEWART等^[26]发现骨折患者术后P1NP/CTX比值升高与影像学愈合显著相关;P1NP/CTX比值与青春期颈椎成熟分期高度相关,间接反映腭中缝扩张潜力,提示该比值对骨再生具有预测价值。多模态联合评估通过多源数据互补实现精准诊断:影像学解析解剖结构,生物力学模型量化力学响应,血液标志物揭示代谢活性。未来需研发自动化弹性模量映射算法,拓展唾液、龈沟液等局部标志物检测技术,并通过大规模纵向研究验证P1NP/CTX比值在腭中缝扩张中的直接作用,突破当前数据多依赖其他骨骼部位外推的局限^[27]。

2 腭中缝与颅颌面骨缝的发育关联性

2.1 时序关联与调控机制

腭中缝成熟具有显著年龄相关性,其开放状态与颅颌面骨缝系统发育时序密切相关。基于

CBCT的形态学研究显示,10~15岁青少年腭中缝开放比例达70.8%,而16~25岁人群开放性显著降低(16~20岁组21.2%,21~25岁组17%)^[28]。性别差异分析发现,男性腭中缝开放持续时间更长,可能与雄激素介导的骨代谢调控差异有关^[28-29]。此外,垂直生长型个体腭中缝成熟度较低,提示垂直向骨骼发育的力学刺激可能延缓骨缝闭合^[30]。临床评估需突破单纯年龄限制模式,重视个体化分析。

额缝早闭作为常见颅缝早闭类型,可能通过分子代偿途径影响腭中缝钙化过程。TGF- β 与BMP信号通路在颅颌面骨缝及腭中缝发育时序调控中发挥核心作用:TGF- β 信号通过不同成员(TGF- β_1 、TGF- β_2 、TGF- β_3)实施差异调控—TGF- β_1 和TGF- β_2 在融合期颅缝中高表达,经细胞外调节蛋白激酶通路(extracellular signal-regulated kinase, ERK)促进闭合(如小鼠颅骨模型中TGF- β_2 通过ERK1/2信号诱导腭中缝闭合);TGF- β_3 则在未融合腭中缝中维持上皮缝细胞存活,防止过早闭合。BMP信号通过促进间充质细胞增殖(如BMP2突变导致非综合征性腭裂)及调控性别决定区Y盒转录因子9表达参与腭部形态建成。遗传综合征研究进一步揭示信号通路异常导致发育时序紊乱的机制:洛伊斯-迪茨综合征因转化生长因子 β 受体1/2或SMAD家族成员3突变出现颅缝早闭及腭裂;施普林岑-戈德伯格综合征中SKI原癌基因突变通过增强TGF- β 信号引发颅缝早闭^[23]。上述证据表明,TGF- β /BMP信号的时空特异性激活与抑制精准调控颅颌面骨缝闭合时序,其失衡可引发发育异常(如颅缝早闭或腭裂)。

2.2 生物力学耦合机制

RME的生物力学效应依赖于腭中缝与颅颌面骨缝网络的协同响应机制。FEA显示,骨性扩弓器如MARPE通过微种植体直接传递应力至骨缝网络,显著减少牙齿倾斜,而传统牙性扩弓器应力集中于前牙区,易引发牙槽骨吸收。LEEISARAMAS等^[31]通过FEA证实,当种植体支抗位于腭斜坡区域时,应力可分散至翼腭缝和颧颌缝,形成均匀应力传递路径。PAN等^[32]对比不同腭形态扩弓效果发现,高位腭模型中腭缝横向位移更大,翼腭缝应力缓冲作用更显著,表明腭形态差异可调节骨缝应力分布。

作为颅颌面骨缝网络的关键应力缓冲结构,

翼腭缝的生物力学功能在有限元研究中得到充分验证。高位腭模型显示,其最大主应力显著高于其他骨缝,弹性形变可有效吸收横向力,降低对颅底骨缝的直接冲击^[32]。MENG 等^[33]对比骨性与传统扩弓器生物力学差异指出,骨性扩弓器在翼腭缝处产生更高应力,可能通过加速骨缝适应性改建提升效率,但需警惕过度应力导致骨缝早闭风险。FMA 揭示的应力传递规律与骨缝适应性改建机制,为优化临床扩弓策略提供了理论依据。

2.3 分子调控通路的交叉对话

腭中缝发育中,Wnt 信号通过调控 BMP/音猬因子通路影响间充质干细胞的分化和上皮间质转化。例如,无翅型 MMTV 整合位点家族成员 5A 通过非经典通路调控骨形态发生蛋白 4 表达梯度,既影响腭板水平生长,又参与颅颌面骨缝形态建成。BMP 信号(如 BMP4)在腭中缝融合中受 Wnt 直接调控,骨形态发生蛋白受体 1A 缺失导致腭裂及骨缝发育异常,提示 BMP-Wnt 存在共调控网络。此外,Wnt 与 FGF 通路交互作用对腭中缝/颅颌面骨缝细胞增殖迁移至关重要:成纤维细胞生长因子 8/成纤维细胞生长因子 18 (fibroblast growth factor 8/fibroblast growth factor 18, FGF8/FGF18) 作为 Wnt/ β -连环蛋白 (β -catenin, β -catenin) 靶基因,通过调控 PAX9/同源异型盒基因 MSX1 表达参与腭板间充质扩展及骨缝成骨分化;颅颌面骨缝中,Wnt9b 与 FGF8 协同驱动前颌骨/上颌突生长。TGF- β_3 作为 Wnt/ β -catenin 下游分子,既调控腭中缝上皮细胞凋亡融合,又通过 Dickkopf 相关蛋白 1 及胶原重塑影响骨缝闭合^[34]。这些发现表明,Wnt 信号通过多通路交叉形成分子网络,协调腭中缝与颅颌面骨缝发育,其异常与腭裂及颅面畸形相关。

β -catenin/cyclin D1 信号轴在颅骨缝间充质发育中扮演关键调控角色,该网络可能与其他颅颌面骨缝(如腭中缝)的发育存在分子调控关联。研究显示,利用条件性激活 β -catenin 的转基因小鼠模型,可显著促进颅骨缝间充质前体细胞增殖及骨化,该表型与 Axin2 缺陷模型一致。 β -catenin 持续激活通过上调直接靶基因 cyclin D1,驱动细胞周期进程加速并干扰成骨细胞终末分化,但骨基质矿化过程仍可完成。值得注意的是, β -catenin 异常激活显著改变 FGF (FGFR1、FGFR2、FGF2) 及

BMP 信号通路活性,而这 2 个通路在颅缝发育和腭部形态发生中已被证实存在协同调控作用。cyclin D1 缺陷小鼠 (cyclin D1^{-/-}) 呈现颅骨矿化延迟及骨缝增宽,其机制可能涉及 Runx2⁺/Osterix⁺ 成骨前体细胞扩增受阻,提示 cyclin D1 在不同颅颌面骨缝前体细胞增殖中具有保守性调控功能。

3 未来研究方向

当前研究在腭中缝成熟度评估体系与颅颌面骨缝发育关联性领域已取得阶段性成果,但仍存在亟待突破的瓶颈。未来需聚焦多模态融合评估、时空动态机制解析及靶向调控策略开发等方向,以推动临床转化效能。

3.1 建立多模态融合评估体系

基于 CBCT 的影像组学研究虽提高了腭中缝钙化评估精度,但设备参数差异引发的纹理分析偏差及软组织分辨率不足仍限制临床应用。改进型视觉转换器结合迁移学习虽将分类准确率提升至 95.75%,但需依托标准化影像数据库克服数据异质性^[35]。唾液与龈沟液中胰岛素样生长因子 1 (insulin-like growth factor 1, IGF-1)、骨钙素等生物标志物可动态反映骨骼成熟度,与影像组学特征存在协同潜力,如 IGF-1 水平在青春期快速生长期显著升高,可作为骨缝动态变化的生物学指标^[36]。未来需构建深度学习驱动的跨模态关联模型,整合影像纹理特征、生物标志物时序数据及临床参数,建立动态评估体系以优化 RME 治疗时机选择。

3.2 探索骨缝间信号传导的时空动态模型

Wnt、BMP 及 Hedgehog 通路在骨缝发育中呈现时空特异性表达模式,但其协同调控机制尚未阐明。胚胎期腭骨成骨分化在胚胎发育的 14.5 ~ 15.5 d 发生关键转录调控转换,出生后腭中缝成熟度与颈椎骨龄高度相关^[37]。空间分布层面,Glil⁺ 干细胞在骨缝损伤后优先分化为成骨细胞,而 BMP 信号增强可通过软骨内成骨异常导致骨缝过早融合^[38]。可以利用 4D 成像结合空间转录组学解析信号通路的区域表达特征,器官芯片模型模拟力学刺激与生化信号的协同效应,揭示骨缝闭合阈值机制。此类研究将为干预时机选择及力学参数优化提供理论支撑。

3.3 开发靶向骨缝干细胞的调控策略

骨缝干细胞(如 Glil⁺、Axin2⁺ 细胞)的靶向调

控是延缓病理性骨化或促进骨缝修复的关键。生物材料领域,维生素D负载水凝胶可诱导牙周膜干细胞成骨分化^[39]。力学刺激方面,低强度脉冲超声通过激活FGF信号促进骨缝修复,但需规避过度骨化风险^[40]。跨学科研究范式整合将成为必然趋势,通过影像-分子-力学多维数据深度融合,构建“评估-机制-干预”全流程研究框架,最终实现腭中缝及相关骨缝发育障碍的精准诊疗。

4 结论

腭中缝成熟度评估体系与颅颌面骨缝发育的关联研究,为颅颌面畸形诊疗提供了多维度理论支撑。核心进展包括:①评估技术创新:CBCT三维分型(A~E)结合人工智能影像分析,实现非侵入性精准评估,揭示成年个体中腭中缝未融合状态(阶段A)的临床价值,推动MARPE技术通过微种植体实现无创骨骼扩展。②机制深度解析:分子调控网络揭示Wnt/BMP通路与机械敏感Piezo2⁺细胞的协同作用,阐明颅颌面骨缝生物力学耦合及病理早闭的共性机制,为靶向治疗提供切入点。③临床转化突破:影像组学与生物标志物(如P1NP/CTX)的联合应用,实现骨缝活性动态监测,使正畸扩弓适应证选择从“年龄依赖”转向“生物学期指导”,显著提升阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征等疾病的干预效率。未来需聚焦多模态评估体系开发(如CBCT-弹性模量联合模型)、骨缝干细胞时空动态调控研究及跨中心大样本验证,推动诊疗模式向“精准调控”转型,最终建立生物学边界驱动的微创治疗体系。

参考文献:

- [1] 刘红彦,吴海燕.发育期腭开展后骨骼及牙齿变化的分析[J].中国现代医学杂志,2005,15(20):3188-3190.
- [2] SILVA-MONTERO J C, FAUS-MATOSES I, RIBAS-PÉREZ D, et al. Analysis of the frequency and correlated factors of midpalatal suture maturation stages in young adults, based on cone beam computed tomography imaging[J]. J Clin Med, 2022, 11(23): 6959.
- [3] NIK RAVESH M, AMELI N, LAGRAVERE VICH M, et al. Automated classification of midpalatal suture maturation using 2D convolutional neural networks on CBCT scans[J]. Front Dent Med, 2025, 6: 1583455.
- [4] REQUENA PÉREZ M, ZUBIZARRETA-MACHO Á, COLINO GALLARDO P, et al. Novel digital measurement technique to analyze the palatine suture expansion after palatine rapid maxillary expansion technique[J]. J Pers Med, 2021, 11(10): 962.
- [5] KOVAL S, KOLESNYK V, CHEPANOVA D. Applications of the novel midpalatal piezocorticotomy guide for MARPE midfacial skeletal expansion[J]. J Clin Med, 2025, 14(13): 4728.
- [6] ROTH D M, PIÑA J O, RAJU R, et al. Tendon-associated gene expression precedes osteogenesis in mid-palatal suture establishment[J/OL]. bioRxiv. (2024-05-14)[2025-05-10]. <https://doi.org/10.1101/2024.05.11.590129>.
- [7] JIN M Y, AN Y, WANG Z, et al. Distraction force promotes the osteogenic differentiation of Gli1+ cells in facial sutures via primary cilia-mediated Hedgehog signaling pathway[J]. Stem Cell Res Ther, 2024, 15(1): 198.
- [8] STANTON E, URATA M, CHEN J F, et al. The clinical manifestations, molecular mechanisms and treatment of craniosynostosis[J]. Dis Model Mech, 2022, 15(4): dmm049390.
- [9] GIACOMINI A, TARANTO S, GAZZAROLI G, et al. The FGF/FGFR/c-Myc axis as a promising therapeutic target in multiple myeloma[J]. J Exp Clin Cancer Res, 2024, 43(1): 294.
- [10] WHITE H E, GOSWAMI A, TUCKER A S. The intertwined evolution and development of sutures and cranial morphology[J]. Front Cell Dev Biol, 2021, 9: 653579.
- [11] ZHANG S D, LIN Y S, SHI B, et al. Identifying new susceptibility genes of non-syndromic orofacial cleft based on syndromes accompanied with craniosynostosis[J/OL]. Cleft Palate Craniofac J. (2025-01-22). <https://doi.org/10.1177/10556656251313842>.
- [12] SINGH R, GUPTA D, GARG A, et al. Evaluation of mid-palatal suture maturation stage in adolescents and adults using cone beam computed tomography (CBCT) - a comparative study[J]. Niger Med J, 2025, 66(1): 347-356.
- [13] MALYARAN H, CRAVEIRO R B, MERT S, et al. Identifying differences in molecular characteristics relevant for remodeling of periodontal ligament stem cells from the upper and lower jaw[J]. Int J Mol Sci, 2024, 25(6): 3207.
- [14] TURČANOVÁ M, HRTOŇ M, DVOŘÁK P, et al. Full-Range optical imaging of planar collagen fiber orientation using polarized light microscopy[J]. Biomed Res Int, 2021, 2021(1): 6879765.
- [15] PILMANE M, JAIN N, NADZINA E, et al. Immunohistochemical evaluation of the cleft-affected scar tissue three decades post-corrective surgery: a rare case report[J]. Acta Otolaryngol Case Rep, 2022, 7(1): 52-58.
- [16] ZEHANI S, OUAHABI A, OUSSALAH M, et al. Bone microarchitecture characterization based on fractal analysis in spatial frequency domain imaging[J]. Int J Imaging Syst Technol, 2021, 31(1): 141-159.
- [17] SHAYANI A, MERINO-GERLACH M A, GARAY-CARRASCO I A, et al. Midpalatal suture maturation stage in 10- to 25-year-olds using cone-beam computed tomography-a cross-sectional study[J]. Diagnostics (Basel), 2023, 13(8): 1449.

- [18] RIZZO G, CRISTOFORRETTI A, MARINETTI A, et al. Quantitative MRI T2 mapping is able to assess tissue quality after reparative and regenerative treatments of osteochondral lesions of the talus[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2021, 54(5): 1572-1582.
- [19] KANG W Y, HONG S J, BAE J H, et al. Associations of longitudinal multiparametric MRI findings and clinical outcomes in intra-articular injections for knee osteoarthritis[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2024, 14(18): 2025.
- [20] WILLERSHAUSEN I, KOPP M, SCHOLZ M, et al. Feasibility of 3 Tesla MRI for the assessment of mid-palatal suture maturation: a retrospective pilot study[J]. *Odontology*, 2025, 113(1): 390-397.
- [21] LV B L, LIU F, LI Y L, et al. Artificial intelligence-aided diagnosis solution by enhancing the edge features of medical images[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2023, 13(6): 1063.
- [22] FATIMA A, SHAFI I, AFZAL H, et al. Advancements in dentistry with artificial intelligence: current clinical applications and future perspectives[J]. *Healthcare (Basel)*, 2022, 10(11): 2188.
- [23] BAYDAR O, RÓŻYŁO-KALINOWSKA I, FUTYMA-GĄBK A K, et al. The U-Net approaches to evaluation of dental bite-wing radiographs: an artificial intelligence study[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2023, 13(3): 453.
- [24] SCHMIDT F, KILIC F, GERHART C V, et al. Biomechanical model registration for monitoring and simulating large orthodontic tooth movements in the maxilla and mandible[J]. *J Orofac Orthop*, 2024, 85(1): 69-79.
- [25] SAITO R, OZAKI H, FUSHIMA K, et al. Stress analysis of periodontal tissue in en masse retraction with integration of maxillary anterior teeth: a three-dimensional finite element method study[J]. *Cureus*, 2024, 16(8): e68277.
- [26] STEWART C C, O'HARA N N, BZOVSKY S, et al. Bone turnover markers as surrogates of fracture healing after intramedullary fixation of tibia and femur fractures[J]. *Bone Joint Res*, 2022, 11(4): 239-250.
- [27] 杨烽涛, 马连韬, 余剑波, 等. 人工智能在急诊医学中的应用进展[J]. *中国现代医学杂志*, 2025, 35(14): 38-43.
- [28] JIMENEZ-VALDIVIA L M, MALPARTIDA-CARRILLO V, RODRÍGUEZ-CÁRDENAS Y A, et al. Midpalatal suture maturation stage assessment in adolescents and young adults using cone-beam computed tomography[J]. *Prog Orthod*, 2019, 20(1): 38.
- [29] 张科, 蒋邵华, 韩文艳, 等. 骨化三醇联合地舒单抗治疗老年原发性骨质疏松症的临床研究[J]. *中国现代医学杂志*, 2025, 35(12): 70-74.
- [30] FESTA F, FESTA M, MEDORI S, et al. Midpalatal suture maturation in relation to age, sex, and facial skeletal growth patterns: a CBCT study[J]. *Children (Basel)*, 2024, 11(8): 1013.
- [31] LEEISARAMAS C, CHANTARAPANICH N, INGLAM S, et al. Analysis of stress distribution and displacement based on the miniscrew positions of the palatal slope bone-borne expander: a finite element study[J]. *Eur J Dent*, 2024, 18(4): 1012-1021.
- [32] PAN Y H, PENG W J, WANG Y Y. Comparison of the effects of different palatal morphology on maxillary expansion via RME and MSE: a finite element analysis[J]. *Clin Exp Dent Res*, 2024, 10(5): e70005.
- [33] MENG W Y, MA Y Q, SHI B, et al. The comparison of biomechanical effects of the conventional and bone-borne palatal expanders on late adolescence with unilateral cleft palate: a 3-dimensional finite element analysis[J]. *BMC Oral Health*, 2022, 22(1): 600.
- [34] 李峰, 谢方, 王雪, 等. 骨形成蛋白7对糖皮质激素诱导PC12细胞凋亡的作用研究[J]. *中国现代医学杂志*, 2024, 34(3): 49-56.
- [35] TANG H M, LIU S, TAN W J, et al. Prediction of midpalatal suture maturation stage based on transfer learning and enhanced vision transformer[J]. *BMC Med Inform Decis Mak*, 2024, 24(1): 232.
- [36] GV V, TRIPATHI T. Non-invasive methods for the assessment of biomarkers and their correlation with radiographic maturity indicators - a scoping review[J]. *Prog Orthod*, 2021, 22(1): 26.
- [37] PIÑA J O, RAJU R, ROTH D M, et al. Multimodal spatiotemporal transcriptomic resolution of embryonic palate osteogenesis[J]. *Nat Commun*, 2023, 14(1): 5687.
- [38] UEHARU H, PAN H C, LIU X, et al. Augmentation of BMP signaling in cranial neural crest cells leads to premature cranial sutures fusion through endochondral ossification in mice[J]. *JBMR Plus*, 2023, 7(4): e10716.
- [39] SMITH J, TRAN H, ROCCAPRIORE K M, et al. Advanced compressive sensing and dynamic sampling for 4D-STEM imaging of interfaces[J]. *Small Methods*, 2025, 9(1): e2400742.
- [40] ZHU S Y, CHEN W, MASSON A, et al. Cell signaling and transcriptional regulation of osteoblast lineage commitment, differentiation, bone formation, and homeostasis[J]. *Cell Discov*, 2024, 10(1): 71.

(李科 编辑)

本文引用格式: 顾叶婷, 刘曙, 张军梅. 腭中缝成熟度评估体系与颅颌面骨缝发育关联性的研究进展[J]. *中国现代医学杂志*, 2026, 36(6): 34-40.

Cite this article as: GU Y T, LIU S, ZHANG J M. Advances in the association between the midpalatal suture maturation assessment system and craniofacial suture development[J]. *China Journal of Modern Medicine*, 2026, 36(6): 34-40.