

· 智能医疗专题 · 专家论坛 ·

DOI: 10.12464/j.issn.0253-9802.2025-0105

多模态超声及人工智能用于足月妊娠 引产效果的预测价值

欢迎扫码观看
文章视频简介

罗颖欣, 陈洁莹, 许晶莹, 黄泽萍✉

(中山大学附属第三医院超声科, 广东 广州 510630)



通信作者简介: 黄泽萍, 主任医师、医学博士、硕士生导师, 中山大学附属第三医院超声科副主任兼岭南医院超声科主任。广州市天河区超声医学质控中心副主任。广东省女医师协会超声分会副主任委员, 广东省精准医学应用学会超声分会常务委员、广东省中西医结合协会超声分会常务委员、广东省预防医学会盆底功能障碍防治专委会常务委员、广东省妇幼保健协会超声专委会委员、广东省医学会产前诊断分会委员、中国超声医学工程学会生殖健康与优生优育超声专委会委员。广东省“南粤家庭健康大讲堂”科普专家。主持省级科研项目3项, 参与多项国家级、省级科研项目, 以通信作者或第一作者发表 *UOG*、*European Radiology*、*UMB*、《中华超声影像学杂志》等高水平论文20余篇。主编专著2本:《循序渐进, 轻松掌握妇科超声造影》《基层医师临床手册》。副主编专著2本:《盆底超声新技术临床应用》《实用盆底超声诊断学》。《中山大学学报(医学科学版)》《中华腔镜泌尿外科杂志(电子版)》等期刊审稿专家。E-mail: hzep@mail.sysu.edu.cn。

【摘要】 足月引产是产科处理高危妊娠的常用手段, 主要通过药物或球囊等其他方法, 通过人为干预启动产程, 减少胎儿不良妊娠结局的发生。引产过程中, 宫颈条件不成熟是导致引产失败的主要原因之一。传统的 Bishop 评分虽广泛应用于宫颈成熟度的评估, 但其主观性强, 难以提供准确的预测。二维、三维超声测量显示出较高的预测价值。此外, 机器学习和深度学习技术在超声图像分析中的应用, 进一步提升了宫颈成熟度和引产结局的预测准确性。随着超声技术的快速发展, 多模态超声技术逐渐成为评估宫颈成熟状态和预测引产成功率的重要工具。文章系统总结了多模态超声技术和人工智能技术在预测足月引产分娩结局、分娩时间等方面的研究进展, 为临床诊断提供了更为可靠的理论依据和实践参考。

【关键词】 足月引产; 多模态超声技术; 宫颈成熟度; 人工智能; 预测模型

Predictive value of multimodal ultrasound and artificial intelligence in predicting the effect of induction of labor in full term pregnancy

LUO Yingxin, CHEN Jieying, XU Jingying, HUANG Zeping✉

(Department of Ultrasound, the Third Affiliated Hospital of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510630, China)

Corresponding author: HUANG Zeping, E-mail: hzep@mail.sysu.edu.cn

【Abstract】 Induction of labor at full term (IOL) is a commonly used clinical intervention in obstetrics for managing high-risk pregnancies. It primarily involves pharmacological or mechanical methods, such as balloon catheters, to artificially initiate labor, aiming to reduce adverse maternal and neonatal outcomes. One of the primary reasons for IOL failure is the immaturity of the cervix. Although traditional Bishop score has been widely used for assessing cervical maturity, its subjective nature limits its ability to provide accurate predictions. In contrast, two-dimensional and three-dimensional ultrasound measurements have demonstrated higher predictive value. Furthermore, the application of machine learning and deep learning techniques in ultrasound image analysis has significantly enhanced the accuracy of predicting cervical maturity and IOL outcomes. With the rapid advancement of ultrasound technology, multimodal ultrasound techniques have become essential tools for evaluating cervical status and predicting the success of IOL. This review systematically summarizes recent progress in the application of multimodal ultrasound and artificial intelligence techniques for

收稿日期: 2025-03-25

基金项目: 广东省自然科学基金(2022A1515012027)

第一作者简介: 罗颖欣, 硕士研究生, 研究方向: 妇产超声医学, E-mail: luoyx255@mail2.sysu.edu.cn

predicting delivery outcomes and timing in IOL at full term, providing a more reliable theoretical foundation and practical reference for clinical diagnosis.

【Key words】 Induction of labor at full term; Multimodal ultrasound technology; Cervical maturity; Artificial intelligence; Predictive models

妊娠足月引产是指孕妇存在高危因素[如高龄(年龄 ≥ 40 岁)孕妇、延期妊娠、妊娠期糖尿病、胎儿宫内窘迫等]的情况下,为达到分娩目的,在自然临产前通过药物或其他手段促使产程发动的临床干预措施^[1]。2023年,加拿大妇产科医师协会(Society of Obstetricians and Gynaecologists of Canada, SOGC)对引产成功标准进行了定义,指出只要孕妇在引产后成功实现阴道分娩,无论其产程时间长短,均视为引产成功^[2]。研究表明,约25%的孕晚期孕妇需要接受人工引产^[3]。传统上,阴道检查评估 Bishop 评分是产科用于评估宫颈成熟度的主要手段。Bishop 评分通过综合评估宫颈长度、硬度、位置、胎先露位置及宫口扩张程度等多项指标判断宫颈成熟度,通常认为 Bishop 评分 ≥ 6 分提示宫颈成熟。然而,该方法存在主观性强的局限性,易受检查者手指粗细及长度等因素的影响,从而导致宫颈成熟度评估的准确性降低^[4,5]。现代医学影像技术中,多模态超声包括多种成像手段(二维结构显像、三维立体成像、血流动态监测、组织硬度评估及造影增强技术等),在预测引产结局方面,多模态超声技术作为新兴的评估手段,有望优化影像信息的完整性和准确性,进一步丰富了宫颈成熟度的评估手段,为精准诊疗提供多角度的可视化支持。此外,人工智能技术如机器学习(machine learning, ML)和深度学习(deep learning, DL),通过多因素联合模型构建,有望提升引产结局预测的准确性和客观性。本文旨在系统总结多模态超声技术和人工智能技术在预测足月妊娠引产方面的研究进展,为临床诊断提供更为可靠的理论依据和实践参考。

1 二维超声

1.1 宫颈长度及形态

宫颈长度是影响足月引产成功率的关键因素,但不同研究的宫颈长度临界值存在差异。有研究表明,当宫颈长度 ≤ 27 mm时,其预测引产结局的效能与 Bishop 评分 ≥ 4 分相当^[6]。另有研究指出,临产前4周内宫颈长度的动态变化(如4周内缩

短 < 6 mm)与宫颈扩张失败率升高相关^[7]。超声测量宫颈长度被广泛认为是预测引产结局的有效指标^[8],但测量方法、胎次及引产成功定义不统一可能导致临界值差异^[9-10]。

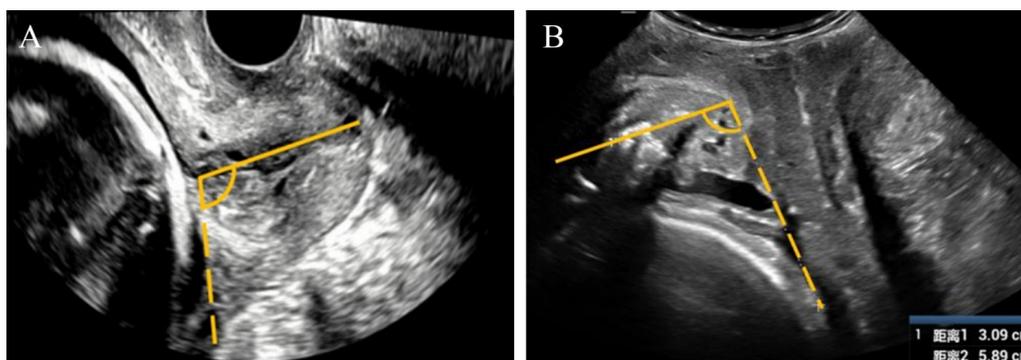
此外,宫颈漏斗形态也被证实与引产成功率存在相关性^[11]。宫颈漏斗(定义为羊膜膨出 $\geq 15\%$ 宫颈长度)与产程缩短相关,且宫颈漏斗可能与宫颈扩张的难易度相关,而与胎先露下降无关^[12]。证据表明宫颈漏斗预测效能与 Bishop 评分相当。然而,近年来国内尚未开展关于宫颈漏斗的引产预测研究,而国外对宫颈漏斗与引产成功预测的研究也较为有限,且很少将其作为单一的预测指标。

1.2 宫颈后角与产程进展角

超声评估宫颈后角和产程进展角(angle of progression, AOP)在预测引产结局中具有积极的作用^[13-15]。宫颈后角测量方法:在宫颈矢状面,以宫颈内口为顶点,连接内口-外口与子宫下段后壁-内口的两线夹角(图1A);AOP则为耻骨联合纵轴线与耻骨至胎儿颅骨轮廓线的夹角(图1B)。宫颈后角主要用于评估宫颈朝向,而AOP主要用于评估先露高低。研究显示,足月引产成功者宫颈后角和AOP显著更大,且宫颈后角预测效能优于AOP^[15-16]。Eser等^[17]的研究则提出,宫颈角度测量与引产至分娩的时间间隔密切相关。另有研究显示引产前AOP $> 89^\circ$ 的产妇经阴道分娩的概率增加^[18]。有学者通过meta分析系统评估了第二产程中经会阴测量AOP对分娩方式的预测效能,结果表明阴道分娩组的AOP角度比剖宫产组更大、进展速率更快^[19]。尽管上述参数临界值未统一,二者均为预测引产结局的重要超声指标。

1.3 胎头-会阴部距离

产程监测和分娩结局预测逐渐成为热点。动态监测AOP和胎头-会阴部距离(head-perineum distance, HPD)评估引产结局,对阴道试产的孕妇行超声测量AOP、HPD和胎头旋转角(Fetal Head Direction, HD)速率,计算潜伏期和活跃期的速率^[20],该研究中AOP和HPD速率的计算方法基于单位时间内的变化值($^\circ/\text{h}$ 和 cm/h),并



注：A 为经阴道测量宫颈后角，实线所示为宫颈内口至宫颈外口的连线，虚线所示为子宫下段后壁到宫颈内口的连线，夹角所示为宫颈后角；B 为经会阴测量产程进展角，实线所示为沿耻骨联合纵轴延伸的线，虚线所示为耻骨联合最下部至胎儿颅骨轮廓的连线，夹角所示为 AOP。本图为本文作者临床实践所得，已征得患者的知情同意。

图 1 宫颈后角和产程进展角的超声测量图像

Figure 1 Ultrasound measurement images of cervical posterior angle and labor progression angle

以 AOP 速率 $\leq 4.23^\circ/\text{h}$ 和 HPD 速率 $\leq 0.26\text{ cm/h}$ 作为预测中转剖宫产的阳性标准进行统计分析，显示 AOP 速率在预测中转剖宫产方面具有较高的灵敏度，但特异度较低；HPD 速率的预测效果较差，而 HD 速率对分娩方式的预测无显著价值。AOP 在测量宫口大小和胎头位置方面与阴道指检比较差异无统计学意义，而 HPD 则存在差异。此外，AOP 速率联合体质量指数（body mass index, BMI）和胎方位可以提高对中转剖宫产的预测能力。有研究将足月孕妇分为观察组（三维超声监测）和对照组（传统阴道指检），显示观察组的阴道分娩率较高且母婴不良结局发生率下降^[21]。研究显示宫颈长度联合 HPD 预测分娩时间效果不佳，可能是因为仅使用指检估计和经会阴超声测量，使测量结果存在偏倚^[22]。多参数预测模型（宫颈长度、宫颈后角和 HPD）的研究发现其预测能力为 70.74%（灵敏度为 78.3%，特异度为 52.9%，阳性预测值为 79.7%，阴性预测值为 50.7%），对阴道分娩有一定预测价值，但特异度有待提高^[23]。由于 HPD 测量易受胎位、肥胖等因素影响，目前多主张将其与其他超声指标联合应用，未来研究需进一步优化测量方法以提高预测准确性^[20-21]。

1.4 子宫下段肌层厚度

剖宫产术后再次妊娠的足月妇女，超声测量子宫下段肌层厚度（lower uterine segment thickness, LUST）是评估子宫破裂风险的重要手段。研究表明，经腹超声测量的宫底及后壁肌层厚度与引产过程中插入球囊至排出的时间间隔存在关联^[24]，而经阴道超声测量的 LUST 则显示出良好的可重复

性。Hamza 等^[25]进行的前瞻性队列研究发现 LUST 及其应变值不能预测引产结局。部分研究认为 LUST 与剖宫产风险相关^[26]。目前关于 LUST 在引产结局预测中的应用仍存在争议，其临床价值有待更多研究证实。

2 三维超声

2.1 宫颈容积

有学者通过三维成像测量宫颈体积评估引产结局。研究显示，采用圆柱体公式（ $V=\pi r^2 h$ ）计算的宫颈容积对预测 24 h 内阴道分娩具有一定价值，曲线下面积（area under the curve, AUC）为 0.74^[27]，但在宫颈机能不全产妇中（阴道分娩率为 74%，剖宫产率为 26%）预测价值有限^[28]。2 项前瞻性研究分别探讨了单纯宫颈体积测量和多参数联合评估的预测效能，结果存在差异。虽然现有研究较少且结论不一，但三维超声测量的宫颈体积在预测阴道分娩方面展现出潜在应用价值，值得深入探索。

2.2 耻骨弓角度

耻骨弓角度（pubic arch angle, PAA）通过二维定位结合三维重建技术测量，首先在二维模式下确定耻骨联合长轴平面，切换至三维模式采集体积数据，经三维重建后直接测量两侧耻骨间夹角，实现了骨盆出口形态的精准评估。陈捷等^[29]经会阴三维超声检测 PAA 对初产妇阴道分娩及分娩时间的预测价值，比较 2 组（是否阴道分娩）的临床资料及超声参数指标，结果显示 PAA 为阴

道分娩的独立影响因素,且PAA与AOP、HPD联合预测阴道分娩的AUC为0.896,具有较高的预测价值;此外,PAA $>99^\circ$ 的孕妇分娩时间较短。许美玲等^[30]发现PAA在 $100^\circ\sim 119^\circ$ 范围内的产妇占70.27%,且PAA异常与早产和低体重儿的发生率相关。Liang等^[31]分析PAA与分娩方式(如阴道分娩、剖宫产等)及分娩时间的关系,研究分为4组(产前剖宫产组、产时剖宫产组、正常阴道分娩组和产钳助产组),发现PAA的最小角度为 81° ,最大角度为 122.2° ,且阴道分娩组的PAA大于产时剖宫产组,是阴道分娩的正向预测因子,AUC为0.782,具有良好的预测能力。此外,PAA与第二产程时间呈负相关,PAA越小,第二产程时间越长。不同研究分别从产前骨盆评估、胎头-骨盆匹配度及产程动态监测等角度,证实了三维超声测量PAA对分娩方式和产程时间的预测价值。

3 弹性成像技术

超声弹性成像最早由Ophir等^[32]于1991年提出。目前主要采用应变式弹性成像和剪切波弹性成像2种方法测量宫颈弹性指标,该技术已从最初应用于甲状腺、肝脏等器官扩展至产科领域,为Bishop评分中的宫颈评估提供了客观量化手段。

3.1 应变弹性成像

研究表明,宫颈应变值、LUST及其应变值对24h内成功引产和分娩的预测能力有限。具体而言,在无剖宫产史的单胎妊娠妇女中,宫颈弹性图、LUST及应变值对引产成功的预测差异无统计学意义^[25]。为进一步提升预测效能,有学者将宫颈应变弹性成像与传统的Bishop评分及宫颈长度进行比较^[33]。为避免阴道超声探头施压标准化困难及组织形变受呼吸运动和血压波动影响的问题,研究者采用峰值应变比并结合视觉应变模式(cow spot patterns)进行分析^[34],结果表明应变弹性成像对引产结局具有一定的预测价值。此外,研究还发现,将弹性成像与宫颈长度联合应用时,其预测引产结局的准确性显著优于单独使用宫颈长度^[35]。近年来,半自动化软件E-cervix被引入宫颈弹性力学参数的评估中。该软件通过操作者绘制宫颈管轮廓,并在宫颈内口和外口之间设置4点感兴趣区域(regions of interest, ROI),自动生成包含整个宫颈区域的ROI。每个ROI被定义为2个半径为1cm的扇形区域,进而计算弹性指数和

硬度比。研究表明,硬度比与宫颈长度联合使用的预测效能高于单独使用宫颈长度^[4,36]。E-cervix作为半自动化软件,其优势在于无需手动加压,测量结果不受操作者施力及胎儿活动等因素干扰,而是基于子宫动脉搏动引起的组织形变进行弹性成像,具有更高的客观性、可重复性及更小的测量误差,可为临床医师提供更为精确的产程预测信息^[25]。然而,尽管E-cervix在技术上具有显著优势,但其作为一种新型的应变弹性成像方法,国内外相关研究仍较为有限,尚需进一步探索和验证。

3.2 剪切波弹性成像

Costas等^[37]的前瞻性观察性研究中,纳入了92例晚孕期初产妇,所有参与者均在引产前24h内接受了剪切波弹性成像(shear wave elastography, SWE)、宫颈长度和胎儿生物测量。SWE测量将宫颈分为6个区域(前侧和后侧的内、中、外部分),旨在探讨SWE在预测晚孕期初产妇引产成功中的价值,并与传统的宫颈长度和Bishop评分进行比较,验证SWE是否可以作为预测引产成功的有效工具。研究结果表明,SWE在宫颈的测量值具有较高的预测能力(AUC为0.809),且与引产成功相关。另一项前瞻性研究侧重于评估SWE对预测剖宫产风险中的应用价值,通过经阴道超声测量了宫颈长度、宫颈后角、AOP以及SWE^[38]。SWE测量将宫颈分为前侧和后侧的内、中、外3个区域,分别测量其弹性值,研究通过多因素回归分析评估了这些超声参数与引产结果(包括剖宫产及其亚组,如未能进入活跃期、进展失败、胎儿窘迫等)之间的关联,并通过受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线比较了不同预测模型的准确性,结果发现宫颈的弹性从内到外逐渐降低,宫颈内口区域的弹性值高于其他区域。宫颈内口的SWE值是剖宫产的独立预测因素,尤其是在未能进入活跃期的剖宫产亚组中表现出显著的预测能力。结合宫颈内口SWE、宫颈长度、产妇身高和产次(多产或初产)的预测模型在预测剖宫产时的AUC为0.815,而在预测未能进入活跃期的剖宫产时的AUC为0.888,优于仅使用Bishop评分的模型(AUC为0.819)。SWE作为一种量化的宫颈弹性测量方法,具有较高的重复性和客观性,但其应用需要一定的技术经验,且设备成本较高。SWE与宫颈长度结合使用可能取代Bishop评分,成为预测引产成功的更有

效工具。然而，这需要更大样本量的多中心研究来进一步验证这些发现。

4 人工智能及预测模型

4.1 人工智能在产科分娩预测中的早期应用

Devoe 等^[39]早期将人工智能技术（神经网络）应用于产科分娩预测，该研究首次验证了神经网络在预测第一产程时长中的优越性（神经网络 $r = 0.88$ vs. 传统产程图 $r = 0.35$ ），其采用的三层前馈反向传播网络架构为现代深度学习模型（如神经网络、集成学习）奠定了基础，后续研究虽使用更复杂的架构，但核心思想仍延续了通过多参数输入（如超声指标、临床数据）优化预测性能的逻辑。

4.2 机器学习和深度学习在医学成像中的应用

目前，ML 和 DL 在医学成像领域，尤其是在超声技术的应用上展现出显著的进展，这些进展主要体现在图像识别、分类、检测和分割等方面，在胎儿超声成像中，DL 模型通过卷积神经网络等架构，能够高效识别标准切面（如脑部横断面、心脏四腔心切面），并自动完成生物测量（如头围、股骨长度），显著减少了操作者依赖性和测量误差^[40-41]。

4.3 多因素联合模型在引产结局预测中的应用

国内外的研究者们也进行了多因素联合模型构建，以预测引产结局。刘源瀛等^[42]通过回顾性分析 178 例引产孕妇的数据，发现宫颈 Bishop 评分联合超声弹性成像参数如弹性对比指数（elasticity contrast index, ECI）、宫颈外口应变平均值（externalcervicalos, EOS）、宫颈长度，以及血清松弛素水平可提高预测准确性，AUC ROC 达 0.940，优于单一指标或两两联合。这一结果提示，超声弹性成像技术能够定量评估宫颈组织的软硬度，而松弛素作为调控宫颈重塑的关键激素，其血清水平与引产成功率有关。该研究还发现引产失败组的宫颈长度更长，进一步验证了宫颈形态学参数在预测中的重要性。另有学者利用 ML 与超声图像评估中国孕妇的宫颈成熟度，采用了 XGBoost、CatBoost 和 Random Forest 这 3 种集成学习方法，基于孕妇的年龄、宫颈长度、Bishop 评分、宫颈角度、引产时间及测量时间等多项参数进行孕妇宫颈成熟度的预测^[43]。研究者利用 ML 模型预测从引产到分娩的时间，结果显示 XGBoost

模型表现最优，其平均绝对误差和均方根误差分别为 13.49 h 和 16.98 h，低于传统 Bishop 评分方法的 19.45 h 和 24.55 h。此外，特征重要性分析表明引产时间、测量时间以及是否采用人工破膜对预测结果影响较大，而 Bishop 评分的贡献相对有限（在 XGBoost 模型中重要性排名第 7）。这一结果不仅验证了机器学习模型在宫颈成熟度评估中的客观性和准确性，还提示超声参数（如宫颈长度和角度）与临床时间变量的结合可提升预测效能。有研究者在交叉验证的模型评估中发现，产妇年龄、超声胎枕位置（胎儿枕位）、静止时 AOP 和引产前的宫颈长度是足月初产妇引产结局的良好预测指标。Kamel 等^[44]通过前瞻性队列分析（ $n = 344$ ）构建了多变量预测模型，结果显示上述指标的联合应用具有较高的预测效能（研究组的 AUC 为 0.79，验证组的 AUC 为 0.88）。值得注意的是，该研究通过超声客观测量参数降低了传统 Bishop 评分的主观性差异，同时结合胎枕后位（occiput posterior, OP）的识别（OR = 5.7, $P = 0.006$ ），为人工智能算法的特征工程提供了可靠的生物学标志。

4.4 多模态数据与人工智能的融合

近年来，研究者对多种 ML 算法（如逻辑回归、多层感知器、随机森林、支持向量机、XGBoost 和 AdaBoost 等 ML 模型）以及深度学习架构（如 Inception、ResNet 和 Xception 等 CNN 模型）在预测宫颈成熟度及分娩方式方面的有效性进行了系统性比较。Ferreira 等^[45]的研究通过回顾性分析 808 例引产孕妇的 2 024 张超声图像发现，传统的 Logistic 回归模型在仅使用临床数据时表现出预测性能（AUC 为 0.772），但其预测效能仍受限于主观性较强的 Bishop 评分，研究进一步创新性地整合了胎儿生物测量参数（头围、双顶径、腹围）与股骨超声图像特征，通过集成学习方法构建复合模型。结果显示，结合股骨超声图像与临床数据的 AdaBoost-Inception 集成模型提升了预测精度（F1 分数为 0.689，阳性预测值为 0.693），其特异度（0.908）与灵敏度（0.668）的平衡性优于单一临床模型（如 AdaBoost 模型的 F1 分数 0.736，但假阳性率高达 13.3%）。该模型通过深度学习自动提取的股骨图像特征弥补了传统生物测量参数的局限性，为客观评估分娩风险提供了新维度。与主观的 Bishop 评分相比，这种基于多模态数据的人工智能算法不仅降低了观察者间变异，还能通

过量化胎儿-母体相互作用(如胎儿大小与母体骨盆的匹配度)更精准地预测引产结局,为降低不必要的剖宫产率展现了潜在临床应用价值。

4.5 存在的挑战

然而,ML和DL研究可能受到超声胎儿生物测量评估中潜在误差的影响,从而削弱其检测异常胎儿生长的能力,且集成模型受到数据质量以及可用性的影响导致预测能力下降^[40-41]。在一项前瞻性研究中,研究者通过超声宫颈测量(包含宫颈弹性成像、宫颈长度、宫颈体积及宫颈角)开发了一种有效的预测模型,对141例(Bishop评分 ≤ 6 分)宫颈不成熟足月孕妇评估了引产前的Bishop评分、宫颈长度、宫颈体积、子宫宫颈角及宫颈弹性图参数,进行多变量Logistic回归以确定剖宫产的潜在危险因素^[28]。研究结果显示阴道分娩率为74%,剖宫产率为26%,且剖宫产组的Bishop评分低于阴道分娩组。然而,宫颈弹性成像、宫颈体积和子宫颈角度在组间比较差异无统计学意义,未能有效预测引产结局。相比之下,宫颈长度在预测引产至分娩时间间隔方面表现出显著价值,但在预测引产成功率方面未能提供有效的临床参考,这可能与样本量、测量方法的标准化以及宫颈成熟度的复杂性有关。

5 结语与展望

随着超声技术的快速发展,多模态超声技术在预测足月引产成功率方面展现出较好的优势。传统的Bishop评分虽然广泛应用于临床,但其主观性强难以提供准确的预测。相比之下,二维超声测量宫颈长度、宫颈后角、AOP和HPD等参数,提供了更为客观的评估手段。尤其是宫颈长度,已被广泛认为是引产成功的重要预测指标。尽管不同研究中的宫颈长度临界值存在差异,但其预测价值得到了广泛认可。三维超声技术通过测量宫颈容积和PAA,进一步提高了预测的准确性,尤其是在评估骨盆形态和胎儿头围匹配情况方面,显示出良好的临床应用前景。

弹性成像技术特别是SWE,通过定量评估宫颈弹性,提高了对引产结局的预测能力。研究表明,宫颈内口的SWE值与剖宫产风险相关,尤其是在未能进入活跃期的剖宫产亚组中表现出显著的预测能力。结合宫颈长度、产妇身高和产次的预测模型在预测剖宫产时的AUC达到0.888,优于

传统Bishop评分。此外,ML和DL技术在超声图像分析中的应用,进一步提升了宫颈成熟度和引产结局的预测准确性。通过集成多种超声参数和临床数据,ML模型在预测引产结局方面表现出更高的准确性,尤其是在减少预测误差和提高预测灵敏度方面具有显著优势。

尽管多模态超声技术和人工智能算法在引产预测中展现出巨大潜力,但仍存在一些挑战。首先,不同研究中的测量方法和临界值尚未统一,导致结果的可比性较差。其次,SWE和三维超声技术的设备成本较高,且操作复杂,限制了其在临床中的广泛应用。且ML模型的预测能力受到数据质量和可用性的限制,并且模型指标较为复杂,未来需要更大样本量的多中心研究来验证这些模型的普适性和稳定性。

多模态超声技术结合人工智能算法有望成为引产成功率预测的主流工具,未来的研究可致力于标准化测量方法,简化并优化预测模型,并通过多中心、大样本的研究验证其临床应用的可行性和有效性。此外,进一步探索宫颈弹性、骨盆形态和胎儿头围等因素对引产结局的影响,将有助于提高预测的准确性和临床应用的广泛性。

利益冲突声明: 本研究未受到企业、公司等第三方资助,不存在潜在利益冲突。

参 考 文 献

- [1] 中华医学会妇产科学分会产科学组. 妊娠晚期促子宫颈成熟与引产指南(2024)[J]. 中华妇产科杂志, 2024, 59(11): 819-828. DOI: 10.3760/cma.j.cn112141-20240707-00381. Obstetrics Subgroup of Chinese Society of Obstetrics and Gynecology of Chinese Medical Association. Guideline of cervical ripening and labor induction during the third trimester pregnancy (2024)[J]. Chin J Obstet Gynecol, 2024, 59(11): 819-828. DOI: 10.3760/cma.j.cn112141-20240707-00381.
- [2] 杨丽菊, 时春艳. 促宫颈成熟和引产: 2023年加拿大妇产科医师协会指南解读[J]. 中华围产医学杂志, 2023, 26(10): 803-810. DOI: 10.3760/cma.j.cn113903-20230921-00220. YANG L J, SHI C Y. Cervical ripening and induction of labor: Interpretation of 2023 Society of Obstetricians and Gynaecologists of Canada clinical practice guideline[J]. Chin J Perinat Med, 2023, 26(10): 803-810. DOI: 10.3760/cma.j.cn113903-20230921-00220.
- [3] MARTIN J A, HAMILTON B E, OSTERMAN M J K, et al. Births: final data for 2017[J]. Natl Vital Stat Rep, 2018, 67(8): 1-50.

- [4] 许云燕. 应用 E-cervix 弹性技术进行临产前宫颈成熟度评估及产程的相关性研究 [D]. 合肥: 安徽医科大学, 2022. DOI: 10.26921/d.cnki.ganyu.2022.000703.
XU Y Y. Application of E-cervix elasticity technology for pre delivery cervical maturity assessment and correlation study of labor process [D]. Hefei: Anhui Medical University, 2022. DOI: 10.26921/d.cnki.ganyu.2022.000703.
- [5] 金能. 宫颈弹性成像联合宫颈管长度对足月催引产效果的预测价值 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021. DOI: 10.27461/d.cnki.gzjdx.2021.003675.
JIN N. The predictive value of cervical elastography combined with cervical canal length for full-term induced abortion [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. DOI: 10.27461/d.cnki.gzjdx.2021.003675.
- [6] ABDULLAH Z H A, CHEW K T, VELAYUDHAM V R V, et al. Pre-induction cervical assessment using transvaginal ultrasound versus Bishops cervical scoring as predictors of successful induction of labour in term pregnancies: a hospital-based comparative clinical trial [J]. *PLoS One*, 2022, 17 (1): e0262387. DOI: 10.1371/journal.pone.0262387.
- [7] KWON J Y, WIE J H, CHOI S K, et al. The degree of cervical length shortening as a predictor of successful or failed labor induction [J]. *Taiwan J Obstet Gynecol*, 2021, 60 (3): 503-508. DOI: 10.1016/j.tjog.2021.03.020.
- [8] 刘洪莉, 李俊男. 《产时超声: 世界围产医学会和围产医学基金会临床实践指南和推荐》解读 [J/OL]. *中国产前诊断杂志 (电子版)*, 2022, 14 (3): 1-7. DOI: 10.13470/j.cnki.cjpd.2022.03.001.
LIU H L, LI J N. Interpretation of intrapartum ultrasound: clinical practice guidelines and recommendations of world perinatal medical association and perinatal medical foundation [J/OL]. *Chin J Prenat Diagn Electron Version*, 2022, 14 (3): 1-7. DOI: 10.13470/j.cnki.cjpd.2022.03.001.
- [9] LI P C, TSUI W L, DING D C. The association between cervical length and successful labor induction: a retrospective cohort study [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2023, 20 (2): 1138. DOI: 10.3390/ijerph20021138.
- [10] HOSOYA S, MAEDA Y, OGAWA K, et al. Predictive factors for vaginal delivery by induction of labor in uncomplicated pregnancies at 40-41 gestational weeks: a Japanese prospective single-center cohort study [J]. *J Obstet Gynaecol Res*, 2023, 49 (3): 920-929. DOI: 10.1111/jog.15536.
- [11] MILATOVIĆ S, KRSMAN A, BATURAN B, et al. Comparing pre-induction ultrasound parameters and the bishop score to determine whether labor induction is successful [J]. *Medicina (Kaunas)*, 2024, 60 (7): 1127. DOI: 10.3390/medicina60071127.
- [12] KIM Y N, KWON J Y, KIM E H. Predicting labor induction success by cervical funneling in uncomplicated pregnancies [J]. *J Obstet Gynaecol Res*, 2020, 46 (7): 1077-1083. DOI: 10.1111/jog.14270.
- [13] 钟万霖, 卓秀芳, 李菱, 等. 经阴道超声测量宫颈角预测自发性早临床价值 [J]. *影像研究与医学应用*, 2023, 7 (20): 47-49. DOI: 10.3969/j.issn.2096-3807.2023.20.014.
ZHONG W L, ZHUO X F, LI L, et al. Clinical value of measuring cervical angle by transvaginal ultrasound in predicting spontaneous premature delivery [J]. *J Imag Res Med Appl*, 2023, 7 (20): 47-49. DOI: 10.3969/j.issn.2096-3807.2023.20.014.
- [14] 卢文岳, 肖慧彬, 黄素梅, 等. 经阴道超声测量子宫颈角联合宫颈长度预测胎儿早产的可行性研究 [J]. *中国医药科学*, 2023, 13 (9): 118-121. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0616.2023.09.030.
LU W Y, XIAO H B, HUANG S M, et al. Feasibility of transvaginal ultrasound measurement of uterocervical angle and cervical length for predicting preterm birth [J]. *China Med Pharm*, 2023, 13 (9): 118-121. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0616.2023.09.030.
- [15] RIZZO G, MAPPA I, MAQINA P, et al. Prediction of delivery after 40 weeks by antepartum ultrasound in singleton multiparous women: a prospective cohort study [J]. *J Matern Fetal Neonatal Med*, 2022, 35 (25): 7787-7793. DOI: 10.1080/14767058.2021.1937109.
- [16] 汪银, 黄婷, 刘德红, 等. 宫颈后角和进展角预测引产后阴道分娩的临床价值 [J]. *临床超声医学杂志*, 2024, 26 (1): 70-74. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6978.2024.01.016.
WANG Y, HUANG T, LIU D H. Clinical value of cervical posterior horn and progression angle in predicting vaginal delivery after induced labor [J]. *J Clin Ultrasound Med*, 2024, 26 (1): 70-74. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6978.2024.01.016.
- [17] ESER A, OZKAYA E. Uterocervical angle: an ultrasound screening tool to predict satisfactory response to labor induction [J]. *J Matern Fetal Neonatal Med*, 2020, 33 (8): 1295-1301. DOI: 10.1080/14767058.2018.1517324.
- [18] 刘沫, 王雯雯, 呼慧莲, 等. 产程进展角对妊娠晚期引产结局的预测价值 [J]. *中国妇幼健康研究*, 2023, 34 (11): 61-66. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5293.2023.11.009.
LIU M, WANG W W, HU H L, et al. The value of angle of progression to predict the outcome of induction of labor in term pregnancy [J]. *Chin J Woman Child Health Res*, 2023, 34 (11): 61-66. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5293.2023.11.009.
- [19] 刘森, 陈震宇, 邢艳菲. 以第二产程中经会阴超声所测进展角预测分娩方式: meta分析 [J]. *中国医学影像技术*, 2024, 40 (5): 752-757. DOI: 10.13929/j.issn.1003-3289.2024.05.025.
LIU S, CHEN Z Y, XING Y F. Angle of progression measured with transperineal ultrasound in the second stage of labor for predicting delivery mode: meta-analysis [J]. *Chin J Med Imaging Technol*, 2024, 40 (5): 752-757. DOI: 10.13929/j.issn.1003-3289.2024.05.025.
- [20] 彭坤航. AOP 与 HPD 在初产妇中监测产程进展和预测分娩结局的可行性分析 [D]. 遵义: 遵义医科大学, 2023. DOI: 10.27680/d.cnki.gzyyc.2023.000359.
PENG K H. Feasibility analysis of AOP and HPD in monitoring labor progression and predicting delivery outcomes in primiparous women [D]. Zunyi: Zunyi Medical University, 2023. DOI: 10.27680/d.cnki.gzyyc.2023.000359.

- [21] 李璐, 谭焯, 吴春晓. 三维超声测量 AOP 和 HPD 在异常产程中指导分娩策略的临床价值 [J]. 临床和实验医学杂志, 2024, 23 (3): 285-289. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4695.2024.03.016.
- LI L, TAN Y, WU C X. Clinical value of three-dimensional ultrasound measurement of AOP and HPD in guiding delivery strategies during abnormal labor processes [J]. J Clin Exp Med, 2024, 23 (3): 285-289. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4695.2024.03.016
- [22] CHAN Y T V, LAU K W, HUI W, et al. Sonographic measurement of cervical length and head perineum distance before labor to predict time of delivery [J]. J Matern Fetal Neonatal Med, 2022, 35 (25): 4905-4909. DOI: 10.1080/14767058.2021.1873264.
- [23] DE MIGUEL MANSO S, COLOMO C A, TEJEDOR J G, et al. Ultrasound examination of the cervix for predicting labor induction success: failed validation in a routine clinical setting of a successful previous pilot study [J]. Arch Gynecol Obstet, 2020, 301 (1): 75-84. DOI: 10.1007/s00404-019-05383-7.
- [24] SPIEGEL E, WEINTRAUB A Y, ARICHA-TAMIR B, et al. The use of sonographic myometrial thickness measurements for the prediction of time from induction of labor to delivery [J]. Arch Gynecol Obstet, 2021, 303 (4): 891-896. DOI: 10.1007/s00404-020-05811-z.
- [25] HAMZA A, RADOSA J, GERLINGER C, et al. Cervical and lower uterine parameter ultrasound and elastographic parameters for the prediction of a successful induction of labor [J]. Ultraschall Med, 2021, 42 (5): 520-528. DOI: 10.1055/a-1131-7736.
- [26] DEL CAMPO A, AIARTZAGUENA A, SUÁREZ B, et al. Lower uterine segment thickness assessed by transvaginal ultrasound before labor induction: reproducibility analysis and relationship with delivery outcome [J]. Ultrasound Obstet Gynecol, 2023, 61 (3): 399-407. DOI: 10.1002/uog.26024.
- [27] ATHULATHMUDALI S R, PATABENDIGE M, CHANDRASINGHE S K, et al. Transvaginal two-dimensional ultrasound measurement of cervical volume to predict the outcome of the induction of labour: a prospective observational study [J]. BMC Pregnancy Childbirth, 2021, 21 (1): 433. DOI: 10.1186/s12884-021-03929-9.
- [28] İLERI A, YILDİRİM KARACA S, GÖLBAŞI H, et al. Diagnostic accuracy of pre-induction cervical elastography, volume, length, and uterocervical angle for the prediction of successful induction of labor with dinoprostone [J]. Arch Gynecol Obstet, 2023, 308 (4): 1301-1311. DOI: 10.1007/s00404-023-07076-8.
- [29] 陈捷, 黄国伟, 黄秋英. 第一产程经会阴二、三维超声检测对初产妇阴道分娩及分娩时长的预测价值 [J]. 广州医科大学学报, 2024, 52 (5): 30-34. DOI: 10.3969/j.issn.2095-9664.2024.05.06.
- CHEN J, HUANG G W, HUANG Q Y. The predictive value of transperineal 2D and 3D ultrasound on vaginal delivery and labor duration in primiparous women during the first stage of labor [J]. J Guangzhou Med Univ, 2024, 52 (5): 30-34. DOI: 10.3969/j.issn.2095-9664.2024.05.06.
- [30] 许美玲, 王雪, 梁晓君. 产前骨盆三维导航在阴道分娩中的应用价值 [J/OL]. 实用妇科内分泌电子杂志, 2022, 9 (28): 95-97. DOI: 10.3969/j.issn.2095-9664.2024.05.06.
- XU M L, WANG X, LIANG X J. Application value of prenatal pelvic three-dimensional navigation in vaginal delivery [J/OL]. J Pract Gynecol Endocr, 2022, 9 (28): 95-97. DOI: 10.3969/j.issn.2095-9664.2024.05.06.
- [31] LIANG Z W, GAO W L. Predictive value of the trans-perineal three-dimensional ultrasound measurement of the pubic arch angle for vaginal delivery [J]. World J Clin Cases, 2023, 11 (20): 4874-4882. DOI: 10.12998/wjcc.v11.i20.4874.
- [32] OPHIR J, CÉSPEDES I, PONNEKANTI H, et al. Elastography: a quantitative method for imaging the elasticity of biological tissues [J]. Ultrason Imaging, 1991, 13 (2): 111-134. DOI: 10.1177/016173469101300201.
- [33] STROBEL M K, EVESLAGE M, KÖSTER H A, et al. Cervical elastography strain ratio and strain pattern for the prediction of a successful induction of labour [J]. J Perinat Med, 2020, 49 (2): 195-202. DOI: 10.1515/jpm-2020-0189.
- [34] OTURINA V, HAMMER K, MÖLLERS M, et al. Assessment of cervical elastography strain pattern and its association with preterm birth [J]. J Perinat Med, 2017, 45 (8): 925-932. DOI: 10.1515/jpm-2016-0375.
- [35] ZHOU Y, JIN N, CHEN Q, et al. Predictive value of cervical length by ultrasound and cervical strain elastography in labor induction at term [J]. J Int Med Res, 2021, 49 (2): 300060520985338. DOI: 10.1177/0300060520985338.
- [36] YANG Q, ZHOU C C, CHEN Y, et al. Prediction model for successful induction of labor by cervical strain elastography diagnosed at late-term pregnancy in nulliparous women: a prospective cohort study [J]. BMC Pregnancy Childbirth, 2023, 23 (1): 114. DOI: 10.1186/s12884-023-05426-7.
- [37] COSTAS T, RODRÍGUEZ M O, SÁNCHEZ-BARBA M, et al. Predictive value of cervical shear wave elastography in the induction of labor in late-term pregnancy nulliparous women: preliminary results [J]. Diagnostics (Basel), 2023, 13 (10): 1782. DOI: 10.3390/diagnostics13101782.
- [38] LU J, CHENG Y K Y, HO S Y S, et al. The predictive value of cervical shear wave elastography in the outcome of labor induction [J]. Acta Obstet Gynecol Scand, 2020, 99 (1): 59-68. DOI: 10.1111/aogs.13706.
- [39] DEVOE L D, SAMUEL S, PRESCOTT P, et al. Predicting the duration of the first stage of spontaneous labor using a neural network [J]. J Matern Fetal Med, 1996, 5 (5): 256-261. DOI: 10.3109/14767059609025431.
- [40] ZEGARRA R R, GHI T. Use of artificial intelligence and deep learning in fetal ultrasound imaging [J]. Ultrasound Obstet Gynecol, 2023, 62 (2): 185-194. DOI: 10.1002/uog.26130.
- [41] XIE H N, WANG N, HE M, et al. Using deep-learning algorithms to classify fetal brain ultrasound images as normal or abnormal [J]. Ultrasound Obstet Gynecol, 2020, 56 (4): 579-

587. DOI: 10.1002/uog.21967.
- [42] 刘源瀛, 张爱青, 王永清. 宫颈 Bishop 评分联合宫颈超声弹性成像及血清学标志物对宫颈成熟度评估价值的研究 [J]. 国际妇产科学杂志, 2024, 51 (2): 184-188. DOI: 10.12280/gjfcx.20230506.
- LIU Y Y, ZHANG A Q, WANG Y Q. Study on the predictive value of cervical ultrasound elastography combined with serological makers and cervical bishop score for cervical ripening [J]. J Int Obstet Gynecol, 2024, 51 (2): 184-188. DOI: 10.12280/gjfcx.20230506.
- [43] LIU Y S, LU S, WANG H B, et al. An evaluation of cervical maturity for Chinese women with labor induction by machine learning and ultrasound images [J]. BMC Pregnancy Childbirth, 2023, 23 (1): 737. DOI: 10.1186/s12884-023-06023-4.
- [44] KAMEL R A, NEGM S M, YOUSSEF A, et al. Predicting cesarean delivery for failure to progress as an outcome of labor induction in term singleton pregnancy [J]. Am J Obstet Gynecol, 2021, 224 (6): 609.e1-609609.e11. DOI: 10.1016/j.ajog.2020.12.1212.
- [45] FERREIRA I, SIMÕES J, PEREIRA B, et al. Ensemble learning for fetal ultrasound and maternal-fetal data to predict mode of delivery after labor induction [J]. Sci Rep, 2024, 14 (1): 15275. DOI: 10.1038/s41598-024-65394-6.
- (责任编辑: 林燕薇)

