超声弹性成像在妇产科中的应用进展

苏雪梅
宝鸡市妇幼保健院　陕西　宝鸡　721000

摘　要：超声弹性成像作为一种能够无创检测组织生物力学属性的新型功能成像技术，近年来在妇产科领域取得了显著进展。该技术通过评估组织在外部或内部激励下的形变响应，以弹性模量或剪切波速度等定量参数反映组织的硬度差异，从而为多种妇产科疾病的早期诊断、风险分层及治疗监测提供补充信息。本文系统回顾了超声弹性成像的技术分类及其基本原理，重点综述其在产科胎儿-胎盘-宫颈轴评估和妇科肿瘤、子宫内膜病变及子宫肌层疾病中的临床应用进展，分析了当前技术标准化、操作可重复性及深度学习融合等关键问题，并对未来多模态整合与智能化发展方向作出展望。研究表明，超声弹性成像已从探索性工具逐步迈向临床辅助决策角色，但其大规模推广仍需多中心证据链支持。

关键词：超声弹性成像；剪切波弹性成像；妇产科；宫颈机能不全

引言

妇产科疾病的精准诊治需要对组织形态以及其功能进行评价。虽然传统的灰阶超声以及多普勒可以观察到解剖结构以及血流情况，但是不能够反映组织力学性质的变化。而组织硬度的变化（例如宫颈软化、胎盘纤维化、肿瘤浸润等）往往比形态学变化出现更早。超声弹性成像（UE）通过对组织应变或者剪切波速度进行测量，“软硬”转变为可视化的图像或者是数字。近年来随着剪切波弹性成像（SWE）以及二维实时成像的发展，使得UE越来越多地应用于妇产科领域（例如预测宫颈机能不全、评估胎盘功能、判断胎儿肺成熟度）、妇科（例如判断子宫内膜癌浸润深度、鉴别卵巢肿瘤良恶性、区分腺肌症与肌瘤）。但是由于各个厂家所采用的标准不同、医生之间存在较大个体差异以及受孕妇自身条件影响等因素，UE尚未普及到临床上。

1 超声弹性成像的技术原理与分类

1.1 力学基础与成像机制

生物组织的弹性模量反映其抵抗变形的能力，疾病状态下常发生改变：肿瘤因细胞增殖、胶原沉积或纤维化而变硬，炎症、水肿或坏死则导致软化。超声弹性成像通过监测组织在外力作用下的位移、应变或剪切波传播，反推弹性模量。主要分为两类：应变弹性成像（SE）和剪切波弹性成像（SWE）。SE利用手动或生理运动（如呼吸）施加外力，通过互相关算法计算应变并以灰阶或彩色图显示硬度，优点是快速、成本低，但仅为定性或半定量，且受施力大小影响大。SWE则采用声辐射力脉冲（ARFI）激发剪切波，结合超高速成像追踪波速，依据波动理论计算剪切波速度（SWV）或杨氏模量（kPa），提供可重复、客观的定量结果，已成为临床主流技术。

1.2 关键技术参数与质控要求

SWE检测应注意以下几个重要参数：剪切波速度(m/s)、杨氏模量平均值(Emean)、最大值(Emax)以及标准差(SD)，而SD表示组织异质性。检测深度、感兴趣区域(ROI)大小、探头频率及患者呼吸都会影响所得结果的一致性。国际医学超声联合会(WFUMB)推荐在产科应用中使用标准化扫查切面（例如宫颈矢状面、胎盘中央区），并且至少要进行三次测量求平均数来减少随机误差[1]。另外，由于不同组织的方向性差异（如子宫肌层纤维走向）会对剪切波的传播方向造成影响，在分析时应考虑到这一点，目前大多数仪器都假设组织是各向同性的，在存在大量纤维定向的情况下会造成较大误差。

2 超声弹性成像在产科领域的应用进展

2.1 宫颈组织弹性评估与早产预测

宫颈重塑(cervical remodeling)是妊娠期一种正常的软化过程，过早发生会增加早产的风险。传统的经阴道宫颈长度测量虽然被认为是预测早产的最佳方法，但是它的阳性预测价值较低，尤其是对宫颈长度 > 25 mm的中危孕妇无效。UE可以测量宫颈内口以及外口处的弹性，因此它可以早期发现由于胶原分解导致的硬度降低。大量的横断面和前瞻性研究显示，在妊娠中期，宫颈SWE弹性值（一般测量宫颈前唇或者后唇的杨氏模量）在早产儿中明显低于足月新生儿，而且它和宫颈长度的关系很弱，说明两者提供不同的信息。另外，测量部位很重要，宫颈内口处的弹性比外口更有意义，因为它是更早地反映功能性的宫颈改变。此外，在双胎妊娠、宫颈环

扎术后以及辅助生殖受孕人群中也进行了测试并且取得了一定的结果，但是它们的阈值根据不同的仪器有所区别（常用的范围是在15-25 kPa之间），所以没有一个公认的阈值，这使得他们不能单独用于诊断。

2.2 胎盘功能与妊娠并发症

胎盘是母体与胎儿之间的重要屏障，胎盘内纤维蛋白沉积、微血栓形成或绒毛间隙血流受阻均可引起组织变硬，反映慢性缺血或者炎症状态。UE在胎盘应用主要用于妊娠期高血压疾病的筛查、胎儿生长受限以及妊娠期糖尿病的筛查等。一般来说，随着孕周增大，正常胎盘的弹性逐渐增大，这可能是由于绒毛发育以及胶原蛋白积累所致；而子痫前期患者的胎盘中央区SWE值高于正常妊娠者（平均差值约8-12kPa），并且随着脐动脉舒张期末期血流消失以及胎盘病理改变的程度而增大。而在胎儿生长受限患者中，胎盘弹性增大会先于胎儿双顶径或者多普勒血流指标改变约2-3周出现，因此具有一定的预警作用[2]。但是由于胎盘的位置（前壁还是后壁）、羊水量以及胎儿肢体压迫等因素都会影响测量结果，因此建议在孕妇仰卧位并且呼吸稳定的情况下，在胎盘实质远离脐带附着处取多个点进行测量。另外基于深度学习的自动ROI勾画和质量控制评分系统正在研发之中，将会进一步提升检测结果信噪比。

2.3 胎儿肺成熟度与神经系统评估

胎儿肺内表面活性物质含量决定了其顺应性，而弹性成像可以利用肺组织硬度来推测肺是否发育完全。有学者发现，在晚期妊娠时，胎儿肺SWE值随着孕周增大而降低（表示表面活性物质增加），但由于存在肋骨声影、胎动以及呼吸等因素的影响，该方法难以准确可靠地应用于临床；另一方面，胎儿大脑组织在宫内感染或者缺血缺氧情况下会有所改变，但是由于颅骨较强回声以及脑脊液波动较大，相关报道很少见，目前仅限于动物实验或少量的人体前瞻性研究。总的来说，产科UE最稳定的是宫颈和胎盘，而对于胎儿方向还需要进一步的技术改进（例如更高的帧率以及更好的运动去除技术）。

3 超声弹性成像在妇科领域的应用进展

3.1 子宫内膜病变与子宫内膜癌肌层浸润

子宫内膜癌是女性常见恶性肿瘤，而其治疗方法主要决定于肌层浸润程度（ ≥ 50%为高危因素）。普通灰阶超声无法明确识别内膜-肌层分界线，在肥胖或者合并有子宫腺肌症患者中诊断率低。UE可表现为肿瘤组织硬度大于临近肌层（由于肿瘤细胞密度大以及纤维间质反应所致），并且可在弹性成像上以硬度值进行半定量判断浸润范围。有报道称，子宫内膜癌病灶Emax（一般为40到70kPa）明显大于正常内膜或单纯增生内膜（约15到25kPa），而且浸润深度超过50%，其弹性变异系数（SD/Mean）较大，提示瘤周微环境变化。尤其是对于绝经后阴道流血但内膜小于5mm同时存在危险因素者，弹性值增大是进一步行宫腔镜检查指征，避免不必要的手术。但是需要注意的是，子宫肌瘤或腺肌症造成的局部硬度增加也会造成误诊，需要与彩色多普勒血流图像相结合。

3.2 卵巢肿瘤的良恶性鉴别

卵巢肿瘤组织学类型多样，囊性和实质性成分共存使得传统的超声恶性评分方法（例如IOTA简单规则）存在不确定性。UE在附件肿物中的使用与实质器官不同：对实性的部分，用SWE测得硬度值，恶性上皮性肿瘤（如高级别浆液性癌）由于密集纤维间质而表现为较高硬度（Emax > 50kPa），而良性囊腺瘤或畸胎瘤的实质性乳头硬度较低（ < 25kPa）[3]。而对于单纯囊性的病灶，弹性成像的价值不大。但是由于卵巢位于较深的位置并且受到肠内气体以及呼吸运动的影响，测得的成功率较低，而经阴道SWE探头由于频率高、距离近的优势大大提高了成像的质量，但是需要施加一定的力度以免变形肿物。目前尚无弹性指标被加入到国际卵巢肿瘤评估（IOTA）指南中，但是随着多参数列线图的应用，它们可能会成为一个附加的加权因子。

3.3 子宫肌层疾病：子宫肌瘤与子宫腺肌症

子宫肌瘤（平滑肌瘤）是由平滑肌和平滑肌之间结缔组织构成，一般较厚肌层硬（SWE均值40 ~ 60kPa），而子宫腺肌症（异位内膜侵入肌层）呈弥漫性轻度到中度硬化（25 ~ 40kPa）并且不均匀。两者在灰阶超声上有时难以区分（特别是肌瘤发生退变或者腺肌症存在局部囊肿情况下），弹性成像可以起到补充作用。随访显示，肌瘤在整个月经周期中弹性变化不大，而腺肌症病灶在月经期间由于充血、水肿等原因会导致硬度降低，这一点有利于功能性判断。另外，在高强度聚焦超声（HIFU）或子宫动脉栓塞之后，消融区域坏死造成该处硬度降低，UE可用于术后效果评价以及复发预警。但是需要注意的是，子宫位置（如后位子宫）以及测量深度（大于5cm）会影响SWE信号衰减，建议采用经阴道方式获取更为准确肌层弹性图像。

4 技术局限、标准化挑战与智能融合展望

4.1 当前主要技术瓶颈

虽然应用广泛，但是在妇产科推广UE也遇到很多困难。首先是设备之间以及探头之间测得的结果无溯源性，不同的厂家SWE系统（如声科、西门子、GE、迈瑞等）在同一部位测量结果可相差20%-30%，不利于多个

中心制定相同的临界值；其次是操作者的依赖性问题尚未解决，ROI的位置、次数以及患者的体位等均需要进一步规范化指导，目前只有部分三级甲等医院建立了专门的质量控制制度；再次是对于孕期由于各种原因所导致的各种因素的变化（如孕周、羊水量、子宫收缩力等）对于弹性值的影响时间变化的研究尚不足，缺少动态的标准；最后是对深层组织（如胎盘后壁、卵巢深处）剪切波衰减较大，信噪比低，影响测量准确性。

4.2 与人工智能结合的新范式

近两三年，深度学习应用于UE图像质量评价、ROI自动分割、硬度模式分类等都大大降低人主观性的影响。基于U-Net宫颈区域分割网络可以进行自动ROI定位，它与医生手工测量的组内相关系数（ICC）由原来的0.65提高到0.89。同时，将弹性参数与其他临床信息（年龄、BMI、激素水平）以及传统超声参数结合形成综合预测模型，在早产及卵巢癌的风险判断上要比单个参数好（AUC增加约0.08至0.12）[4]。下一步工作还有：建立云端弹性数据库消除不同机器之间的差别；开发动态弹性视频来观察组织蠕变；以及联合微血流成像做“硬度-灌注”的全方位分析。

4.3 临床落地路线图建议

根据目前的研究结果，我们提出三个步骤进行推广：第一步，在三级医院制定统一的操作流程以及质量控制标准，获得本地区的正常值；第二步，在全国范围内进行前瞻性多中心注册研究，确定不同适应症的最佳截断点以及阳性预测值等；第三步，将UE纳入妇产科相关临床指南或者专家共识中，作为参考指标而不是唯一手段。另外，希望设备厂家开放原始数据接口，使算法公开化，以便于提高研究重复率。

5 结语

超声弹性成像技术经过十余年的发展，在妇产科学上已经从最初的探索性研究发展成为一种有明确临床应用前景的辅助诊断方法。在产科，宫颈SWE可以用于早产的风险评估，提供比单纯测量解剖长度更多的生物学信息；胎盘弹性也可以用于预测妊娠期高血压以及FGR的发生。而在妇科当中，它可以用作子宫内膜癌浸润深度的判别，还可以用于卵巢肿瘤危险程度分级以及区分子宫肌层病变等。但是要使它从一个“有潜力”的东西变成一个“有用的”工具，还需要解决标准化问题、设备之间的差异性以及操作的一致性等问题。在未来五年内，随着人工智能辅助质控、多模态结合的方法以及大样本量的真实世界研究结果的应用，UE可能会真正地被引入妇产科临床工作中，成为精准医学时代不可或缺的力学“触手”。

参考文献

[1]李华,张明.剪切波弹性成像在早产预测中的研究进展[J].中华超声影像学杂志,2022,31(4):345-350.

[2]王静,陈莉,赵岩.超声弹性成像评估胎盘功能在妊娠期高血压中的应用[J].中国医学影像技术,2021,37(9):1382-1386.

[3]孙丽,吴青青,刘敏.经阴道超声弹性成像对子宫内膜癌肌层浸润深度的诊断价值[J].中华妇产科杂志,2022,57(7):512-518.

[4]周建,郑海荣,王丛知.声辐射力弹性成像的物理原理与临床质控[J].物理学报,2021,70(23):238701-238710.