三维超声成像在青少年特发性脊柱侧凸评估中的应用进展

徐 欣,刘 敏
上海师范大学天华学院健康学院,上海 201815

摘要:青少年特发性脊柱侧凸(AIS)是一种常见的复杂三维脊柱畸形,其传统筛查与随访高度依赖全脊柱X线检查,存在不容忽视的累积辐射风险。近年来,三维超声成像技术凭借其无辐射、低成本及动态评估的优势,在AIS管理领域展现出重要应用潜力,但其评估的准确性、适用边界及临床转化可行性在学界仍存在争议。本文系统梳理了三维超声成像在AIS多平面评估中的可靠性与有效性证据,归纳了其临床应用进展,重点剖析了该技术的现存局限性,并对未来发展方向进行了展望。旨在为临床实践及相关研究提供参考。

关键词:三维超声成像;青少年特发性脊柱侧凸;无辐射评估

Progress of three-dimensional ultrasound imaging in the assessment of adolescent idiopathic scoliosis

XU Xin, LIU Min
School of Health, Shanghai Normal University Tianhua College, Shanghai 201815, China

Abstract: Adolescent idiopathic scoliosis (AIS) is a common and complex three-dimensional spinal deformity. Its traditional screening and follow-up highly depend on whole-spine X-ray examinations, posing a non-negligible risk of cumulative radiation exposure. In recent years, three-dimensional ultrasound imaging has demonstrated significant potential in AIS management due to its radiation-free, low-cost, and dynamic assessment advantages. However, its assessment accuracy, application boundaries, and feasibility for clinical translation remain controversial in the academic community. This review systematically summarizes the evidence regarding the reliability and validity of three-dimensional ultrasound in the multi-planar assessment of AIS, outlines the progress of its clinical applications, critically analyzes the existing limitations of this technology, and prospects future development directions. It aims to provide a reference for clinical practice and related research..

Keywords: 3D ultrasound imaging; adolescent idiopathic scoliosis; radiation-free assessment

青少年特发性脊柱侧凸(AIS)是一种病因未明的复杂三维脊柱畸形[1,2],全球患病率为1%~3%[3],中国大陆AIS的患病率约为1.20%[4]。其典型特征是冠状面Cobb角≥10°的侧弯畸形,常伴随轴向椎体旋转(AVR)及矢状面生理曲度改变[5-7]。若未及时干预,AIS可能进展为严重畸形,引发心肺功能障碍、慢性疼痛甚至神经损伤[8]。因此,早期筛查与动态监测对于延缓畸形进展、优化治疗方案至关重要[1]。

早期诊断并启动非手术治疗(如支具矫正和脊柱侧凸特异性运动)被认为与延缓畸形进展、降低手术干预需求相关[2]。国际学术界的关注点正逐渐转向更精准且低负担的监测手段。例如,脊柱侧凸骨科与康复治疗科学协会及脊柱侧凸研究学会在近期的会议议程与长期研究规划中,均将“超声成像技术”及“智能化预测分析”列为重点探索方向[9-12]。这些学术动向虽尚不代表成熟的临床指南,但敏锐地反映了领域内对于减少AIS诊疗过程中累积辐射暴露、实现高频动态监测的迫切临床需求。

收稿日期:2025-07-09
基金项目:上海高校市级重点课程项目(A-0201-283-23254)
作者简介:徐 欣,硕士,讲师,E-mail: Tomorrowxin@126.com
通信作者:刘 敏,硕士,副教授,E-mail: liumin5713039@163.com

目前临床筛查AIS主要依赖体格检查(如Adams前屈试验)和影像学评估。体格检查操作简便,但主观性强,单独使用目测法时敏感度仅为84.4%,假阴性率高[13]。影像学评估中,全脊柱X线片作为测量Cobb角的金标准[14, 15],存在电离辐射风险[9]。研究表明,AIS患者在随访期间累积的辐射暴露可能增加其终生癌症风险[15]。鉴于此,开发并验证可靠的无辐射评估技术已成为当前骨科与康复医学领域的重要研究方向。近年来,三维超声成像凭借其无辐射、低成本、便携性及实时动态成像的特点,在AIS评估中展现出显著的临床转化潜力[16-18]。研究表明,该技术在脊柱侧弯评估中显示出一定的可靠性[19]与有效性[9],并具备多平面评估能力[5, 20]。

本文旨在客观梳理三维超声成像在脊柱畸形多平面(冠状面、矢状面和AVR)评估中的可靠性与有效性证据,探讨其临床应用价值,并重点分析其现有的局限性与技术挑战,以期为该技术在AIS管理中的定位提供参考。

1 三维超声成像应用于脊柱侧弯筛查的技术基础与发展

1.1 技术基础

三维超声成像技术通过B型超声和空间传感器系

统,实现了脊柱的三维重建[21, 22]。其核心基础涵盖了系统组成、成像原理和测量方法[22]。

典型的三维超声系统通常由线性超声探头(中心频率约7.5 MHz)、电磁空间传感器、计算机处理单元和体位支撑装置构成。探头配备位置传感器,能够实时捕获探头的位置和方向数据,确保精确的空间定位。患者在站立位时,通过胸部和髋部支撑板固定姿势,以减少运动伪影,从而提高图像质量。超声凝胶则用于填充探头与皮肤之间的间隙,进一步确保超声波的良好传导和图像的清晰度[23, 24]。

成像原理基于超声波在骨组织中的反射特性。脊柱的棘突和横突在超声图像中表现为高回声(明亮)的轮廓及其后方的声影(暗区),这些特征是进行脊柱结构识别和测量的重要依据。在成像过程中,有研究报道探头沿脊柱(从S1到T1)以约1 cm/s的速度平稳滑动,系统自动将三维容积数据重建为二维冠状面图像,用于脊柱曲度角的测量[25]。

关键的测量方法包括棘突角(SPA),该角度通过在冠状面图像中绘制棘突阴影最倾斜部分的连线来计算侧弯角度[19]。

1.2 技术发展

1.2.1 早期发展与创新 三维超声成像技术的起源可追溯至1989年,有学者通过手动定位棘突并结合测斜仪进行脊柱的三维评估[17, 26];2005年开发了便携式系统,利用位置传感器显著提升了三维重建的精度[17, 27]。进入2010年代,Scolioscan®系统(Telefield Medical Imaging)实现了商业化[21],该系统支持快速投影成像,通过非平面渲染技术优化了冠状面图像质量,显著缩短处理时间[24, 28]。

1.2.2 设备与系统进展 三维超声成像技术的发展体现在设备形态的改进,特别是便携性的提升。便携式系统如Scolioscan Air的出现,以其超轻、易用特性拓展了潜在的应用范围[21]。为验证该便携设备,有研究将其与标准Scolioscan系统进行比较,对19例脊柱侧凸志愿者(共29个弯曲角度)的测量结果显示,两者具有中度至强度的相关性(R^2=0.78),平均绝对差(MAD)为2.9°±1.8°。受试者脊柱曲度(由Scolioscan测量)范围为6.4°~33.0°,涵盖轻度至中度侧凸病例[21]。这一结果初步证实了便携式设备在技术层面的可行性,但其在复杂临床场景下的稳定性仍需进一步验证。

1.2.3 算法与流程优化 为解决早期手动评估耗时[28]及操作者依赖[29]等问题,技术进步集中于算法与流程的优化。首先是实时成像与重建算法的改进。快速投影成像技术通过非平面渲染优化了冠状面图像质量,缩短了处理时间[24, 28]。有研究进一步开发了实时自由手3D超声成像方法,实现了高帧率,这为动态评估提供了技术基础[23]。其次是人工智能(AI)的引入。AI被用于自动识别棘突声影和测量SPA角[29-31]。如有学者提出基于自适应相位特征的全自动脊柱曲率角测量方法,在实验环境下,处理速度据报道可达5 s/例,与手动方法显示出高度相关(r=0.90),但其临床误差界限(如MAD)尚需更多数据验证[32]。AI驱动的自动分割和测量[33, 34],其目标是减少评估的变异性。这些技术进步旨在克服早期方法耗时和操作者变异性大等局限[28],试图提升评估效率和一致性,为其临床应用转化提供了可能。

2 三维超声成像在AIS评估中的可靠性和有效性进展

三维超声成像在AIS评估中的可靠性与有效性是近年来的研究重点,主要通过与X线Cobb角等金标准的对比来评价[5, 15, 22, 29]。

2.1 冠状面曲度评估的可靠性与有效性

通过三维超声成像技术对冠状面曲度进行评估的可靠性主要通过操作者内/间信度及评估者内/间信度来体现。研究报道,超声Cobb角(UCA)的测量具有较高的操作者内信度[组内相关系数(ICC)≥0.973]和操作者间信度(ICC≥0.925)[15]。一项针对40例AIS患者(Cobb≤55°)的试点研究中评估了无线手持3D超声系统测量Cobb角的可靠性,研究显示,该系统的操作者内信度极高[ICC(2,1)≥0.97,MAD=1.8°±1.4°],当与X线金标准进行有效性对比时,Cobb角测量的ICC(2,1)值在0.97~0.98之间,MAD分别为1.8°±1.2°(R1评估者)和1.5°±0.9°(R2评估者)[5]。有研究显示SPA角的评估者内信度(ICC[2, k]≥0.979)和评估者间信度(ICC[2, k]≥0.997)均高于0.90[19]。也有研究提示了超声中心椎板法(COL)(ICC≥0.88)和Scolioscan®系统的可靠性(ICC≥0.87)[22, 35]。这些数据共同证实了超声测量在不同设备和方法学下具有较好的内部一致性(可靠性)。

在此可靠性基础上,评估UCA有效性的关键在于其与X线Cobb角金标准之间的一致性与准确性。评估一致性的首选指标应为ICC和MAD。一项针对164例AIS患者(Cobb角范围8.2°~70.3°,站立位)的前瞻性研究报道,UCA与X线Cobb角的ICC为0.933~0.945,MAD≤3°,并且83%的病例测量差异在临床可接受的5°以内,两者具有相关性(R^2≥0.884)[15]。有研究提示三维超声SPA角与X线Cobb角具有高度相关性(r>0.9),且两种方法测量结果的平均值差异无统计学意义(P>0.05),提示了良好的均值等效性[19]。也有研究提示,三维超声COL法与MRI Cobb角具有高度相关性(r>0.9),但该研究显示两者差异有统计学意义(P<0.05)[36]。

然而,不能简单地将这一结论推广至所有场景,不同设备与测量方法之间存在差异。设备差异:台式系统(如Scolioscan)借助刚性支架固定,图像采集更稳定,研究报道其在站立位下的MAD仅为2.6°[15];而手持式或便携式系统由于缺乏机械臂辅助,对操作者手法的依赖性更高,部分研究报道其误差范围略宽(MAD可达3°~5°)[5, 21]。方法差异:不同的测量算法也会影响结果。研

究指出，COL法虽然信度高，但在严重侧弯中倾向于低估角度，而横突法在部分研究中显示出更高的相关性[37]。因此，临床解读时需充分考虑设备类型与测量方法的异质性。

2.2 矢状面曲度评估的可靠性与有效性

与冠状面相比，目前关于矢状面脊柱曲度评估的研究相对较少。一项研究在自然站立体位下验证了三维超声成像在评估轻中度AIS患者（*n*=21，平均年龄15.7岁）胸椎后凸角（KA）与腰椎前凸角（LA）的应用潜力[38]。研究结果显示，该技术在矢状面测量中具有良好的可靠性，KA和LA的ICC均≥0.91。在有效性方面，超声测量值与X线金标准之间具有相关性。该研究对比了超声SPA角与超声椎板角两种测量方法，结果显示：在胸椎区域，两者的MAD分别为6.4°和6.1°；在腰椎区域，MAD分别为7.5°和5.3°。统计分析表明，胸椎和腰椎测量的MAD无差异，但是，本节报道的矢状面测量误差（MAD 5.3°~7.5°）明显高于前述冠状面评估中报道的误差水平（MAD≤3°），提示超声在矢状面形态评估的精确度仍低于冠状面，该技术在矢状面形态评估的精确度上仍有待进一步提升。

但鉴于上述数据主要来自单一中心的初步研究，且样本量较小，该结论在重度侧弯或复杂畸形中的适用性仍需验证。

2.3 AVR评估的可靠性与有效性

有研究验证了三维超声测量AVR的可靠性与有效性，发现操作者内ICC=0.975，操作者间ICC=0.969；此外，三维超声测量的AVR与EOS系统测量的AVR高度一致（ICC=0.930，MAD=2.7°）[39]，提示其具备一定的有效性。既往研究[20]（N=43，Cobb角22°±11°）提示，AVR有望成为三维超声测量中较为稳定的参数之一，在“自然站立”、“手指触锁骨”及“手扶墙”3种不同体位下的重测信度极高（ICC≥0.91），且测量误差最小（SEM为1.6°~2.2°），均达到了临床个体化评估的标准。但目前结论主要源自单中心、小样本（*n*<50）的验证性研究。目前领域内仍缺乏大样本、多中心的前瞻性研究来确证AVR在不同侧弯类型中的普适性。

2.4 系统综述与证据质量评价

一项对14项研究进行的系统综述指出，在现有的超声评估方法中，COL方法在信度与效度方面均表现出最高的证据等级。该研究显示，COL方法的组内/组间信度极高（ICC=0.80~1.00），且与X线Cobb角的相关性达到了“良好至优秀”水平（*r*=0.76~1.00）[37]。另一项纳入19项研究（2318例AIS患者）的Meta分析进一步量化了三维超声的临床效能，结果显示超声测量与X线测量的总体MAD为4.02°（95% *CI*：3.28°~4.76°），汇总相关系数高达0.91（95% *CI*：0.87~0.93）。在亚组分析中，横突法显示出最高的相关性（*r*=0.94），其次是棘突法（*r*=0.90）和COL法（*r*=0.87）。在可靠性方面，超声测量的操作者内信度（Mean ICC=0.96±0.06）和操作者间信度（Mean ICC=0.93±0.04）均表现优异[29]。

然而，两篇综述均提示了现有证据的局限性。一文献[37]指出，尽管COL证据等级最高但其在轻度弯曲中倾向于高估，而在中重度弯曲中倾向于低估。另一文献[29]则强调，纳入研究之间存在显著的高度异质性（I^2>90%），且多数研究存在不明确或较高的偏倚风险。这种异质性可能源于受试者的Cobb角严重程度、弯曲类型、BMI差异以及扫描体位的不同。因此，尽管三维超声展现出作为无辐射评估工具的巨大潜力，尤其是在减少青少年累积辐射暴露方面，但目前证据尚不足以支持其完全替代X线作为单一的确诊或筛查工具，未来仍需高质量的纵向研究以优化其在不同临床场景下的应用标准。

总体而言，现有证据提示三维超声在冠状面和AVR评估中展现出较好的可靠性与有效性，但矢状面的评估准确性仍显不足，且整体证据多为一致性研究，质量仍需优化。三维超声在AIS评估中的主要可靠性与有效性指标总结（表1）。

3 临床应用场景

基于前述的可靠性验证，三维超声成像技术主要在以下不同临床场景中进行了探索与应用。本文对各应用场景的证据强度描述，主要依据现有文献的研究数量、样本规模及设计类型进行定性划分，并非采用GRADE等严格的临床指南分级体系。

3.1 大规模筛查与初诊评估（研究最为广泛）

三维超声成像适用于青少年AIS群体的初步筛查。多项研究提示，该技术在减少辐射暴露方面，可作为学龄期筛查及支具监测的辅助补充手段[17, 19, 24]。尽管有报道称该技术扫描时间短、操作简便，理论上具备应用于学校高吞吐量筛查的技术潜力[40]，但目前仍需解决操作标准化及设备普及率问题[17]。鉴于现有研究显示超声在评估Cobb角<30°的侧弯时准确性最佳，且X线仍是确诊的金标准，对于筛查阳性或超声测量显示Cobb角>30°的疑似病例，仍建议转介至X线进行确诊[17]。

3.2 支具治疗效果动态监测（具备应用潜力）

三维超声可用于支具内矫正的实时评估。一项前瞻性队列研究（*n*=24）利用超声在夜间支具制作前量化矫正效果，为支具适配提供了即时反馈[41]。该应用的核心优势在于，患者可在佩戴支具的状态下进行无辐射扫描[15, 28]，这有助于在长期随访中减少X线的使用频率，从而降低累积辐射风险[17, 41]。

3.3 特殊人群的长期随访（特定场景优势）

针对哺乳期女性及儿童等辐射敏感人群，三维超声提供了一种无电离辐射的监测选项。有研究证实了该技术具有较高的信度和效度，为其在哺乳期等特殊人群

表1 三维超声在AIS评估中与金标准(X线/MRI)比对的主要信效度研究汇总

Tab.1 Summary of reliability and validity studies of 3D ultrasound vs. gold standards in AIS assessment

First author	Assessment category/study design	Sample characteristics	Measurement method	Reliability	Validity vs gold standard	Key findings/remarks
Lee et al.[15]	Coronal/Prospective diagnostic study	AIS (*n*=164)	UCA method	Intra-rater ICC≥0.973, Inter-rater ICC≥0.925	ICC=0.933-0.945, MAD≤3°	Measurement differences in 83% of cases were within the clinically acceptable range of 5°; R^2≥0.884.
Nguyen et al.[5]	Coronal/Pilot study	AIS (*n*=40)	Wireless handheld system	Intra-rater ICC≥0.97, MAD=1.8°±1.4°	ICC=0.97-0.98, MAD=1.5°-1.8°	Small sample size; confirmed the feasibility of portable devices.
Zhang et al.[19]	Coronal/Cross-sectional study	AIS (*n*=15)	SPA method	Intra-rater ICC≥0.979, Inter-rater ICC≥0.997	Correlation *r*>0.9, No significant difference in means (*P*>0.05)	Confirmed good mean equivalence between US SPA and X-ray Cobb angle.
He et al.[36]	Coronal/Cross-sectional comparative study	AIS (*n*=16)	COL method vs. MRI	N/A	Correlation *r*>0.9	High correlation, but a statistically significant difference was observed (*P*<0.05).
Lee et al.[38]	Sagittal/Prospective feasibility study	AIS (*n*=21)	KA (Thoracic) LA (Lumbar)	Intra-rater ICC≥0.91 for KA/LA	Thoracic MAD=6.1°-6.4°, lumbar MAD=5.3°-7.5°	Sagittal errors (5.3°7.5°) were significantly higher than coronal errors (<3°); accuracy needs further improvement.
Lee et al.[39]	Axial Vertebral Rotation (AVR)/ Diagnostic accuracy study	AIS (*n*=29)	AVR measurement	Intra-rater ICC=0.975, Inter-rater ICC=0.969	*vs* EOS system: ICC=0.930, MAD=2.7°	Demonstrated high consistency of US AVR measurement with the EOS system.
Fehr et al.[20]	Axial Vertebral Rotation (AVR)/ Test-retest reliability study	AIS (*n*=43)	Multiple-posture testing	Test-retest ICC≥0.91	SEM=1.6°-2.2°	AVR showed high stability; small sample size requires multi-center validation.
Wu et al.[37]	Systematic Review	14 included studies	Focus on evidence level	COL method ICC=0.80-1.00	COL method correlation *r*=0.76-1.00	COL method has the highest evidence level, but tends to overestimate in mild curves and underestimate in severe curves.
Kwan et al.[29]	Meta-analysis	19 studies (*n*=2318)	Overall	Mean intra-rater ICC= 0.96±0.06, mean inter-rater ICC=0.93±0.04	Pooled MAD=4.02°, pooled correlation *r*=0.91	Subgroup analysis showed highest correlation for transverse process method (*r*=0.94); high heterogeneity among studies (I^2>90%).

N/A indicates the metric was not reported in the original text. MAD: Mean absolute difference; ICC: Intraclass correlation coefficient; US: Ultrasound; SPA: Spinous process angle; COL: Center of lamina; KA: Kyphosis angle; LA: Lordosis Angle; SEM: Standard error of measurement.

的病情监控中应用提供了技术层面的可行性[19]。对于此类人群,在病情稳定期使用超声进行中间随访,有助于在保证监测频率的同时,规避X线带来的潜在生物学风险。

3.4 术中引导与功能评估(探索性场景)

此外,部分研究探索了三维超声在其他场景的应用潜力,但目前证据尚处于初步阶段。在支具拟合等非手术场景中,有学者开发的系统被用于提供实时影像,以辅助矫正效果的评估[24]。然而,由于金属植入物会产生严重的声影和混响伪影,该技术明确不适用于脊柱内固定术后的复查[19]。在功能评估方面,有研究利用超声评估不同体位(如前屈、侧屈)下的脊柱形态变化[20, 42, 43]。这种多姿态评估有望帮助临床医生理解脊柱的柔韧性与动态行为[41],但其临床指导意义仍需大样本研究证实。

4 局限性与挑战

尽管三维超声成像在AIS筛查和评估中展现出应用前景,但受限于超声物理特性及当前技术水平,其在临床推广前仍面临诸多挑战。

4.1 影像质量与特定人群限制

首先,现有初步研究提示,患者体征显著影响成像成功率。高BMI患者:皮下脂肪组织对超声波具有强烈的衰减作用,导致深部脊柱结构信噪比降低,棘突声影模糊,使得BMI超过一定阈值(部分研究建议的经验界值为25 kg/m^2)的患者成像失败率显著增加[44]。重度及复杂畸形:研究指出,测量误差随Cobb角增大而增加[45]。对于Cobb角>50°的重度侧弯,或伴有严重椎体旋转和复合畸形(如双弯)的病例,棘突解剖位置的变异可能导致重建算法失效。提示可能是当前技术应用的相对禁忌证或慎用范围。金属植入物:植入物产生的声影和混响伪影会严重干扰成像[19]。因此,对于上述三类人群(高BMI、重度畸形、内固定术后),三维超声目前不具备替代X线的条件,临床上必须坚持以X线或EOS作为评估金标准。

4.2 操作者依赖与标准化缺失

其次是高度的操作者依赖性与学习曲线问题。目前主流的自由手超声系统，其测量精度高度依赖操作者的扫描技术。扫描速度的稳定性、探头压力的均匀性以及扫描路径是否严格沿脊柱棘突连线，均会显著影响三维重建的准确性[12, 23]。然而，目前领域内缺乏关于操作者学习曲线的量化研究，也未形成统一的标准化培训考核体系[17, 46]。尚无研究明确界定达到稳定测量精度所需的最小训练例数，也缺乏标准化的操作一致性评价量表。

4.3 测量偏倚与模型局限

最后是测量偏倚与模型局限。重复测量偏差：现有研究多关注单次测量的一致性，但对同一受试者不同日间的重复测量变异性，以及不同设备间（如便携式*vs*台式）的一致性尚缺乏系统的定量总结。模型保真度：超声获取的主要是后柱骨性标志点的表面解剖信息，生成的3D模型在解剖细节（如椎弓根、椎体前柱）的保真度上远不如CT或EOS系统[28, 47]，这限制了其在复杂外科手术规划中的应用。参数局限：如前所述，其在矢状面的测量误差较大[38]，限制了其在脊柱矢状面平衡评估中的价值。

5 未来方向

基于当前的技术局限与临床应用现状，未来的研究与发展应分为短中期的标准化与证据积累，以及长期的技术迭代两个层面进行。

5.1 短中期标准化建立与高等级证据积累

当前最紧迫的任务是解决操作者依赖性问题。标准化协议：亟需制定国际统一的图像采集协议（如扫描路径、速度、体位控制）和测量指南[17]，以提高不同中心间数据的可比性。培训体系：建立量化的操作者培训与考核体系，明确学习曲线，确保测量的可重复性和再现性。前瞻性研究：开展多中心、大样本的前瞻性纵向研究，特别是针对支具治疗期间的长期随访，以确立超声参数（如UCA）变化与X线Cobb角进展之间的预测模型，而非仅停留在横断面的一致性验证上。

5.2 长期智能化融合与成像技术突破

在技术层面，深度学习与硬件创新是未来的核心驱动力。AI赋能：深化AI在棘突自动分割、椎体旋转自动识别及三维重建中的应用[32, 33]，旨在实现“一键式”自动化测量，从而从根本上降低人为误差。成像质量提升：探索骨增强超声[45]等新型成像算法。目前该技术尚处于概念验证与实验室测试阶段，未来需进一步开展临床转化研究，以旨在解决高BMI患者（见4.1节）深部脊柱结构信噪比低的问题，改善三维模型的解剖保真度[42]。多模态融合：探索超声与表面地形图等其他无辐射技术的融合，以提供更全面的外部体表与内部骨骼信息。

6 结论

三维超声成像技术在AIS的早期筛查和长期管理中显示出应用潜力。现有的一致性研究提示，在轻中度AIS患者的评估中，其冠状面测量结果与X线金标准具有较好的一致性，且无辐射暴露风险。凭借无辐射、低成本及实时成像的特点，该技术有望成为学龄期大规模筛查及支具治疗期间频繁监测的有益补充手段。然而，必须清醒地认识到，该技术目前在矢状面评估、高BMI人群成像及重度/复杂畸形的测量中仍存在明显局限，且操作者依赖性和标准化协议的缺失限制了其在不同中心间的推广。综上所述，三维超声目前尚不能完全替代X线。未来的研究应致力于建立标准化的操作与培训体系，开展高质量的前瞻性纵向研究，并结合AI优化测量流程。只有在解决上述挑战后，三维超声才能真正实现从“研究工具”向“临床常规工具”的转化，为AIS患者提供一种安全、有效的长期监测方案。

参考文献：

[1] Jinnah AH, Lynch KA, Wood TR, et al. Adolescent idiopathic scoliosis: advances in diagnosis and management[J]. Curr Rev Musculoskelet Med, 2025, 18(2): 54-60.

[2] 白玉树, 陈 锴, 邵 杰, 等. 青少年特发性脊柱侧凸诊疗专家共识[J]. 海军军医大学学报, 2025, 46(3): 291-300.

[3] Li MY, Nie QL, Liu JY, et al. Prevalence of scoliosis in children and adolescents: a systematic review and meta-analysis[J]. Front Pediatr, 2024, 12: 1399049.

[4] Xu S, Li KX, Jin LY, et al. Distribution of scoliosis in 2.22 million adolescents in mainland China: a population-wide analysis[J]. J Glob Health, 2024, 14: 04117.

[5] Nguyen TNN, Le LH, Emery DJ, et al. Reliability and accuracy of scoliotic parameters on using a wireless handheld 3D ultrasound for children with adolescent idiopathic scoliosis: a pilot study[J]. Eur Spine J, 2024, 33(10): 3784-91.

[6] 儿童青少年脊柱弯曲异常防控技术指南编写组, 马 军.《儿童青少年脊柱弯曲异常防控技术指南》解读[J]. 中国学校卫生, 2022, 43(2): 165-70, 175.

[7] 游梦佳, 郑新峰, 李 强, 等. 特定运动疗法治疗青少年特发性脊柱侧凸的作用机制及临床疗效研究进展[J]. 脊柱外科杂志, 2025, 23(1): 56-61.

[8] 刘 敏. 青少年脊柱侧凸的影像学研究与应用[J]. 分子影像学杂志, 2022, 45(4): 627-31.

[9] Wong J, Reformat M, Parent E, et al. Validity and accuracy of automatic Cobb angle measurement on 3D spinal ultrasonographs for children with adolescent idiopathic scoliosis: SOSORT 2024 award winner[J]. Eur Spine J, 2025, 34(5): 1622-30.

[10] SOSORT. SOSORT 2024 abstract book[M]. Boston: SOSORT, 2024.

[11] SOSORT. SOSORT 2025 program and abstract book[M]. Rio de Janeiro: SOSORT, 2025.

[12] Yi CZ, Sun XL. Merging computational intelligence and wearable technologies for adolescent idiopathic scoliosis: a quest for multiscale modelling, long-term monitoring and personalized treatment[J]. Med Data Min, 2025, 8(2): 9.

[13] 杨 林, 付高勇. 青少年脊柱侧弯筛查研究新进展[J]. 现代诊断与治疗, 2024, 35(22): 3358-60, 3366.

[14] 吴加弘, 袁空军. 青少年脊柱侧弯诱发因素、筛查方法及干预手段的

研究进展[J]. 中国慢性病预防与控制, 2025, 33(3): 236-40.
[15] Lee TT, Lai KK, Cheng JC, et al. 3D ultrasound imaging provides reliable angle measurement with validity comparable to X-ray in patients with adolescent idiopathic scoliosis[J]. J Orthop Translat, 2021, 29: 51-9.
[16] Pasha S, Rajapaske CR, Reddy R, et al. Quantitative imaging of the spine in adolescent idiopathic scoliosis: shifting the paradigm from diagnostic to comprehensive prognostic evaluation[J]. Eur J Orthop Surg Traumatol, 2021, 31(7): 1273-85.
[17] Zheng YP, Lee TTY. 3D ultrasound imaging of the spine[M]//Bone Quantitative Ultrasound. Cham: Springer International Publishing, 2022: 349-72.
[18] 王 谦, 李 梦, 柳学明, 等. 三维超声对青少年不同体位下脊柱侧凸与旋转角度变化的研究[J]. 四川大学学报: 医学版, 2018, 49(5): 737-42.
[19] 张 博, 朱红鹤, 梅 伟, 等. 三维超声影像技术用于青少年特发性脊柱侧弯评估的信度与效度研究[J]. 颈腰痛杂志, 2023, 44(4): 639-41.
[20] Fehr BJ, Parent EC, Pollard J, et al. The test‐retest reliability of frontal, sagittal, and transverse spinal measurements during three standing arm positions in adolescents with idiopathic scoliosis measured using ultrasound imaging[J]. Eur Spine J, 2025, 34(1): 225-33.
[21] Lai KK, Lee TT, Lee MK, et al. Validation of scolioscan air-portable radiation-free three-dimensional ultrasound imaging assessment system for scoliosis[J]. Sensors, 2021, 21(8): 2858.
[22] Zheng YP, Lee TT, Lai KK, et al. A reliability and validity study for Scolioscan: a radiation-free scoliosis assessment system using 3D ultrasound imaging[J]. Scoliosis Spinal Disord, 2016, 11(1): 13.
[23] Jiang WW, Chen XT, Yu CH. A real-time freehand 3D ultrasound imaging method for scoliosis assessment[J]. J Appl Clin Med Phys, 2022, 23(8): e13709.
[24] Cheung CJ, Zhou GQ, Law SY, et al. Ultrasound volume projection imaging for assessment of scoliosis[J]. IEEE Trans Med Imaging, 2015, 34(8): 1760-8.
[25] Yang XY, Di DR, Lv YH, et al. Three-dimensional ultrasonography: Advancing the clinical evaluation of adolescent idiopathic scoliosis [J]. Ultrason Sonochem, 2025, 119: 107391.
[26] Suzuki S, Yamamuro T, Shikata J, et al. Ultrasound measurement of vertebral rotation in idiopathic scoliosis[J]. J Bone Jt Surg Br Vol, 1989, 71-B(2): 252-5.
[27] Huang QH, Zheng YP, Lu MH, et al. Development of a portable 3D ultrasound imaging system for musculoskeletal tissues[J]. Ultrasonics, 2005, 43(3): 153-63.
[28] Jiang WW, Zhou GQ, Lai KL, et al. A fast 3-D ultrasound projection imaging method for scoliosis assessment[J]. Math Biosci Eng, 2019, 16(2): 1067-81.
[29] Kwan CK, Young JH, Lai JC, et al. Three-dimensional (3D) ultrasound imaging for quantitative assessment of frontal Cobb angles in patients with idiopathic scoliosis - a systematic review and meta-analysis[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2025, 26(1): 222.
[30] Lyu J, Ling SH, Banerjee S, et al. 3D ultrasound spine image selection using convolution learning-to-rank algorithm[C]//2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Berlin, IEEE, 2019: 4799-802.
[31] Ran QY, Miao JZ, Zhou SP, et al. Automatic 3-D spine curve measurement in freehand ultrasound *via* structure-aware reinforcement learning spinous process localization[J]. Ultrasonics, 2023, 132: 107012.
[32] Zhou GQ, Li DS, Zhou P, et al. Automating spine curvature measurement in volumetric ultrasound *via* adaptive phase features [J]. Ultrasound Med Biol, 2020, 46(3): 828-41.
[33] Zhang HZ, Huang CF, Wang DY, et al. Artificial intelligence in scoliosis: current applications and future directions[J]. J Clin Med, 2023, 12(23): 7382.
[34] Ungi T, Greer H, Sunderland KR, et al. Automatic spine ultrasound segmentation for scoliosis visualization and measurement[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2020, 67(11): 3234-41.
[35] Chen W, Lou EHM, Zhang PQ, et al. Reliability of assessing the coronal curvature of children with scoliosis by using ultrasound images[J]. J Child Orthop, 2013, 7(6): 521-9.
[36] 何红晨, 王 谦, 柳学明, 等. 三维超声用于青少年特发性脊柱侧凸评估的信度与效度研究[J]. 中国康复医学杂志, 2017, 32(2): 146-50.
[37] Wu HD, Liu W, Wong MS. Reliability and validity of lateral curvature assessments using clinical ultrasound for the patients with scoliosis: a systematic review[J]. Eur Spine J, 2020, 29(4): 717-25.
[38] Lee TT, Jiang WW, Cheng CLK, et al. A novel method to measure the sagittal curvature in spinal deformities: the reliability and feasibility of 3-D ultrasound imaging[J]. Ultrasound Med Biol, 2019, 45(10): 2725-35.
[39] Lee TY, Yang D, Lai KK, et al. Three-dimensional ultrasonography could be a potential non-ionizing tool to evaluate vertebral rotation of subjects with adolescent idiopathic scoliosis[J]. JOR SPINE, 2023, 6(3): e1259.
[40] Hintz L, Nanziri SC, Dance S, et al. 3D volume reconstruction for pediatric scoliosis evaluation using motion-tracked ultrasound[C]// Medical Imaging 2024: Image-Guided Procedures, Robotic Interventions, and Modeling. San Diego, SPIE, 2024: 35.
[41] van de Fliert DG, Lafranca PPG, Arets A, et al. Spinal ultrasound to quantify in-brace correction before nighttime brace fabrication in adolescent idiopathic scoliosis[J]. Eur Spine J, 2025, 34(7): 2646-52.
[42] Kumar S, Awadhiya B, Ratnakumar R, et al. A review of 3D modalities used for the diagnosis of scoliosis[J]. Tomography, 2024, 10(8): 1192-204.
[43] Jiang WW, Cheng CLK, Cheung JPY, et al. Patterns of coronal curve changes in forward bending posture: a 3D ultrasound study of adolescent idiopathic scoliosis patients[J]. Eur Spine J, 2018, 27(9): 2139-47.
[44] Yang T, Jin YQ, Neogi A. Acoustic attenuation and dispersion in fatty tissues and tissue phantoms influencing ultrasound biomedical imaging[J]. ACS Omega, 2023, 8(1): 1319-30.
[45] Ungi T, Wu CO, Dance SJD, et al. Bone-enhanced 3D ultrasound: a non-ionizing alternative for pediatric scoliosis assessment[J]. Eur Spine J, 2025, 34(7): 2662-8.
[46] 张书豪, 李富丽. 青少年特发性脊柱侧凸影像学新技术研究进展[J]. 临床骨科杂志, 2022, 25(4): 595-9.
[47] 黎东升. 脊柱侧凸的三维超声诊断与可视化研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.

（编辑：郎 朗）