

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*

王 谦^{1,2,3}, 李 梦³, 柳学明⁴, 黄文生^{3△}, 何成奇^{1,2}

1. 四川大学华西医院 康复医学中心(成都 610041); 2. 康复医学四川省重点实验室(成都 610041);
3. 香港理工大学 生物医学工程学系(香港 999077);
4. 加拿大阿尔伯塔大学 外科学部 格伦罗斯康复研究中心(埃德蒙顿 T6G2E8)

【摘要】 目的 在站立位和仰卧位下,采用三维超声成像技术探索青少年特发性脊柱侧凸(adolescent idiopathic scoliosis, AIS)患者侧凸与旋转角度的变化规律。方法 2位测评者采用 SonixTABLET 三维超声成像系统,对 16 例 AIS 女性患者[平均(14.8 ± 1.7)岁]进行站立位和仰卧位下扫描。AIS 患者侧凸与旋转角度均采用椎板中心法(center of laminae, COL)进行测量。比较三维超声成像在站立位和仰卧位下测量结果的变化。采用多元线性回归法分析两种体位下三维超声测量结果变化的相关因素;应用 Pearson 相关分析评价两种体位下测量结果之间的相关性。结果 三维超声成像在站立位和仰卧位下测量脊柱侧凸角度的变化范围为 1.9°~11.7°, 顶椎旋转角度的变化范围为 0.0°~5.9°。两种体位下脊柱侧凸角度的变化与侧凸角度的大小及侧凸上端椎选择的差异有关;而顶椎旋转角度的变化与旋转角度本身的大小有关;且两种体位之间高度相关($r > 0.9$)。结论 三维超声成像能够显示出 AIS 患者在站立位和仰卧位下脊柱侧凸与旋转角度的变化规律,随着脊柱侧凸角度的增加,两种体位下侧凸角度的变化幅度均增加,椎骨旋转角度的变化情况不同。

【关键词】 脊柱侧凸 三维超声 椎骨侧凸 椎骨旋转 体位

DOI:10.13464/j.scuxbyxb.2018.05.010

Three-dimensional Ultrasound Imaging of Coronal Curvature and Vertebral Rotation Changes from Supine to Standing in Patients with Adolescent Idiopathic Scoliosis WANG Qian^{1,2,3}, LI Meng³, LOU H. M. Edmond⁴, WONG Man-sang^{3△}, HE Cheng-qi^{1,2}. 1. Center of Rehabilitation Medicine, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China; 2. Rehabilitation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610041, China; 3. Department of Biomedical Engineering, the Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China; 4. Department of Surgery, Glenrose Rehabilitation Research Centre, University of Alberta, Edmonton T6G2E8, Canada

△ Corresponding author, E-mail: m. s. wong@polyu. edu. hk

【Abstract】 **Objective** To investigate the gravitational effect on coronal curvature and vertebral rotation using 3-D ultrasound in patients with adolescent idiopathic scoliosis (AIS). **Methods** Sixteen female patients with AIS were recruited and examined using a 3-D ultrasound unit incorporated with SonixGPS system (Ultrasonix Medical Corporation, Canada). Ultrasound scanning was performed continuously along the coronal plane from C7 to S1, with a standing and a supine position, respectively. Coronal curvature and vertebral rotation were measured using the center of laminae (COL) method. Multivariate linear regression models were established to determine factors associated with changes of lateral curvature and vertebral rotation in different posture positions. The correlations of measurements between standing and supine were tested using Pearson correlation analyses. **Results** Changes of coronal curvature and vertebral rotation from a supine to a standing posture were within 1.9°-11.7° and 0.0°-5.9°, respectively. The changes increased with the severity of AIS. The 3-D ultrasound measurements of lateral curvature and vertebral rotation were highly correlated. **Conclusion** 3-D ultrasound can reveal changes of coronal curvature and vertebral rotation from a supine to a standing posture in patients with AIS, which increase with the severity of AIS. Further studies in large samples are warranted.

【Key words】 Adolescent idiopathic scoliosis 3-D ultrasound Lateral curvature Vertebral rotation Postures

* 四川省卫计委普及应用项目(No. 18PJ508)资助

△ 通信作者, E-mail: m. s. wong@polyu. edu. hk

青少年特发性脊柱侧凸(adolescent idiopathic scoliosis, AIS)是发生于 10~18 岁青少年的一种脊柱三维畸形,即脊柱在冠状面和矢状面上的侧凸畸形,以及在水平面上的旋转畸形^[1-2]。影像学检查是 AIS 诊断与评估的重要方法,能反映脊柱侧凸的形态结构,评估脊柱侧凸与旋转的角度,预测病情进展的可能性^[3]。目前,站立位和仰卧位是 AIS 影像学检查的常用体位,如放射性 X 线检查通常在站立位下进行,而计算机断层扫描(CT)与核磁共振(MRI)检查在仰卧位下完成。研究报道,重力作用使 AIS 在站立位和仰卧位下脊柱侧凸和旋转角度发生相应的变化^[4-5];而且,两种体位下脊柱侧凸角度的变化,可用于间接评价脊柱柔韧性的大小,预测手术与康复治疗的效果^[6]。因此,掌握站立位和仰卧位下脊柱侧凸和旋转角度的变化规律,对于应用不同影像学检查结果综合评估 AIS 具有重要意义^[6-8]。

近年来,应用三维超声成像技术评估和测量 AIS 已受到广泛关注,来自美国、加拿大、香港、荷兰以及日本等地的学者对此进行了深入的研究^[9-14]。三维超声成像技术是一种无辐射的评估 AIS 患者脊柱侧凸与旋转角度的方法,其评估结果的信度与效度较高^[9-11, 14-18]。因此,本研究采用三维超声成像技术,探索 AIS 在站立位和仰卧位下侧凸与旋转角度的变化规律,并分析与上述变化相关的因素,以及在两种体位下三维超声测量结果的相关性。

1 对象与方法

1.1 研究对象

纳入的 AIS 患者均为女性,年龄 10~18 岁, Cobb 角 $10^{\circ}\sim 80^{\circ}$,均无脊柱及心胸外科手术史。临床试验获香港理工大学人体试验伦理委员会和香港中文大学-新界东医院联网临床研究伦理委员会批准。所有受试者于试验前被告知试验相关信息,并签署知情同意书。由于受试者为青少年女性,为保护受试者的隐私,整个数据收集过程均有一名女性研究人员参与,且受试者家属或监护人可以在场。

1.2 三维超声成像系统

三维超声成像系统由 SonixTABLET (Analogic, Massachusetts, USA)、凸式超声探头(C5-2/60)以及内置电磁跟踪感受器、SonixGPS 定位装置、driveBAY 三维空间导航装置(Ascension Ltd., USA)组成。三维超声成像参数:频率 2.5 MHz,透射深度 8 cm,增益值 10% (图 1A、1B)。

1.3 方法

1.3.1 测评者 本研究中,共 2 位测评者参与了三维超声的扫描和测量。测评者 1 是一名助理研究员,从事脊柱侧凸研究工作,具有 5 年的超声扫描和测量经验;测评者 2 是一名康复医生,具有 2 年的超声扫描和测量经验。临床试验前,2 位测评者都经过系统培训。在 10 位志愿者仰卧位和站立位下,练习三维超声的全脊柱扫描及三维超声图像重建与测量。

1.3.2 三维超声扫描 受试者着特定的超声检查服,检查服背部中间留有宽约 8 cm 的间隙,适合超声探头对全脊柱进行扫描。三维超声扫描前,测评者在受试者背部触诊,确定 C7 至 S1 椎体的棘突位置并标记,勾勒出脊柱侧凸的轮廓曲线(图 1A)。

1.3.2.1 站立位三维超声扫描 三维超声扫描时,受试者自然站立,两眼平视前方,双脚与双肩同宽;超声探头需涂抹适量的耦合剂,以隔绝探头与体表的空气,保证探头与体表皮肤的良好接触。测评者手持超声探头,紧贴受试者背部皮肤,从 C7 椎体开始,沿脊柱侧凸曲线匀速缓慢的移动超声探头,至 S1 椎体结束(图 1A)。

1.3.2.2 仰卧位三维超声扫描^[15, 18] 为了实现仰卧位下全脊柱的超声扫描,我们设计了一个超声扫描床(图 1B)。在扫描床的中央有一个矩形槽(长 60 cm×宽 12 cm),在超声扫描中能够充分暴露 AIS 患者的全脊柱范围。受试者平躺在超声扫描床上,测评者采用水平仪评估受试者的双侧髂前上棘(anterior superior iliac spines, ASISs)是否在同一水平,以防止躯干和骨盆的移动影响测量结果,以及为后续的三维超声测量设定水平参考线(双侧髂前上棘的连线);在扫描过程中,测评者可以参照位于扫描床下方的镜子,依据其反射的图像,判断超声探头的位置(图 1B)。

一次完整的全脊柱三维超声扫描需要 1 min 左右,在站立位和仰卧位下,每一位测评者需要连续进行 3 次全脊柱超声扫描。三维超声扫描后,所有超声图像以及 SonixGPS 收集的空间三维参数将一起导入 MIAS 软件中进行超声图像的三维重建及后续测量(图 1C)。

1.3.3 三维超声测量

1.3.3.1 AIS 脊柱侧凸角度测量^[15] 三维超声采用椎板中心法(center of laminae, COL)测量 AIS 脊柱在冠状面上的侧凸角度(图 2A)。COL 方法定义:侧凸弧度上端椎的两侧椎板中心连线与下端

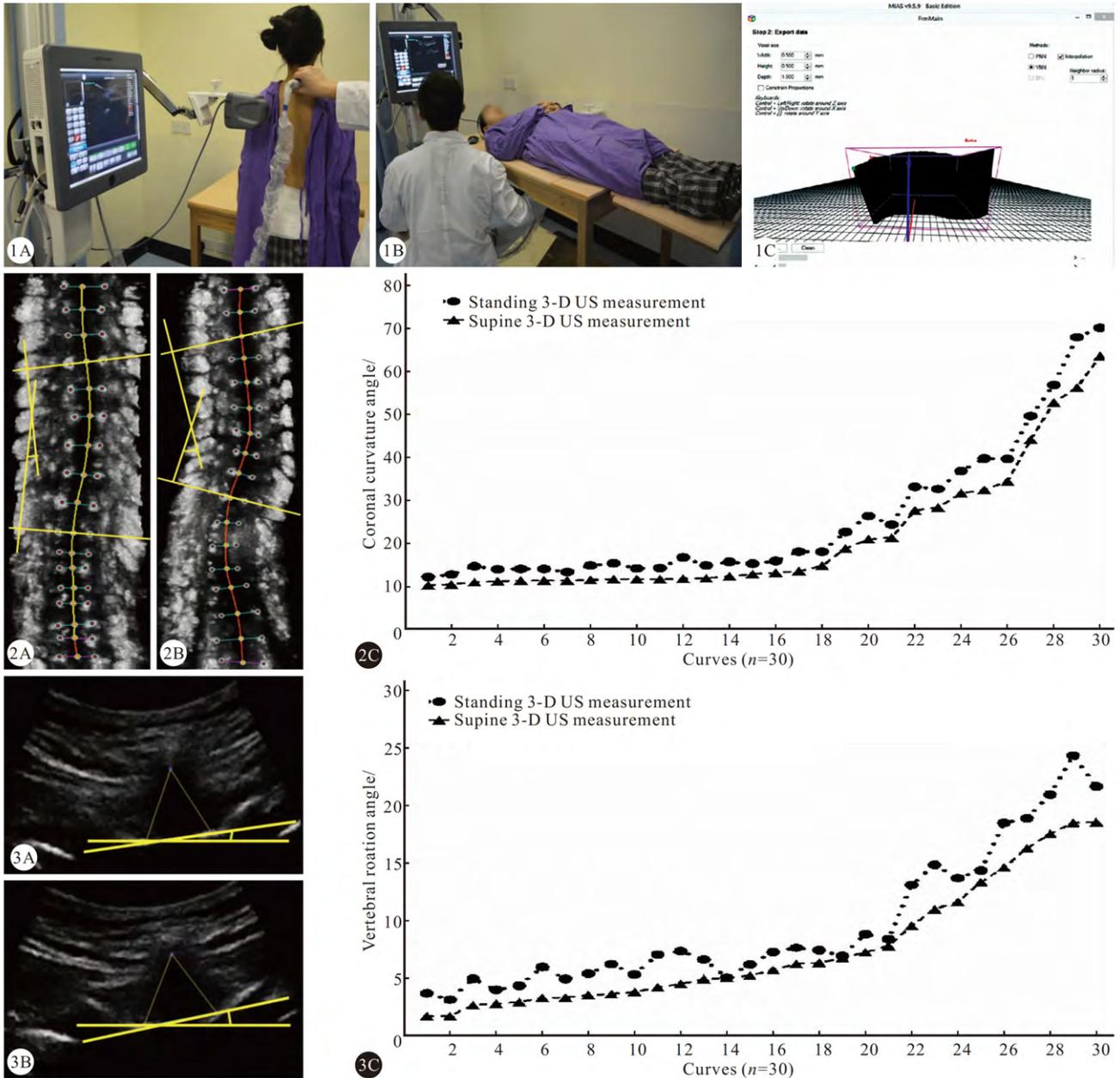


图 1 三维超声成像扫描与图像重建

图 2 三维超声测量 AIS 患者在站立位和仰卧位下脊柱侧凸角度的结果比较

图 3 三维超

声测量 AIS 患者在站立位和仰卧位下顶锥旋转角度的结果比较
Fig 1 3-D ultrasound scans and images reconstruction

Fig 2 Comparison of coronal curvature measurements using 3-D ultrasound between standing and supine positions in the patients with AIS
Fig 3 Comparison of vertebral rotation measurements using 3-D ultrasound between standing and supine positions in the patients with AIS

1A: 3-D ultrasound scan in a standing position; 1B: 3-D ultrasound scan in a supine position; 1C: Self-developed medical image analysis software (MIAS) for 3-D reconstruction of ultrasound images; 2A, 3A: In a supine position; 2B, 3B: In a standing position; 2C: Graph of 3-D ultrasound measurements of coronal curvature angle in patients with AIS in a standing and a supine position; 3C: Graph of 3-D ultrasound measurements of vertebral rotation angle in patients with AIS in a standing and a supine positions

椎的两侧椎板中心连线之间所形成的夹角,被认为是脊柱侧凸角度(图 2A,2B)。

1.3.3.2 AIS 顶锥旋转角度测量^[18] 三维超声采用 COL 测量 AIS 顶椎在水平面上的旋转角度, COL 方法定义:在超声图像水平面上,两侧椎板中

心连线与水平参考线之间的夹角,被认为是顶锥旋转角度 (apical vertebral rotation, AVR) (图 3A, 3B)。一般情况下,AVR 最大,具有临床诊断意义。

1.3.4 统计学方法 对测评者 3 次测量结果取均值进行比较,采用多元线性回归法分析两种体位下

三维超声测量结果差值($\Delta_{\text{站立位-仰卧位}}$)的相关因素。应用 Pearson 相关分析两种体位下三维超声测量结果之间的相关性,构建回归方程。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 纳入 AIS 病例特征

2014 年 1 月至 2015 年 11 月在香港中文大学-威尔士亲王医院共收集 16 例 AIS 女性患者,平均(14.8 ± 1.7)岁,脊柱侧凸角度范围为 $10.2^\circ \sim 68.2^\circ$ ($21.7^\circ \pm 15.9^\circ$)。本研究中 AIS 弯和代偿性弯共计 30 个,其中主胸弯 3 例,主腰弯 1 例,胸腰双主弯 10 例,代偿性三弯 2 例。

2.2 不同体位下三维超声测量角度的变化

2.2.1 脊柱侧凸角度的变化 三维超声测量 AIS 患者在站立位和仰卧位下脊柱侧凸角度的结果如图 2C 所示。对于全部侧凸弧度 ($n=30$):在 AIS 患者站立位下,三维超声测量结果范围为 $12.0^\circ \sim 69.9^\circ$;在仰卧位下测量结果范围为 $10.1^\circ \sim 63.3^\circ$ 。在两种体位下三维超声测量脊柱侧凸角度变化的平均值为 $4.1^\circ \pm 2.0^\circ$,变化范围为 $1.9^\circ \sim 11.7^\circ$ 。随着脊柱侧凸角度的增加,两种体位下侧凸角度的变化幅度也在增加(表 1)。

表 1 三维超声测量 AIS 患者在站立位和仰卧位下脊柱侧凸角度的变化

Table 1 Coronal curvature changes in 3-D ultrasound (COL method) measurements between standing and supine ($\Delta_{\text{standing-supine}}$) positions in patients with AIS

Coronal curvature (supine)	Curve/case	$\Delta_{\text{standing-supine}}$	
		$\bar{x} \pm s$	Range
$10.0^\circ \sim 20.0^\circ$	19	$3.0^\circ \pm 0.8^\circ$	$1.9^\circ \sim 4.9^\circ$
$>20.0^\circ \sim 40.0^\circ$	7	$5.1^\circ \pm 1.3^\circ$	$3.0^\circ \sim 7.3^\circ$
$>40.0^\circ$	4	$7.0^\circ \pm 3.3^\circ$	$4.1^\circ \sim 11.7^\circ$
Total	30	$4.1^\circ \pm 2.0^\circ$	$1.9^\circ \sim 11.7^\circ$

COL: Center of laminae

2.2.2 顶锥旋转角度的变化 三维超声测量 AIS 患者在站立位和仰卧位下顶锥旋转角度的结果如图

表 3 多元回归分析站立位和仰卧位下脊柱侧凸角度变化的相关因素

Table 3 Multiple linear regression on coronal curvatures changes between supine and standing positions

Variable	B	b	SE	t	P
Coronal curvature angle (supine)	-7.54	-1.00	0.01	-144.25	0.00
Coronal curvature angle (standing)	8.32	1.00	0.01	162.66	0.00
Vertebral rotation angle (supine)	-0.01	0.00	0.00	-0.86	0.40
Vertebral rotation angle (standing)	0.00	0.00	0.00	0.47	0.64
Variations in selected UEV	-0.01	-0.03	0.01	-2.30	0.03
Variations in selected LEV	0.00	-0.01	0.01	-0.59	0.56

UEV: Upper-end vertebra; LEV: Lower-end vertebra; B: Standardized regression coefficient; b: Partial regression coefficient; SE: Standard error

3C 所示。对于全部侧凸 ($n=30$) 弧度:在 AIS 患者站立位下,三维超声测量结果为 $3.1^\circ \sim 24.3^\circ$;在仰卧位下测量结果为 $1.7^\circ \sim 18.7^\circ$ 。在两种体位下三维超声测量顶锥旋转角度变化的平均值为 $2.1^\circ \pm 1.2^\circ$,变化范围为 $0.0^\circ \sim 5.9^\circ$ (表 2)。其中,当顶锥旋转角度 $> 10.0^\circ$ 时,两种体位下三维超声测量结果之间的变化最大。

表 2 三维超声测量 AIS 患者在站立位和仰卧位下顶锥旋转角度的变化

Table 2 Vertebral rotation changes in 3-D ultrasound (COL method) measurements between standing and supine ($\Delta_{\text{standing-supine}}$) positions in patients with AIS

Vertebral rotation (supine)	Curve/case	$\Delta_{\text{standing-supine}}$	
		$\bar{x} \pm s$	Range
$0.0^\circ \sim 5.0^\circ$	13	$2.0^\circ \pm 0.6^\circ$	$1.2^\circ \sim 2.9^\circ$
$>5.0^\circ \sim 10.0^\circ$	9	$1.2^\circ \pm 1.0^\circ$	$0.0^\circ \sim 3.5^\circ$
$>10.0^\circ$	8	$3.2^\circ \pm 1.4^\circ$	$1.0^\circ \sim 5.9^\circ$
Total	30	$2.1^\circ \pm 1.2^\circ$	$0.0^\circ \sim 5.9^\circ$

COL: Center of laminae

2.3 不同体位下三维超声测量变化的相关因素

2.3.1 脊柱侧凸角度测量变化的相关因素 多元回归分析结果表明(表 3),三维超声测量 AIS 患者在站立位和仰卧位下脊柱侧凸角度变化可能与侧凸角度大小(仰卧位/站立位)以及侧凸上端椎选择的差异有关($P < 0.05$)。

2.3.2 顶锥旋转角度测量变化的相关因素 多元回归分析结果表明(表 4),三维超声测量 AIS 患者在站立/仰卧位下顶锥旋转角度的变化可能与旋转角度大小(仰卧位/站立位)有关($P < 0.05$)。

2.4 不同体位下三维超声测量结果的相关性

2.4.1 脊柱侧凸角度测量结果之间的相关性 Pearson 相关统计结果显示,三维超声测量 AIS 患者在站立位和仰卧位下脊柱侧凸角度之间相关性较高($r=0.997$)。回归方程 $y=1.1008x+1.9049$,决定系数(R^2)= 0.9939 ,其中 x 代表仰卧位下三维超声测量结果, y 代表站立位下三维超声测量结果,根据 AIS 患者在仰卧位下侧凸角度的大小能够推

测其在站立位下侧凸角度值(图 4)。

2.4.2 顶锥旋转角度测量结果之间的相关性 三维超声测量 AIS 患者站立位和仰卧位顶锥旋转角度之间相关性较高 ($r = 0.985$)。回归方程 $y =$

$1.1318x + 1.1039, R^2 = 0.9707$, 其中 x 代表仰卧位下三维超声测量结果, y 代表站立位下三维超声测量结果, 根据 AIS 患者在仰卧位下顶锥旋转角度的大小能够推测其在站立位下顶锥旋转角度值(图 5)。

表 4 多元回归分析站立位和仰卧位下顶锥旋转角度变化的相关因素

Table 4 Multiple linear regression on vertebral rotation changes between supine and standing positions

Variable	B	b	SE	t	P
Vertebral rotation angle (supine)	-4.22	-1.00	0.01	-185.43	0.00
Vertebral rotation angle (standing)	4.86	1.00	0.01	203.92	0.00
Coronal curvature angle (supine)	-0.02	0.00	0.00	-0.46	0.65
Coronal curvature angle (standing)	0.02	0.00	0.00	0.30	0.76
Variation in selected apical vertebra	0.00	-0.01	0.01	-0.81	0.42

B: Standardized partial regression coefficient; b: Partial regression coefficient; SE: Standard error

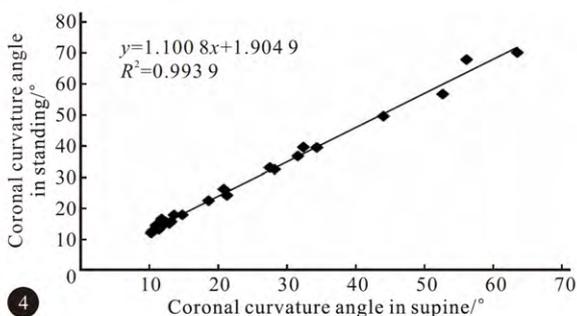


图 4 三维超声测量 AIS 患者在站立位和仰卧位下脊柱侧凸角度的相关性

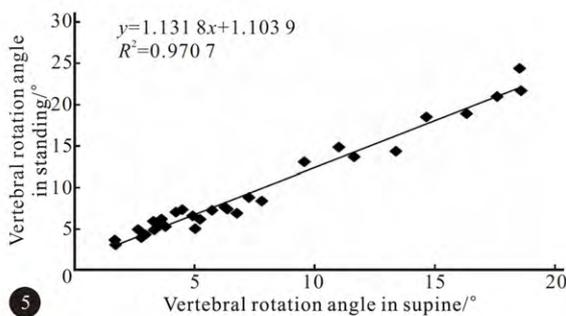


图 5 三维超声测量 AIS 患者在站立位和仰卧位下顶锥旋转角度的相关性

Fig 4 Correlations between coronal curvature measurements in a supine and a standing position in patients with AIS

Fig 5 Correlations between vertebral rotation measurements in a supine and a standing position in patients with AIS

3 讨论

三维超声成像技术是一种无辐射的评估 AIS 的影像学方法。根据超声成像的反射原理,学者们提出 COL 在三维超声图像上测量 AIS 的脊柱侧凸与旋转角度^[16-17, 19]。研究报道, COL 方法评估 AIS 侧凸角度的测评者内/间的组内相关系数 (intra-class correlation coefficient, ICC) 值均大于 0.8, 测量误差值小于 2.8°^[9, 15]; 测量椎骨旋转角度的测评者内/间相关系数 ICC 值均大于 0.9, 测量误差值小于 3.0°^[18]。三维超声成像技术评估和测量 AIS 的研究已成为该领域的创新点。

不同体位下脊柱侧凸和旋转角度的变化规律, 对于理解不同影像学检查结果、综合评估 AIS 具有重要意义^[6-8]。本研究探索三维超声成像技术评估 AIS 患者在站立位和仰卧位下侧凸及旋转角度的变化规律。结果表明, 脊柱侧凸角度的变化范围为 1.9°~11.7°, 平均值为 4.1°±2.0°; 顶锥旋转角度的变化范围为 0.0°~5.9°, 平均值 2.1°±1.2°。随着脊柱侧凸角度的增加, 两种体位下侧凸角度的变化幅度也在增加。然而, 当顶锥旋转角度在 0.0°~

5.0°范围时, 测量差值较顶锥旋转角度在 >5.0°~10.0°范围时大, 可能是由于椎骨旋转角度较小时, 三维超声测量结果更易受到体位变化的影响。

上述研究结果与以往研究结果相似, X 线检查显示 AIS 患者在站立位和仰卧位下脊柱侧凸角度的变化范围为 6.1°~9.0°。然而, YAZICI 等^[5]和 KEENEN 等^[6]研究中, AIS 患者在站立位下接受 CT 扫描, 仰卧位下进行 X 线检查, 两种体位下 AIS 患者侧凸角度的变化范围为 11.4°~16.3°。上述测量结果与本研究结果不一致, 不同影像学检查方法的应用可能是其主要原因之一。因此, 采用同一种影像学方法, 如 X 线或三维超声成像技术, 可能会更加准确的反映出不同体位下 AIS 侧凸与旋转角度的变化规律。

在此基础上, 本研究进一步探索两种体位下 AIS 侧凸与旋转角度变化的相关因素。研究结果表明, 三维超声测量 AIS 患者在站立位和仰卧位下脊柱侧凸角度的变化可能与侧凸角度本身的大小以及侧凸上端椎选择的差异有关; 而顶锥旋转角度的变化可能与顶锥旋转角度本身的大小有关。从生物力学的角度分析, 脊柱侧凸角度越大, 重力作用的力矩

越大;且椎骨旋转角度与脊柱侧凸角度在大多数情况下呈正相关^[20];因此,AIS 患者自身的侧凸与旋转角度大小,在一定程度上决定了不同体位下侧凸及旋转角度的变化。值得注意的是,本研究还发现 AIS 侧凸角度的变化还可能与站立位和仰卧位下侧凸上端椎选择的差异有关。然而,这是与之前的研究报道不一致的。KEENAN 等^[6]报道了站立位和仰卧位下端椎选择的差异并不是影响脊柱侧凸 Cobb 角变化的主要因素。两者研究结果不一致的主要原因在于所选用的影像学检查方法及脊柱侧凸角度的测量方法不一致;三维超声图像上端椎选择的方法与 X 线图像上不同;三维超声成像采用 COL 方法测量脊柱侧凸角度,而 X 线选用 Cobb 方法。上述研究结果提示,不同体位下端椎选择的差异仍是综合评估和解释 AIS 患者在站立位和仰卧位下脊柱侧凸角度变化的主要因素。

站立位和仰卧位是 AIS 患者进行影像学检查的常用体位。基于 Pearson 相关分析,三维超声在两种体位下测量结果之间相关性高,且根据仰卧位下三维超声测量侧凸与旋转角度的结果,能够推测出站立位下 AIS 患者的侧凸与旋转角度。尽管,本研究收集的有效 AIS 患者侧凸角度从 10.2° 至 68.2°,但是重度脊柱侧凸的患者例数较少,且总体例数仍较少。因此,不同体位下 AIS 患者脊柱侧凸与旋转角度的变化规律有待在更大样本量的临床试验中证明。

综上所述,本研究采用三维超声成像技术探索 AIS 患者在站立位和仰卧位下脊柱侧凸与旋转角度的变化规律及相关因素,为不同体位影像学检查方法综合评估 AIS 三维脊柱畸形提供理论基础。本研究结果为三维超声成像技术在 AIS 临床诊断和评估中的应用提供理论依据。不同体位下 AIS 三维脊柱畸形特征的变化规律有待于进一步研究。

参 考 文 献

- [1] WEINSTEIN SL, DOLAN LA, CHENG JC, *et al.* Adolescent idiopathic scoliosis. *Lancet*, 2008, 371 (9623): 1527-1537.
- [2] HRESKO MT. Idiopathic scoliosis in adolescents. *New Engl J Med*, 2013, 368(9): 834-841.
- [3] JADA A, MACKEL CE, HWANG SW, *et al.* Evaluation and management of adolescent idiopathic scoliosis: a review. *Neurosurg Focus*, 2017, 43 (4): E2 [2018-01-15]. <https://thejns.org/doi/abs/10.3171/2017.7.FOCUS17297>.
- [4] SHI B, MAO S, WANG Z, *et al.* How does the supine MRI correlate with standing X-ray of different curve severity in adolescent idiopathic scoliosis? *Spine (Phila Pa 1976)*, 2015, 40(15): 1206-1212.
- [5] YAZICI M, ACAROGLU ER, ALANAY A, *et al.* Measurement of vertebral rotation in standing versus supine position in adolescent idiopathic scoliosis. *J Pediatr Orthoped*, 2001, 21(2): 252-256.
- [6] KEENAN BE, IZATT MT, ASKIN GN, *et al.* Supine to standing Cobb angle change in idiopathic scoliosis: the effect of endplate pre-selection. *Scoliosis*, 2014, 9(1): 16 [2018-01-17]. <http://www.scoliosisjournal.com/content/9/1/16>. doi: 10.1186/1748-7161-9-16.
- [7] OHRT-NISSEN S, HALLAGER DW, GEHRCHEN M, *et al.* Supine lateral bending radiographs predict the initial in-brace correction of the providence brace in patients with Adolescent Idiopathic Scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2016, 41(9): 798-802.
- [8] LITTLE JP, PEARCY MJ, IZATT MT, *et al.* Understanding how axial loads on the spine influence segmental biomechanics for idiopathic scoliosis patients: a magnetic resonance imaging study. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2016, 32: 220-228 [2018-01-15]. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2015.11.007>.
- [9] WANG Q, LI M, LOU EH, *et al.* Reliability and validity study of clinical ultrasound imaging on lateral curvature of adolescent idiopathic scoliosis. *PLoS One*, 2015, 10 (8): e0135264 [2018-01-15]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135264>.
- [10] YOUNG M, HILL DL, ZHENG R, *et al.* Reliability and accuracy of ultrasound measurements with and without the aid of previous radiographs in adolescent idiopathic scoliosis (AIS). *Eur Spine J*, 2015, 24(7): 1427-1433.
- [11] ZHENG R, CHAN AC, CHEN W, *et al.* Intra- and inter-rater reliability of coronal curvature measurement for adolescent idiopathic scoliosis using ultrasonic imaging method—a pilot study. *Spine Deformity*, 2015, 3(2): 151-158.
- [12] MENG L, WONG M, KEITH D, *et al.* Time-dependent response of scoliotic curvature to orthotic intervention: when should a radiograph be taken after putting on or taking off a spinal orthosis? *Spine*, 2014, 39(17): 1408-1416.
- [13] UNGI T, KING F, KEMPSTON M, *et al.* Spinal curvature measurement by tracked ultrasound snapshots. *Ultrasound Med Biol*, 2014, 40(2): 447-454.
- [14] 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. *Scoliosis Spinal Disord*, 2016, 11: 13 [2018-01-15]. <https://scoliosisjournal.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/s13013-016-0074-y>. doi: 10.1186/s13013-016-0074-y.
- [15] 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. *中国康复医学杂志*, 2017, 32(2): 146-150.
- [16] CHEN W, LE LH, LOU EH. Reliability of the axial vertebral rotation measurements of adolescent idiopathic scoliosis using the center of lamina method on ultrasound images; *in vitro* and *in vivo* study. *Eur Spine J*, 2016, 25 (10): 3265-3273.
- [17] VO QN, LOU EH, LE LH. Measurement of axial vertebral rotation using three-dimensional ultrasound images. *Scoliosis*, 2015, 10 (Suppl 2): S7 [2018-01-15]. <https://doi.org/10.1186/1748-7161-10-S2-S7>.
- [18] 王 谦, 李 梦, 柳学明, 等. 三维超声成像技术测量青少年特发性脊柱侧凸患者顶椎旋转角度的信度与效度分析. *四川大学学报(医学版)*, 2018, 49(3): 436-441.
- [19] CHEN W, LOU EH, ZHANG PQ, *et al.* Reliability of assessing the coronal curvature of children with scoliosis by using ultrasound images. *J Child Orthop*, 2013, 7(6): 521-529.
- [20] KOTWICKI T. Evaluation of scoliosis today: examination, X-rays and beyond. *Disabil Rehabil*, 2008, 30(10): 742-751. (2018-03-11 收稿, 2018-06-30 修回)

编辑 吕 熙