

# 脊柱侧凸 X 线成像评估的研究进展



王谦<sup>1,2</sup>, 黄文生<sup>3</sup>, 何红晨<sup>1,2</sup>, 帅桃<sup>4</sup>, 何成奇<sup>1,2</sup>

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部(香港 999077)
4. 四川大学华西医院放射科(成都 610041)

**【摘要】** 脊柱侧凸是一种复杂的脊柱三维畸形。X 线成像是脊柱侧凸诊断与评估的重要方法,能够直接测量或间接反映冠状面、水平面和矢状面的脊柱三维畸形特征,预测侧凸进展及治疗效果。三维立体 X 线成像技术的应用,推动了脊柱侧凸三维影像学评估的发展。该文对脊柱侧凸 X 线成像的评估方法、测量信度与效度、三维立体 X 线成像技术进行综述,总结 X 线成像评估脊柱侧凸的规律,为脊柱侧凸诊断与评估提供重要依据。

**【关键词】** 脊柱侧凸; X 线成像; 评估; 文献综述

## The research progress of radiographic assessments for patients with scoliosis

WANG Qian<sup>1,2</sup>, WONG Mansang<sup>3</sup>, HE Hongchen<sup>1,2</sup>, SHUAI Tao<sup>4</sup>, HE Chengqi<sup>1,2</sup>

1. Rehabilitation Medicine Center, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610041, P. R. China
  2. Rehabilitation Medicine Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610041, P. R. China
  3. Department of Biomedical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, P. R. China
  4. Department of Radiology, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610041, P. R. China
- Corresponding author: HE Chengqi, Email: hxkfhcq@126.com

**【Abstract】** Scoliosis is a complex three-dimensional spinal deformity, characterized by lateral curvature and vertebral rotation. Radiology plays important roles in the assessments of lateral curvature and vertebral rotation of the patients with scoliosis, as well as the prediction of progression and treatment outcomes of scoliosis. The reliable and validity of radiological assessments have been proved in the coronal, transverse, and sagittal planes of scoliotic spine. With the application of the stereoradiography, three dimensional nature of the scoliosis has been disclosed. This review aims to summarize the radiological methods for the assessments of scoliotic spine, the reliability and validity of each method, as well as the stereoradiography, providing the basis for accurate diagnosis and assessments for the patients with scoliosis.

**【Key words】** Scoliosis; Radiograph; Assessment; Review

脊柱侧凸是一种复杂的脊柱三维畸形,表现为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<sup>[1]</sup>。目前,X 线成像仍是脊柱侧凸诊断与评估的最重要方法,能够实现全脊柱在站立位下成像、简单高效的侧凸畸形测量、脊柱侧凸与旋转的评估、病情进展及治疗效果的预测。借助于计算机辅助成像及相关软件开发,三维立体成像技术实现了脊柱侧凸 X 线影像从二维平面发展到三维立体图像,更加全面反映出脊柱侧凸的畸形特征<sup>[2]</sup>。因此,本文对脊柱侧凸 X 线成像评估方法、

测量信度与效度、三维立体 X 线成像技术进行总结综述,为脊柱侧凸诊断与评估提供重要依据。

## 1 X 线成像评估方法

全脊柱正侧位 X 线成像是脊柱侧凸诊断与评估的最常用方法。在正位 X 线片上,评测者可确定脊柱侧凸的关键椎及主凸部位,测量脊柱侧凸与旋转角度,评价脊柱柔韧性;在侧位 X 线片上,评测者可观察胸椎前凸及腰椎后凸畸形特征,评测骨盆倾斜和稳定性。此外,在骨盆正位 X 线片上,髂骨翼骨骺的骨化程度可预测脊柱侧凸进展可能性的大小。

### 1.1 脊柱侧凸角度测量

在正位 X 线片上,脊柱侧凸角度的测量方法通

DOI: 10.7507/1002-0179.201710087

基金项目:四川省卫生和计划生育委员会普及应用项目(18PJ508)

通信作者:何成奇,Email:hxkfhcq@126.com

常采用 Cobb 方法,即上端椎的上终板平行线和下端椎的下终板平行线之间的夹角为脊柱侧凸角,称为 Cobb 角。此外, Cobb 方法操作简便,结果可重复性高,适用于测量较大角度的脊柱侧凸。因此,国际脊柱侧凸研究学会规定 Cobb 方法为测量脊柱侧凸的标准:当 Cobb 角度 $\geq 10^\circ$ 时,被认为是脊柱侧凸;连续测量 Cobb 角之间差异 $< 5^\circ$ ,被认为是测量本身误差。但是, Cobb 方法是测量脊柱侧凸角度的简化方法,反映的是上、下端椎的倾斜程度。因此,学者们一直在探索和研究更加准确的测量方法,如 Ferguson 方法测量上、下端椎的中点分别与顶椎的中点连接所形成的夹角; Centroid 方法测量上、下 4 个椎体的连线所形成的夹角。另外,学者们通过研究 Cobb 方法测量信度与误差,掌握其评估脊柱侧凸的规律<sup>[3]</sup>。

表 1 和表 2 分别总结了 Cobb 方法评估脊柱侧凸角度的信度与测量误差。结果表明, Cobb 方法测量脊柱侧凸角度的评测者内/间信度较高,其组内相关系数 (intra-class correlation coefficient, ICC) 值均 $> 0.78$  (表 1)<sup>[4-9]</sup>。Cobb 方法的测量误差较小:评测者内测量误差的平均绝对差值 (mean absolute

difference, MAD) 为  $2.2 \sim 3.0^\circ$ , 标准差 (standard deviation, SD) 为  $2.2 \sim 4.1^\circ$ , 测量标准误 (standard error of measurement, SEM) 为  $2.0^\circ$ ; 评测者间测量误差的 MAD 值为  $3.6 \sim 3.9^\circ$ , SD 值为  $2.2 \sim 4.6^\circ$ , SEM 值为  $3.2^\circ$  (表 2)<sup>[4, 7-9]</sup>。测量误差主要来源于端椎选择的差异、评测者经验及患者不同体位等因素<sup>[10]</sup>。

目前,数字化图像处理技术应用于临床实践。脊柱侧凸 X 线成像后,评测者在计算机界面上选择关键椎,相关软件自动测量 Cobb 角的大小<sup>[11]</sup>。研究表明,对比评测者测量 Cobb 角大小,计算机辅助测量 Cobb 角的信度更高,其评测者内的 ICC 值 $> 0.87$ ,评测者间的 ICC 值 $> 0.94$  (表 3)<sup>[5, 7-9, 12-14]</sup>。评测者内测量的 MAD 值为  $1.2 \sim 3.4^\circ$ , SD 值为  $1.2 \sim 6.5^\circ$ , SEM 值为  $0.7 \sim 3.2^\circ$ ; 评测者间测量的 MAD 值为  $1.2 \sim 3.7^\circ$ , SD 值为  $1.8 \sim 4.9^\circ$ , SEM 值为  $1.2 \sim 3.7^\circ$  (表 4)<sup>[7-9, 12-14]</sup>。

### 1.2 脊柱旋转角度

脊柱旋转角度是脊柱侧凸的另一项重要评估参数,能够反映出肋骨隆起及胸廓畸形的程度,评价脊柱侧凸的进展风险与治疗效果<sup>[15]</sup>。在正位 X 线片上,根据棘突、椎弓根投射在椎体上的位置和比

表 1 Cobb 方法测量脊柱侧凸角度的信度

纳入研究	受试者例数	侧凸角度 ( $^\circ$ )	评测者例数	次数	评测者内 ICC	评测者间 ICC
De Carvalho 等 2007 <sup>[4]</sup>	40	20 ~ 45	8	2	0.98	0.94
Gstoettner 等 2007 <sup>[5]</sup>	48	20 ~ 130	6	3	0.97	0.97
Gupta 等 2007 <sup>[6]</sup>	48	10 ~ 40	7	—	0.79 ~ 0.99	0.99
Allen 等 2008 <sup>[7]</sup>	22	20 ~ 50	3	—	0.95	0.94
Mok 等 2008 <sup>[8]</sup>	20	32 ~ 80	4	—	0.96	0.93
Tanure 等 2010 <sup>[9]</sup>	49	12 ~ 80	3	3	0.96	0.95

—: 未提及

表 2 Cobb 方法测量脊柱侧凸角度的测量误差

纳入研究	受试者例数	侧凸角度 ( $^\circ$ )	评测者例数	次数	评测者内测量误差 ( $^\circ$ )			评测者间测量误差 ( $^\circ$ )		
					MAD	SD	SEM	MAD	SD	SEM
De Carvalho 等 2007 <sup>[4]</sup>	40	20 ~ 45	8	2	2.2	2.2	—	3.4	3.4	—
Allen 等 2008 <sup>[7]</sup>	22	20 ~ 50	3	—	—	—	2.0	—	—	3.2
Mok 等 2008 <sup>[8]</sup>	20	32 ~ 80	4	—	—	4.1	—	—	4.6	—
Tanure 等 2010 <sup>[9]</sup>	49	12 ~ 80	3	3	3.0	2.4	—	3.9	3.5	—

—: 未提及

表 3 计算机辅助测量脊柱侧凸 Cobb 角的信度研究

纳入研究	受试者例数)	侧凸角度 ( $^\circ$ )	评测者例数	次数	评测者内 ICC	评测者间 ICC
Gstoettner 等 2007 <sup>[5]</sup>	48	20 ~ 130	6	3	0.96	0.93
Allen 等 2008 <sup>[7]</sup>	22	20 ~ 50	3	—	0.935	0.91
Mok 等 2008 <sup>[8]</sup>	20	32 ~ 80	4	—	0.87	0.96
Tanure 等 2010 <sup>[9]</sup>	49	12 ~ 80	3	3	0.97	0.96
Zhang 等 2010 <sup>[12]</sup>	70	$< 90$	3	2	0.994	0.985
Aubin 等 2011 <sup>[13]</sup>	32	10 ~ 88	3	2	0.95	0.94
Chan 等 2014 <sup>[14]</sup>	60	10 ~ 44	3	2	0.98	0.94

—: 未提及

表 4 计算机辅助测量脊柱侧凸 Cobb 角的测量误差

纳入研究	受试者例数	侧凸角度 (°)	评测者例数	次数	评测者内测量误差 (°)			评测者间测量误差 (°)		
					MAD	SD	SEM	MAD	SD	SEM
Allen 等 2008 <sup>[7]</sup>	22	20 ~ 50	3	—	—	—	2.0	—	—	2.4
Mok 等 2008 <sup>[8]</sup>	20	32 ~ 80	4	—	—	6.45	—	—	3.82	—
Tanure 等 2010 <sup>[9]</sup>	49	12 ~ 80	3	3	2.79	2.23	—	3.61	3.18	—
Zhang 等 2010 <sup>[12]</sup>	70	<90	3	2	1.4	1.2	—	2.2	1.8	—
Aubin 等 2011 <sup>[13]</sup>	32	10 ~ 88	3	2	—	3.5	—	—	4.9	—
Chan 等 2014 <sup>[14]</sup>	60	10 ~ 44	3	2	1.2	1.3	1.26	2.2	1.9	2.06

—: 未提及

例粗略估算脊柱旋转角度, 如 Nash-Moe 方法, 其测量信度 ICC 值为 0.56 ~ 0.73。在此基础上, Perdriolle 方法采用精确度为 5° 的特制量角器评估脊柱旋转角度的大小, 该方法测量信度 ICC 值为 0.76, 测量误差 MAD 为 1°<sup>[16]</sup>。然而, X 线成像并不是评估脊柱旋转角度的理想方法, 其结果只能间接反映椎骨在水平面上的旋转变化<sup>[17]</sup>。

### 1.3 脊柱柔韧性

脊柱柔韧性是判断结构性和非结构性侧凸的重要评估参数, 用于预测康复运动、矫形器或手术治疗的脊柱侧凸矫正效果。脊柱柔韧性通过比较站立位与其他体位脊柱侧凸角度的变化进行评估, 如仰卧侧屈位、俯卧加压位、牵引位和支点侧屈位 X 线成像<sup>[18-19]</sup>。其中, 仰卧侧屈位 X 线成像操作简便, 曾经被认为是评估脊柱柔韧性的标准。但是, 随着第 3 代脊柱内固定矫形器械 (如椎弓根螺钉) 的出现, 此种体位预测的脊柱柔韧性远低于手术矫形效果。俯卧加压位 X 线成像需检查者施加外力于侧凸的脊柱, 施加力量的大小将会影响脊柱柔韧性的预测值。牵引位 X 线成像包括患者自身重力牵引位 X 线成像、仰卧牵引位 X 线成像和全身麻醉下牵引位 X 线成像, 但均操作技术复杂, 干扰因素较多, 评价效度不高<sup>[18]</sup>。目前, 支点侧屈位 X 线成像被认为是较准确反映脊柱柔韧性的评估方法。但是, 支点装置和患者体型方面的差异也会影响脊柱柔韧性评估的信度和效度, 如何设计并改善个体化的支点装置有待进一步研究<sup>[20]</sup>。

### 1.4 胸椎后凸/腰椎前凸角度

脊柱侧凸患者通常伴有矢状面上胸椎后凸/腰椎前凸角度的异常, 影响脊柱在矢状面上的平衡<sup>[21-22]</sup>。X 线成像采用 Cobb 方法测量脊柱侧凸在矢状面上的胸椎后凸/腰椎前凸角度 (图 1): 矢状面上第 3 胸椎 (T<sub>3</sub>) 椎体的上终板平行线与第 12 胸椎 (T<sub>12</sub>) 椎体的下终板平行线之间所形成的夹角为胸椎后凸角; 第 1 腰椎 (L<sub>1</sub>) 椎体的上终板平行线与第 5 腰椎 (L<sub>5</sub>) 椎体的下终板平行线之间所形成的夹角为

腰椎前凸角。研究发现, Cobb 方法评估胸椎后凸/腰椎前凸角度的测量信度较高, 组内相关系数 ICC 值为 0.83 ~ 0.92<sup>[3]</sup>。然而, Cobb 方法反映的是侧凸脊柱前份-椎体的结构特征, 其测量结果只能反映出 T<sub>3</sub> 和 T<sub>12</sub> 或者 L<sub>1</sub> 和 L<sub>5</sub> 两个椎体的终板之间的倾斜程度。因此, Cobb 方法评估胸椎后凸/腰椎前凸角度的结果具有局限性。

### 1.5 骨成熟度

骨成熟度反映青少年生长发育程度, 是选择脊柱侧凸手术治疗或保守治疗的重要依据<sup>[23]</sup>。在骨盆正位 X 线片上, 根据髂骨翼的骨骺骨化范围判断骨成熟度, 其结果表示为 Risser 征, 共分为 I ~ V 级 (图 2)。髂骨骨骺从侧方向中间生长, Risser 征 I ~ II 级表示生长发育高峰期, 即髂骨的骨骺还处于开放阶段, 可以判定该患者脊柱侧凸加重的风险较大, 宜选择积极的方法治疗。而 Risser 征 V 级表示髂骨骨骺全部出现, 脊柱侧凸进展缓慢, 可根据侧凸角度大小及症状选择合适的方法。

### 1.6 优势与劣势

X 线成像评估脊柱侧凸操作简便, 测量结果信度较高。然而, 多次的 X 线检查使患者暴露于 X 线辐射中, 增加肿瘤等疾病的发生率。特别是女性的脊柱侧凸患者, 正处于青春发育期, 胸腺组织对 X 线辐射更加敏感<sup>[24]</sup>。此外, X 线成像评估局限于在冠状面和矢状面上评估脊柱侧凸, 不能在水平面上显示椎骨旋转程度, 即 X 线图像将三维的脊柱结构投射在二维的胶片上, 不能真实地反映出脊柱侧凸三维空间的畸形特征<sup>[25]</sup>。近年来, 随着脊柱侧凸三维矫形技术的开展, 以及减少患者 X 线辐射量的基本要求, 更加安全、可靠和准确的三维 X 线成像技术成为脊柱侧凸评估的研究热点。

## 2 三维立体 X 线成像评估方法

### 2.1 测量参数

三维立体 X 线成像是通过双平面 X 线成像系统, 同时进行正位和侧位 X 线成像; 在特定计算



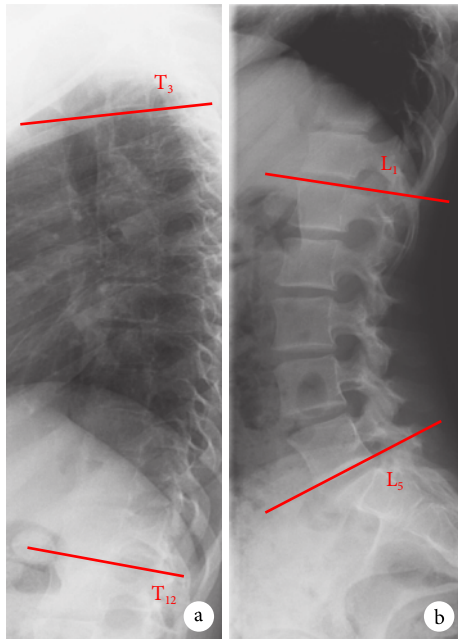


图1 胸椎后凸/腰椎前凸角测量  
a. 胸椎后凸角; b. 腰椎前凸角

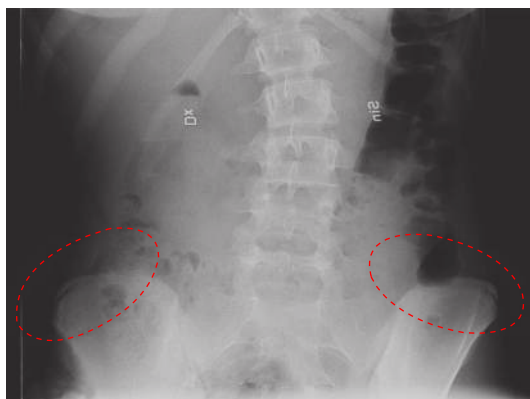


图2 骨成熟度 Risser 征评估

机程序辅助下,进行脊柱和躯干的三维 X 线图像重建<sup>[26]</sup>。在重建的脊柱三维图像上,通过特定软件程序完成自动或半自动的脊柱侧凸、脊柱旋转、胸椎后凸、腰椎前凸以及胸椎扭转等参数的评估<sup>[27-28]</sup>。此外,三维立体 X 线成像实现了脊柱柔韧性在冠状面、水平面和矢状面上的评估<sup>[29]</sup>;且能够更加立体地反映出脊柱侧凸患者胸廓与骨盆的畸形特征<sup>[30]</sup>。

## 2.2 信度与效度

研究结果表明,三维立体 X 线成像评估脊柱侧凸的方法信度和效度均较高。对于轻中度脊柱侧凸,Gille 等<sup>[31]</sup>研究报道,三维立体 X 线成像评估脊柱侧凸、脊柱旋转、胸椎后凸/腰椎前凸的评测者内 MAD 值依次为 1.9、1.4、3.6、2.5°,评测者间 MAD

值依次为 1.6、0.9、3.7、2.8°,评测者内和评测者间组内相关系数 ICC 值均>0.87;而对于重度脊柱侧凸,Ilharreborde 等<sup>[32]</sup>研究报道其评估脊柱侧凸、脊柱旋转、胸椎后凸/腰椎前凸的评测者内 MAD 值为 4.8、5.3、5.9、5.7°,评测者间 MAD 值为 6.2、6.1、7.0、6.7°。而且,对于脊柱侧凸术后的患者,三维立体 X 线成像的测量信度不易受术中置入器材的影响。此外,Glaser 等<sup>[33]</sup>通过与 CT 成像的测量结果比较,验证了三维立体 X 线成像评估脊柱侧凸的效度。

## 2.3 优势与劣势

近年来,三维立体 X 线成像评估方法在脊柱侧凸的临床实践中逐步开展,其主要优势在于脊柱侧凸的三维 X 线重建图像,且 X 线的辐射剂量减少<sup>[34]</sup>。然而,三维立体 X 线成像仍然不能直接显示脊柱侧凸在水平面上的畸形特征,其三维评估结果来源于三维重建 X 线图像上的测量数据。因此,探索三维立体 X 线成像的图像重建与测量技术,更真实反映出脊柱侧凸的三维畸形特征,同时进一步减少 X 线成像的辐射,将是今后的研究趋势。

## 3 小结与展望

X 线成像是脊柱侧凸临床诊断与评估的最基本方法,具有较高的信度与效度。计算机辅助测量 Cobb 角度可有效减少人为误差因素,提高脊柱侧凸与旋转角度测量的信度与效度。为克服 X 线成像本身二维平面的局限性,三维立体 X 线成像技术推动了脊柱侧凸三维影像学评估的发展,可更真实地反映出脊柱侧凸本身的三维畸形特征。在今后的研究中,探索脊柱侧凸三维及自动化的影像学成像技术仍为该领域的研究热点,也为脊柱侧凸的精准诊断与评估提供研究基础。

## 参考文献

- 1 Newton Ede MM, Jones SW. Adolescent idiopathic scoliosis: evidence for intrinsic factors driving aetiology and progression. *Int Orthop*, 2016, 40(10): 2075-2080.
- 2 Eijgenraam SM, Boselie TF, Sieben JM, et al. Development and assessment of a digital X-ray software tool to determine vertebral rotation in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine J*, 2017, 17(2): 260-265.
- 3 Vrtovec T, Pernus F, Likar B. A review of methods for quantitative evaluation of spinal curvature. *Eur Spine J*, 2009, 18(5): 593-607.
- 4 De Carvalho A, Vialle R, Thomsen L, et al. Reliability analysis for manual measurement of coronal plane deformity in adolescent scoliosis. Are 30×90 cm plain films better than digitized small films?. *Eur Spine J*, 2007, 16(10): 1615-1620.
- 5 Gstoettner M, Sekyra K, Walochnik N, et al. Inter- and intraobserver reliability assessment of the Cobb angle: manual

- versus digital measurement tools. *Eur Spine J*, 2007, 16(10): 1587-1592.
- 6 Gupta MC, Wijesekera S, Sossan A, *et al*. Reliability of radiographic parameters in neuromuscular scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2007, 32(6): 691-695.
  - 7 Allen S, Parent E, Khorasani M, *et al*. Validity and reliability of active shape models for the estimation of Cobb angle in patients with adolescent idiopathic scoliosis. *J Digit Imaging*, 2008, 21(2): 208-218.
  - 8 Mok JM, Berven SH, Diab M, *et al*. Comparison of observer variation in conventional and three digital radiographic methods used in the evaluation of patients with adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2008, 33(6): 681-686.
  - 9 Tanure MC, Pinheiro AP, Oliveira AS. Reliability assessment of Cobb angle measurements using manual and digital methods. *Spine J*, 2010, 10(9): 769-774.
  - 10 Langensiepen S, Semler O, Sobottke R, *et al*. Measuring procedures to determine the Cobb angle in idiopathic scoliosis: a systematic review. *Eur Spine J*, 2013, 22(11): 2360-2371.
  - 11 Hong JY, Hwang JH, Suh SW, *et al*. Reliability of coronal curvature measures in premature scoliosis: comparison of 4 methods using inverted digital luminescence radiography. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2015, 40(12): E701-E712.
  - 12 Zhang JH, Lou E, Hill DL, *et al*. Computer-aided assessment of scoliosis on posteroanterior radiographs. *Med Biol Eng Comput*, 2010, 48(2): 185-195.
  - 13 Aubin CE, Bellefleur C, Joncas J, *et al*. Reliability and accuracy analysis of a new semiautomatic radiographic measurement software in adult scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2011, 36(12): E780-E790.
  - 14 Chan AC, Morrison DG, Nguyen DV, *et al*. Intra- and interobserver reliability of the Cobb angle-vertebral rotation Angle-Spinous process angle for adolescent idiopathic scoliosis. *Spine Deform*, 2014, 2(3): 168-175.
  - 15 Boyer L, Shen J, Parent S, *et al*. Accuracy and precision of seven radiography-based measurement methods of vertebral axial rotation in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine Deform*, 2018, 6(4): 351-357.
  - 16 Vrtovec T, Pernus F, Likar B. A review of methods for quantitative evaluation of axial vertebral rotation. *Eur Spine J*, 2009, 18(8): 1079-1090.
  - 17 Padulo J, Ardigò LP. Letter to the editor concerning “vertebral rotation in adolescent idiopathic scoliosis calculated by radiograph and back surface analysis-based methods: correlation between the raimondi method and rasterstereography”. *Eur Spine J*, 2013, 22(10): 2336-2337.
  - 18 Bekki H, Harimaya K, Matsumoto Y, *et al*. Which side-bending X-ray position is better to evaluate the preoperative curve flexibility in adolescent idiopathic scoliosis patients, supine or prone?. *Asian Spine J*, 2018, 12(4): 632-638.
  - 19 Chaudry Z, Anderson JT. Curve flexibility in cerebral palsy-related neuromuscular scoliosis: does the intraoperative prone radiograph reveal more flexibility than preoperative radiographs?. *Scoliosis Spinal Disord*, 2017, 12: 15.
  - 20 Samartzis D, Leung Y, Shigematsu H, *et al*. Selection of fusion levels using the fulcrum bending radiograph for the management of adolescent idiopathic scoliosis patients with alternate level pedicle screw strategy: clinical decision-making and outcomes. *PLoS One*, 2015, 10(8): e0120302.
  - 21 Hu P, Yu M, Liu X, *et al*. Analysis of the relationship between coronal and sagittal deformities in adolescent idiopathic scoliosis. *Eur Spine J*, 2016, 25(2): 409-416.
  - 22 Newton PO, Fujimori T, Doan J, *et al*. Defining the “Three-Dimensional sagittal plane” in thoracic adolescent idiopathic scoliosis. *J Bone Joint Surg Am*, 2015, 97(20): 1694-1701.
  - 23 Yang JH, Bhandarkar AW, Suh SW, *et al*. Evaluation of accuracy of plain radiography in determining the Risser stage and identification of common sources of errors. *J Orthop Surg Res*, 2014, 9: 101.
  - 24 Law M, Ma WK, Lau D, *et al*. Cumulative radiation exposure and associated cancer risk estimates for scoliosis patients: impact of repetitive full spine radiography. *Eur J Radiol*, 2016, 85(3): 625-628.
  - 25 Tauchi R, Tsuji T, Cahill PJ, *et al*. Reliability analysis of Cobb angle measurements of congenital scoliosis using X-ray and 3D-CT images. *Eur J Orthop Surg Traumatol*, 2016, 26(1): 53-57.
  - 26 Yamato Y, Matsuyama Y. Will a low-dose biplanar radiograph become “gold standard” for three-dimensional assessment of spinal deformity in patients with adolescent idiopathic scoliosis?. *J Spine Surg*, 2018, 4(2): 465-466.
  - 27 Bagheri A, Liu XC, Tassone C, *et al*. Reliability of three-dimensional spinal modeling of patients with idiopathic scoliosis using Eos system. *Spine Deform*, 2018, 6(3): 207-212.
  - 28 Kato S, Debaud C, Zeller RD. Three-dimensional EOS analysis of apical vertebral rotation in adolescent idiopathic scoliosis. *J Pediatr Orthop*, 2017, 37(8): e543-e547.
  - 29 Hirsch C, Ilharreborde B, Mazda K. Flexibility analysis in adolescent idiopathic scoliosis on side-bending images using the EOS imaging system. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2016, 102(4): 495-500.
  - 30 Rouissi J, Arvieu R, Dubory A, *et al*. Intra and inter-observer reliability of determining degree of pelvic obliquity in neuromuscular scoliosis using the EOS-CHAIR<sup>®</sup> protocol. *Childs Nerv Syst*, 2017, 33(2): 337-341.
  - 31 Gille O, Champain N, Benchikh-El-Fegoun A, *et al*. Reliability of 3D reconstruction of the spine of mild scoliotic patients. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2007, 32(5): 568-573.
  - 32 Ilharreborde B, Steffen JS, Nectoux EA, *et al*. Angle measurement reproducibility using Eos three-dimensional reconstructions in adolescent idiopathic scoliosis treated by posterior instrumentation. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2011, 36(20): E1306-E1313.
  - 33 Glaser DA, Doan J, Newton PO. Comparison of 3-dimensional spinal reconstruction accuracy biplanar radiographs with Eos versus computed tomography. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2012, 37(16): 1391-1397.
  - 34 Morel B, Moueddeb S, Blondiaux E, *et al*. Dose, image quality and spine modeling assessment of biplanar Eos micro-dose radiographs for the follow-up of in-brace adolescent idiopathic scoliosis patients. *Eur Spine J*, 2018, 27(5): 1082-1088.

收稿日期: 2017-10-16 修回日期: 2018-08-28

本文编辑: 凌雪梅