

DOI:10.16781/j.0258-879x.2020.11.1203

• 专题报道 •

Lenke I型青少年特发性脊柱侧凸患者生物力学在体反应特征曲线

白锦毅[△], 李 博[△], 赵云飞, 赵颖川, 李 明, 杨长伟*

海军军医大学(第二军医大学)长海医院骨科, 上海 200433

[摘要] **目的** 提出一种新的评估青少年特发性脊柱侧凸(AIS)患者柔韧性的方法——生物力学在体反应特征曲线。**方法** 回顾性选择2017年11月至2018年6月在我院就诊的18例Lenke I型AIS患者, 其中女16例、男2例, 年龄为10~17岁, 初始主胸弯冠状面Cobb角为40.00°~63.00°, 平均主胸弯冠状面Cobb角为(44.50±6.35)°。利用体外脊柱侧凸Cobb角测量仪评估自然重力状态下患者主胸弯冠状面Cobb角, 之后从0 N开始逐渐增加纵向牵引力至160 N, 每增加20 N对主胸弯冠状面Cobb角进行1次评估。对每例患者的主胸弯冠状面Cobb角与纵向牵引力进行Pearson相关和线性回归分析, 并计算回归系数(动态柔韧指数, K), 绘制生物力学在体反应特征曲线。**结果** 18例Lenke I型AIS患者的主胸弯冠状面Cobb角均随着纵向牵引力的增大而减小, Pearson相关分析结果显示每例患者的主胸弯冠状面Cobb角均与纵向牵引力呈负相关(P 均<0.05)。18例Lenke I型AIS患者动态柔韧指数(K)为-0.239~-0.098, 与患者年龄、身高、体重、BMI、Risser征均无明显相关性(P 均>0.05), 而与初始主胸弯冠状面Cobb角呈负相关($r=-0.704$, $P=0.001$)。**结论** Lenke I型AIS患者生物力学在体反应特征曲线是评估脊柱侧凸柔韧性的一种有效方法, 并且能动态全面评估整体柔韧性。

[关键词] 青少年特发性脊柱侧凸; 柔韧性; 生物力学; 在体反应特征曲线

[中图分类号] R 682.3

[文献标志码] A

[文章编号] 0258-879X(2020)11-1203-05

In vivo biomechanical response characteristic curve in Lenke type I adolescent idiopathic scoliosis

BAI Jin-yi[△], LI Bo[△], ZHAO Yun-fei, ZHAO Ying-chuan, LI Ming, YANG Chang-wei*

Department of Orthopaedics, Changhai Hospital, Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

[Abstract] **Objective** To introduce a new method to evaluate the flexibility of adolescent idiopathic scoliosis (AIS) — *in vivo* biomechanical response characteristic curve. **Methods** A total of 18 patients with Lenke type I AIS from Nov. 2017 to Jun. 2018 in our hospital were retrospectively selected; the patients included 16 females and two males, aged from 10 to 17 years old. The initial coronal Cobb angle of the main thoracic curve was 40.00° to 63.00°, averaging at (44.50±6.35)°. The coronal Cobb angle of the main thoracic curve was evaluated by the extracorporeal scoliosis Cobb angle measuring instrument under natural gravity, and then the longitudinal traction force was gradually increased from 0 N to 160 N, with the coronal Cobb angle of the main thoracic curve evaluated every 20 N. Pearson correlation and linear regression analysis were used to analyze the coronal Cobb angle and longitudinal traction for each patient. The regression coefficient (dynamic flexibility index, K) was calculated and the *in vivo* biomechanical response characteristic curve was drawn. **Results** The coronal Cobb angle of the main thoracic curve decreased with the increase of longitudinal traction in 18 patients with Lenke type I AIS. Pearson correlation regression analysis showed that the coronal Cobb angle of the main thoracic curve in each patient was negatively correlated with the longitudinal traction force (all $P<0.05$). The K values of the 18 Lenke type I AIS patients were -0.239 to -0.098, and K value had no significant correlation with age, height, body weight, body mass index or Risser sign (all $P>0.05$), but had a negative correlation with the coronal Cobb angle of the initial main thoracic curve ($r=-0.704$, $P=0.001$). **Conclusion** *In vivo* biomechanical response characteristic curve is an effective method to evaluate the flexibility of scoliosis for Lenke type I AIS, and it can dynamically and comprehensively evaluate the overall flexibility.

[收稿日期] 2019-04-24 **[接受日期]** 2020-02-13

[基金项目] 国家自然科学基金(31870985), 上海市自然科学基金(16ZR1449100). Supported by National Natural Science Foundation of China (31870985) and Natural Science Foundation of Shanghai (16ZR1449100).

[作者简介] 白锦毅, 硕士生, 住院医师. E-mail: baibaibaijy@163.com; 李 博, 博士生. E-mail: smmulibo@163.com

[△]共同第一作者(Co-first authors).

*通信作者(Corresponding author). Tel: 021-31161700, E-mail: changwei_y@qq.com

[Key words] adolescent idiopathic scoliosis; flexibility; biomechanics; *in vivo* response characteristic curve

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2020, 41(11): 1203-1207]

青少年特发性脊柱侧凸 (adolescent idiopathic scoliosis, AIS) 是一种复杂的三维脊柱畸形, 常发生于青春期女性, 若不及时诊治, 部分患者病情将加重, 引起躯体严重畸形, 不仅影响神经、心肺功能, 还会给患者心理健康造成严重危害^[1-2]。研究表明, 对于轻度侧凸 (Cobb 角 $<40^\circ$) 的 AIS 患者, 如果骨骼发育尚未成熟, 可以用石膏或支具控制其进展; 而对于 Cobb 角 $>45^\circ$ 的患者, 即使骨骼已发育成熟, 畸形也会继续加重, 所以外科手术就成为唯一有效的治疗方式^[3]。然而无论采取何种治疗方式, 都需评估 AIS 患者的脊柱柔韧性。

脊柱柔韧性的准确评估对确定融合节段、选择手术入路、预测术后矫形效果等具有重要意义^[4]。目前临床上常用的脊柱侧凸柔韧性评估手段包括仰卧位侧屈位 X 线片、支点侧屈位 X 线片、牵引位 X 线片、俯卧位推压位 X 线片等^[5]。目前尚没有一种 AIS 柔韧性评估方法能被所有学者认同, 随着三维矫形理念的革新和矫形器械的发展部分方法也已无法对矫形效果进行准确预测与评价, 并且既往柔韧性评估方法都是静态评估^[6]。传感器技术和影像学技术的迅速发展为临床获取患者的疾病信息提供了新的方向和思路。本研究利用基于姿态传感器的脊柱形态测量仪^[7]结合纵向牵引连续评估 Lenke I 型 AIS 患者主胸弯冠状面 Cobb 角, 获得 AIS 患者生物力学在体反应特征曲线, 探讨其对脊柱柔韧性的评估价值。

1 资料和方法

1.1 研究对象 回顾性选择 2017 年 11 月至 2018 年 6 月在我院就诊的 18 例 Lenke I 型 AIS 患者。纳入标准: (1) Lenke I 型患者; (2) 年龄 <18 岁; (3) 具有完整的年龄、身高、体重等人口统计学资料; (4) 具有完整的术前影像学资料。本研究通过海军军医大学 (第二军医大学) 长海医院医学伦理委员会审批, 所有患者均签署知情同意书。

1.2 检查方法 患者坐于脊柱牵引架上, 上半身保持直立, 腰骶部保持固定, 头部位于枕颌带正下方, 确保牵引力处于垂直方向。利用体外脊柱侧凸 Cobb 角测量仪对自然重力状态下患者主胸弯冠状

面 Cobb 角进行评估。之后通过枕颌带开始对患者施加垂直方向的牵引力, 纵向牵引力从 0 N 逐渐增加至 160 N (约为健康成人 30% 体重产生的重力), 每增加 20 N 对主胸弯冠状面 Cobb 角进行 1 次评估, 每次评估均重复测量 3 次, 将 3 次数据的平均值作为评估结果。

生物力学在体反应特征测试由 2 名脊柱外科主治医师按照试验标准共同完成。测量过程由该 2 名脊柱外科主治医师独立进行, 结果取算术平均值。

1.3 统计学处理 应用 SPSS 17.0 软件进行统计学分析。计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 计数资料以例数表示。对每例患者的主胸弯冠状面 Cobb 角与纵向牵引力进行 Pearson 相关和线性回归分析, 并计算回归系数 (动态柔韧指数, K), 然后对 K 值与患者一般资料再进行 Pearson 或 Spearman 相关分析。检验水准 (α) 为 0.05。

2 结果

2.1 患者一般情况 18 例 Lenke I 型 AIS 患者中女 16 例, 男 2 例; 年龄为 10~17 岁, 平均 (13.78 ± 1.83) 岁; 身高为 1.47~1.72 m, 平均 (1.59 ± 0.07) m; 体重为 35~90 kg, 平均 (51.42 ± 11.99) kg; 初始主胸弯冠状面 Cobb 角为 $40.00^\circ \sim 63.00^\circ$, 平均 $(44.50 \pm 6.35)^\circ$ 。

2.2 主胸弯冠状面 Cobb 角与纵向牵引力的相关性分析 由图 1 可见, 18 例 Lenke I 型 AIS 患者的主胸弯冠状面 Cobb 角均随着纵向牵引力的增大而减小。对每例患者的主胸弯冠状面 Cobb 角与纵向牵引力进行 Pearson 相关分析, 结果显示所有患者的主胸弯冠状面 Cobb 角均与纵向牵引力呈负相关 (P 均 <0.05 , 表 1)。

2.3 患者动态柔韧指数 (K) 与一般资料的相关性分析 回归分析结果显示 18 例 Lenke I 型 AIS 患者的动态柔韧指数 (K) 为 $-0.239 \sim -0.098$ (表 1)。Pearson 和 Spearman 相关分析结果显示, 动态柔韧指数 (K) 与患者年龄、身高、体重、BMI、Risser 征均无关 (P 均 >0.05), 而与初始主胸弯冠状面 Cobb 角呈负相关 ($r = -0.704$, $P = 0.001$), 见表 2。

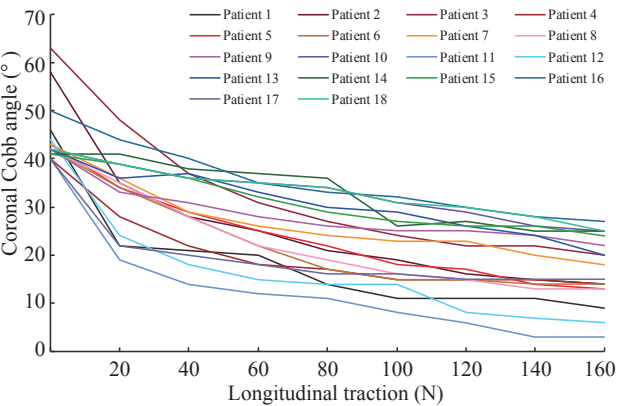


图 1 18 例 Lenke I 型 AIS 患者冠状面 Cobb 角随纵向牵引力变化图

Fig 1 Relationship between coronal Cobb angle and longitudinal traction in the 18 patients with Lenke type I AIS

AIS: Adolescent idiopathic scoliosis

表 1 18 例 Lenke I 型 AIS 患者冠状面 Cobb 角与纵向牵引力的 Pearson 相关和线性回归分析

Tab 1 Pearson correlation and linear regression analysis between coronal Cobb angle and longitudinal traction in the 18 patients with Lenke type I AIS			
Patient	<i>r</i>	<i>P</i> value	Regression coefficient (K)
1	−0.834	0.005	−0.175
2	−0.873	0.002	−0.222
3	−0.906	0.001	−0.239
4	−0.850	0.004	−0.133
5	−0.965	<0.001	−0.176
6	−0.919	<0.001	−0.171
7	−0.929	<0.001	−0.136
8	−0.943	<0.001	−0.178
9	−0.906	0.001	−0.102
10	−0.993	<0.001	−0.104
11	−0.863	0.003	−0.180
12	−0.871	0.002	−0.187
13	−0.986	<0.001	−0.125
14	−0.947	<0.001	−0.121
15	−0.970	<0.001	−0.110
16	−0.960	<0.001	−0.136
17	−0.757	0.018	−0.111
18	−0.992	<0.001	−0.098

AIS: Adolescent idiopathic scoliosis; K: Dynamic flexibility index

2.4 2 例基线资料相近 Lenke I 型 AIS 患者脊柱柔韧性评价 分析基线资料相近的 2 例 Lenke I 型 AIS 患者的动态柔韧指数(*K*), 结果见表 3。传统仰卧位侧屈位 X 线片测得病例 1 的脊柱柔韧性优于病例 2, 分别为 60.48% 和 50.24%, 而病例 1 和病例 2 的动态柔韧指数(*K*) 分别为−0.171 和−0.102, 说明 *K* 值越小脊柱柔韧性越好。

表 2 18 例 Lenke I 型 AIS 患者动态柔韧指数与一般资料的 Pearson 或 Spearman 相关分析

Tab 2 Pearson or Spearman correlation analysis between dynamic flexibility index and general characteristics in the 18 patients with Lenke type I AIS

Index	<i>r</i>	<i>P</i> value
Age	0.161	0.523
Height	0.156	0.536
Body weight	0.274	0.271
BMI	0.321	0.193
Risser grade	0.377	0.123
Initial coronal Cobb angle	−0.704	0.001

AIS: Adolescent idiopathic scoliosis; BMI: Body mass index

表 3 2 例基线资料相近 Lenke I 型 AIS 患者的脊柱柔韧性评价

Tab 3 Spinal flexibility of two Lenke type I AIS patients with similar baseline data

Patient	Gender	Age (year)	Height (m)	Body weight (kg)	BMI (kg·m ^{−2})	Risser sign
1	Female	14	1.5	35	15.6	2
2	Female	13	1.5	46	20.4	2

Patient	Initial coronal Cobb angle (°)	Bending (°)	<i>r</i>	<i>K</i>	<i>P</i> value
1	42	16.6	−0.919	−0.171	<0.01
2	42	20.9	−0.906	−0.102	0.01

AIS: Adolescent idiopathic scoliosis; BMI: Body mass index; K: Dynamic flexibility index

3 讨 论

临床和影像学评估对 AIS 手术方案的制定及手术矫形效果的预测非常重要, 而术前柔韧性评估已被认为是 AIS 患者术前准备中不可或缺的部分, 其在确定侧凸分型、选择手术入路、确定融合节段、预测矫形效果方面都具有重要意义^[8]。对于柔韧性较好的 AIS 患者, 手术矫形效果通常较好, 可适当缩短融合节段、降低置钉密度; 而对于柔韧性较差的 AIS 患者, 常需延长融合节段、增加螺钉数量以提高矫形效果。从生物力学角度, 评估脊柱柔韧性即通过观察患者脊柱在一定外力作用下的形变能力, 了解患者脊柱的生物力学性能。

虽然目前评估脊柱柔韧性的方法很多, 但各有优缺点。传统的脊柱柔韧性评估方法是基于脊柱全长正侧位 X 线片, 在患者处于不同体位、不同负荷下进行对比, 从而获得静态的柔韧性。目前临床最常用的是仰卧位侧屈位 X 线片, 因为在仰卧位时消

除了柔韧性中的“塌陷”作用,并且冠状面的侧屈力和胸腹部矢状面作用力达到了三维矫形效果。随着新型内固定器械的推广,仰卧位侧屈位X线片逐渐暴露出重复性差、术后预测准确性低等缺点^[9]。但仰卧位侧屈位X线片在诊断方面仍具有重要作用(如区分结构性与非结构性侧凸),目前仍是术前常规的辅助检查方法^[10]。

Cheung和Luk等^[11-12]于1997年设计了支点侧屈位X线片法,并于1998年提出了支点侧屈矫正指数(fulcrum-bending correction index, FBCI)。研究显示支点侧屈位X线片对选择手术入路、融合节段和评估术后顶椎旋转有很好的借鉴作用^[13],但其对于上胸椎侧凸和胸腰段/腰椎的侧凸柔韧性评估不理想^[14]。

牵引位X线片的应用虽然不及仰卧位侧屈位X线片普遍,但由于其对存在精神疾患或具有神经肌肉疾病的患者同样适用的优点也被脊柱外科医师使用。牵引位X线片主要的形式有仰卧位牵引法和重力悬吊牵引法。Polly和Sturm^[15]认为牵引位X线片在重度侧凸中的应用效果优于其他方法,但骨质疏松、颈椎疾患和颞下颌关节疾患患者应慎用。Davis等^[16]于2004年提出了一种全身麻醉下的牵引位X线片,其考虑了肌肉收缩对侧凸矫正效果的影响,一定程度增加了预测手术矫正率的准确性,但仍然无法准确预测手术矫正率^[17]。

俯卧位推压位X线片由Kleinman等^[18]于1982年提出,并在采用Harrington器械进行矫形手术后发现俯卧位推压位X线片能够很好地预测术后矫形率。虽然俯卧位推压位X线片一定程度提高了预测术后矫形效果的能力,但在测试过程中加压力量一直未能标准化,并且给予加压力量的医师需暴露于射线环境。Vedantam等^[19]采用Moss-Miami矫形系统和Cotrel-Dubousset矫形系统进行矫形手术,并认为俯卧位推压位X线片与侧屈位X线片同样不能准确预测术后矫形效果。

Chen等^[20]研制了一种电动牵引推压床,结合牵引法和推压法对AIS患者进行柔韧性评估。该方法的稳定性和准确性较高,但同时应考虑牵引力和推压力是被动力,若不能掌握好力的大小可能会导致患者出现骨质和脊髓神经损伤。

近几年随着影像学技术的不断发展,CT、MRI、EOS影像系统、超声等相继被应用于脊柱柔

韧性的评估,但这些方法都处于探索阶段,并且操作复杂烦琐,也不能直观准确地掌握脊柱柔韧性的动态变化。

基于上述研究结论,本研究选择基于姿态传感器的脊柱形态测量仪^[7]结合脊柱侧凸牵引架,评估Lenke I型AIS患者在不同纵向牵引力下的冠状面Cobb角。结果显示Lenke I型AIS患者主胸弯冠状面Cobb角随着纵向牵引力的增大而减小,而Pearson相关和线回归分析得到的动态柔韧指数(K)与患者的年龄、身高、体重、BMI、Risser征均无明显相关性(P 均 >0.05),与初始主胸弯冠状面Cobb角呈负相关($P=0.001$)。表明Lenke I型AIS患者在纵向牵引中均可通过 K 值反映脊柱的柔韧性, K 值越小脊柱的柔韧性越好。

综上所述,通过在体生物力学测试获得的Lenke I型AIS患者生物力学在体反应特征曲线是评估脊柱柔韧性的一种有效方法,其不仅能减少患者X线暴露及经济费用,也可动态地评估脊柱侧凸的柔韧性,并为后期脊柱侧凸三维有限元的优化提供了很好的思路。

[参考文献]

- [1] PANCHMATIA J R, ISAAC A, MUTHUKUMAR T, GIBSON A J, LEHOVSKY J. The 10 key steps for radiographic analysis of adolescent idiopathic scoliosis[J]. Clin Radiol, 2015, 70: 235-242.
- [2] WEINSTEIN S L. Natural history[J]. Spine (Phila Pa 1976), 1999, 24: 2592-2600.
- [3] FALK B, RIGBY W A, AKSEER N. Adolescent idiopathic scoliosis: the possible harm of bracing and the likely benefit of exercise[J]. Spine J, 2015, 15: 209-210.
- [4] NI H J, SU J C, LU Y H, ZHU X D, HE S S, WU D J, et al. Using side-bending radiographs to determine the distal fusion level in patients with single thoracic idiopathic scoliosis undergoing posterior correction with pedicle screws[J]. J Spinal Disord Tech, 2011, 24: 437-443.
- [5] LAMARRE M E, PARENT S, LABELLE H, AUBIN C E, JONCAS J, CABRAL A, et al. Assessment of spinal flexibility in adolescent idiopathic scoliosis: suspension versus side-bending radiography[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2009, 34: 591-597.
- [6] HE C, WONG M S. Spinal flexibility assessment on the patients with adolescent idiopathic scoliosis: a literature review[J/OL]. Spine (Phila Pa 1976), 2018, 43: E250-E258. doi: 10.1097/BRS.0000000000002276.
- [7] 沈林勇, 杭辉冬, 赵检, 杨长伟, 张震. 基于姿态传感

- 器的脊柱形态测量技术[J]. 传感技术学报, 2018, 31: 841-846.
- [8] LENKE L G, BETZ R R, HARMS J, BRIDWELL K H, CLEMENTS D H, LOWE T G, et al. Adolescent idiopathic scoliosis: a new classification to determine extent of spinal arthrodesis[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2001, 83: 1169-1181.
- [9] CHEUNG W Y, LENKE L G, LUK K D. Prediction of scoliosis correction with thoracic segmental pedicle screw constructs using fulcrum bending radiographs[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2010, 35: 557-561.
- [10] CHEH G, LENKE L G, LEHMAN R A Jr, KIM Y J, NUNLEY R, BRIDWELL K H. The reliability of preoperative supine radiographs to predict the amount of curve flexibility in adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2007, 32: 2668-2672.
- [11] CHEUNG K M, LUK K D. Prediction of correction of scoliosis with use of the fulcrum bending radiograph[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1997, 79: 1144-1150.
- [12] LUK K D, CHEUNG K M, LU D S, LEONG J C. Assessment of scoliosis correction in relation to flexibility using the fulcrum bending correction index[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1998, 23: 2303-2307.
- [13] LI J, DUMONSKI M L, SAMARTZIS D, HONG J, HE S, ZHU X, et al. Coronal deformity correction in adolescent idiopathic scoliosis patients using the fulcrum-bending radiograph: a prospective comparative analysis of the proximal thoracic, main thoracic, and thoracolumbar/lumbar curves[J]. *Eur Spine J*, 2011, 20: 105-111.
- [14] KLEPPS S J, LENKE L G, BRIDWELL K H, BASSETT G S, WHORTON J. Prospective comparison of flexibility radiographs in adolescent idiopathic scoliosis[J/OL]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2001, 26: E74-E79. doi: 10.1097/00007632-200103010-00002.
- [15] POLLY D W Jr, STURM P F. Traction versus supine side bending. Which technique best determines curve flexibility? [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1998, 23: 804-808.
- [16] DAVIS B J, GADGIL A, TRIVEDI J, AHMED EL-N B. Traction radiography performed under general anesthetic: a new technique for assessing idiopathic scoliosis curves[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2004, 29: 2466-2470.
- [17] HAMZAOGLU A, TALU U, TEZER M, MIRZANLI C, DOMANIC U, GOKSAN S B. Assessment of curve flexibility in adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2005, 30: 1637-1642.
- [18] KLEINMAN R G, CSONGRADI J J, RINKSY L A, BLECK E E. The radiographic assessment of spinal flexibility in scoliosis: a study of the efficacy of the prone push film[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1982(162): 47-53.
- [19] VEDANTAM R, LENKE L G, BRIDWELL K H, LINVILLE D L. Comparison of push-prone and lateral-bending radiographs for predicting postoperative coronal alignment in thoracolumbar and lumbar scoliotic curves[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2000, 25: 76-81.
- [20] CHEN Z Q, WANG C F, BAI Y S, ZHU X D, YANG C W, XIE Y, et al. Using precisely controlled bidirectional orthopedic forces to assess flexibility in adolescent idiopathic scoliosis: comparisons between push-traction film, supine side bending, suspension, and fulcrum bending film[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2011, 36: 1679-1684.

[本文编辑] 杨亚红