

DOI:10.3724/SP.J.1008.2012.00732

· 论 著 ·

## Lenke 2 型特发性脊柱侧凸三维矫形手术的有限元模拟

刘祥胜<sup>1,2△</sup>, 吴冰<sup>1,3△</sup>, 魏显招<sup>1</sup>, 吴大江<sup>1</sup>, 杨宗德<sup>1</sup>, 易红蕾<sup>1</sup>, 王传锋<sup>1</sup>, 董有海<sup>2</sup>, 李明<sup>1\*</sup>

1. 第二军医大学长海医院骨科, 上海 200433
2. 复旦大学附属上海市第五人民医院骨科, 上海 200240
3. 解放军 401 医院骨科, 青岛 266071

**[摘要]** **目的** 利用建立的 Lenke 2 型青少年特发性脊柱侧凸(adolescent idiopathic scoliosis, AIS)三维有限元模型, 分别仿真模拟前路、后路手术矫形操作, 探讨其最佳手术方案。**方法** 建立 Lenke 2 型 AIS 的有限元模型, 分别模拟前路和后路共 5 种不同的矫形方案, 比较不同手术方案的矫形效果和双肩平衡参数的变化。**结果** 5 种不同矫形方案有限元模拟术后的上胸弯冠状面 Cobb 角和矫形率分别为: 21.5(44.8%)、26.5(32.1%)、28.1(27.9%)、34.1(12.5%)、32(17.9%), 各矫形方案的主胸弯矫正率无明显差别。胸椎矢状面生理后凸得以维持。5 种矫形方案术后各双肩平衡影像学参数较术前有所升高, 除方案 A(上端固定椎为 T<sub>2</sub>)外, 其余各方案的喙突高度差均 >9 mm, 锁骨角均 >2.5°, 锁骨倾斜角差均 >4.5°。**结论** 对于左肩高的含结构性上胸弯 Lenke 2 型 AIS, 上端固定椎选择 T<sub>2</sub> 且完全融合上胸弯, 可取得上胸弯、主胸弯良好的三维矫形和双肩平衡。部分融合上胸弯(上端固定椎为 T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>), 上胸弯的矫正率稍差, 术后容易出现轻度到中度双肩不平衡。前路或后路选择性胸主弯融合, 难以恢复上胸弯的正常脊柱序列, 术后会导致轻度到中度双肩不平衡。

**[关键词]** 脊柱侧凸; 全椎弓根螺钉技术; 生物力学; 有限元分析; 后路矫形; 前路矫形; 选择性主胸弯融合

**[中图分类号]** R 682.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0258-879X(2012)07-0732-06

### Three-dimensional finite element simulation of surgical correction for Lenke 2 type adolescent idiopathic scoliosis

LIU Xiang-sheng<sup>1,2△</sup>, WU Bing<sup>1,3△</sup>, WEI Xian-zhao<sup>1</sup>, WU Da-jiang<sup>1</sup>, YANG Zong-de<sup>1</sup>, YI Hong-lei<sup>1</sup>, WANG Chuan-feng<sup>1</sup>, DONG You-hai<sup>2</sup>, LI Ming<sup>1\*</sup>

1. Department of Orthopedics, Changhai Hospital, Second Military Medical University, Shanghai 200433, China
2. Department of Orthopedics, The Fifth People's Hospital of Shanghai, Fudan University, Shanghai 200240, China
3. Department of Orthopedics, No. 401 Hospital, PLA Ji'nian Military Area Command, Qingdao 266071, Shandong, China

**[Abstract]** **Objective** To simulate different anterior and posterior correction strategies using finite element model of Lenke 2 type adolescent idiopathic scoliosis (AIS), in an effort to seek the optimal surgical protocol. **Methods** The finite element model of Lenke 2 type AIS was established and used to simulate five surgical strategies. The effectiveness and shoulder balance parameters were compared among different surgical approaches. **Results** The coronary proximal thoracic (PT) Cobb angle and corrective rates of the five surgical strategies were 21.5(44.8%), 26.5(32.1%), 28.1(27.9%), 34.1(12.5%), and 32(17.9%). The corrective rates for the main thoracic curves were not significantly different among the five strategies, and the physiological sagittal configuration was maintained. Postoperative radiographic shoulder balance parameters were increased for all five surgical protocols. Except for strategy A (posterior fusion from T<sub>2</sub> to T<sub>11</sub>), other four strategy achieved the following outcomes: coracoid height difference >9 mm, clavical angle >2.5° and clavicular tilt angle difference >4.5°. **Conclusion** Simulation of posterior correction and fusion to T<sub>2</sub> including both thoracic curve can achieve excellent three-dimensional corrective results and balanced shoulders for Lenke 2 type AIS model with preoperative left elevated shoulder. Partial fusion of PT curves to T<sub>3</sub> or T<sub>4</sub> results in inferior corrective rate of PT curve and mild or moderate shoulder imbalance. Simulation of anterior or posterior selective main thoracic curve fusion has very low spontaneous PT corrective rate and can lead to deteriorated

**[收稿日期]** 2012-04-08 **[接受日期]** 2012-06-06

**[基金项目]** 国家自然科学基金(30571888). Supported by National Natural Science Foundation of China(30571888).

**[作者简介]** 刘祥胜, 博士, 主治医师. E-mail: newshimmerson@yahoo.com.cn; 吴冰, 博士, 主治医师. E-mail: wumedics@163.com

△共同第一作者(Co-first authors).

\* 通信作者(Corresponding author). Tel: 021-81873387, E-mail: limingspine@yahoo.com.cn

shoulder imbalance slight to moderate degrees.

**[Key words]** scoliosis; all-pedicle screw construction; biomechanics; finite element analysis; posterior correction; anterior correction; selective main thoracic curve fusion

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2012, 33(7): 732-737]

对于 Lenke 2 型青少年特发性脊柱侧凸 (adolescent idiopathic scoliosis, AIS), 其结构性上胸弯的存在以及融合策略的正确选择与患者术前、术后双肩平衡状态密切相关。特发性胸椎侧凸的手术治疗可分为前路和后路手术。Lenke 2 型 AIS 患选择性胸主弯融合术者即结构性双胸弯曾被认为前路选择性胸主弯融合的禁忌证。但前路手术也有许多优点, 许多学者认为前路手术可保留更多的运动节段, 节省 2 个或 2 个以上的远端融合节段<sup>[1]</sup>。Kuklo 等<sup>[2]</sup>认为前路选择性胸主弯融合术可获得比后路手术更好的上胸弯自发性矫正。根据 Lenke 等<sup>[3]</sup>提出的特发性脊柱侧凸分型标准, 上胸弯在 bending 像上  $\geq 25^\circ$  或  $T_2 \sim T_5$  的矢状面后凸角  $\geq 20^\circ$  时为结构性上胸弯, 应该融合包括主胸弯和上胸弯在内的两个结构性侧弯。随着三维矫形器械尤其是胸椎弓根

螺钉的应用和矫形技术的不断进步, 使得脊柱侧凸的矫形效果得到大大提高, 上胸弯融合节段的选择也发生了变化。Lenke 2 型 AIS 是否能采用前路选择性胸主弯融合, 以及不同后路上端固定椎策略的选择 ( $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  或  $T_5$ ), 仍存在较大争议。

本研究利用已建立并通过优化、验证的 Lenke 2 型 AIS 有限元模型, 分别模拟前路和后路共 5 种不同的矫形方案, 初步分析不同方案的矫形效果和双肩平衡参数的变化, 为 Lenke 2 型 AIS 矫形手术方案的优化和治疗效果的评价提供理论依据。

## 1 材料和方法

1.1 研究对象 获取 1 例 16 岁男性 Lenke 2B 型 AIS 志愿者的薄层螺旋 CT 图像, 利用有限元软件建立完整的脊柱侧凸三维有限元模型, 如图 1、2 所示。

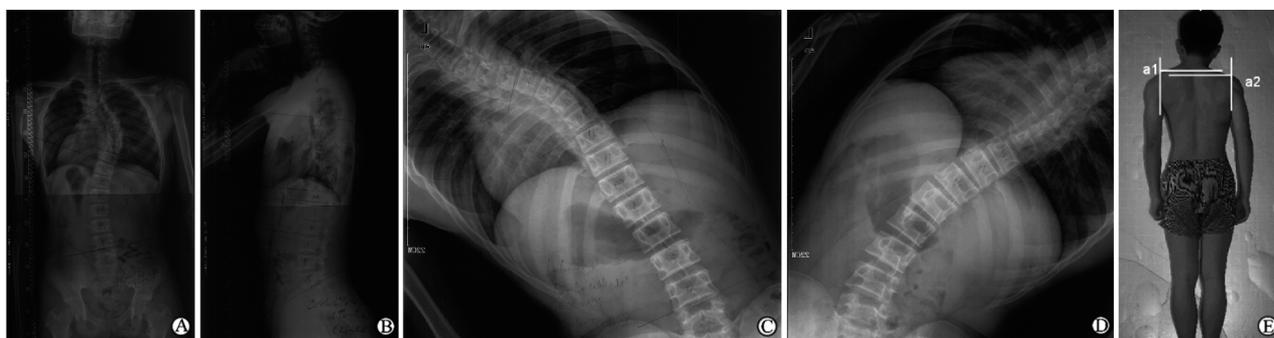


图 1 研究对象站立位 (A、B)、左右侧屈位脊柱全长正侧位 X 线片 (C、D) 及大体照片 (E)

Fig 1 Whole spine radiographs of the subject at standing (A, B) and side-bending (C, D) positions and the mass image (E)

a1, a2: The points where the vertical line through posterior axillary folds intersected with the left and right shoulders

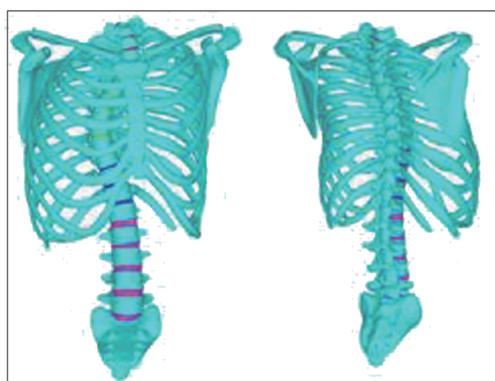


图 2 建立的 Lenke 2B 型 AIS 有限元优化模型

Fig 2 Optimized Lenke 2 AIS finite element model

1.2 钉棒系统的有限元模型的构建 由于构建有

限元模型所用的 CT 图像并没有包括钉棒系统内固定的图像, 不能获取钉棒系统的数据, 无法构建真正的钉棒有限元模型。本研究采用在 Ansys 软件中建模的方法, 直接构建前路椎体钉和后路椎弓根螺钉及矫形棒的有限元模型。螺钉和脊椎的界面采用理想粘接, 椎体螺钉界面间限制所有自由度, 钉棒间则定义为面面接触。在钉子中心和棒子轴心位置构造圆柱关节。

1.3 不同矫形方案的模拟 根据 Lenke 分型标准, 本模型中上胸弯 (proximal thoracic, PT) 和主胸弯 (main thoracic, MT) 为两个结构性侧弯,  $T_5$ 、 $T_{10}$  为主胸弯的上、下端椎, 主胸弯的下中立椎为  $T_{11}$ 。

针对目前临床上争论比较多的 Lenke 2 型 AIS

结构性上胸弯融合策略的选择,不同上端固定椎的选择对术后双肩平衡的影响尚无定论。本研究应用所建立的 Lenke 2 型 AIS 有限元模型分别模拟 A、B、C、D、E 5 种不同的矫形方案。方案 A 代表上端固定椎 (upper instrumented vertebra, UIV) 为  $T_2$ , 完全融合 PT, 同时融合 MT (融合节段为  $T_2 \sim T_{11}$ ); 方案 B 代表 UIV 为  $T_3$ , 部分融合 PT, 同时融合 MT (融合节段为  $T_3 \sim T_{11}$ ); 方案 C 代表 UIV 为  $T_4$ , 不完全融合 PT, 同时融合 MT (融合节段为  $T_4 \sim T_{11}$ ); 方案 D 代表 UIV 为  $T_5$ , 不融合 PT, 选择性融合 MT (融合节段为  $T_5 \sim T_{11}$ )。A、B、C、D 4 种矫形方案均为后路全椎弓根螺钉固定, 下端固定椎均为主胸弯的下中立椎。方案 E 为前路端-端选择性胸主弯融合 (融合节段为  $T_5 \sim T_{10}$ )。

1.4 后路矫形手术的模拟 在融合区内各椎体的矫形侧各置入 1 个构建好的椎弓根螺钉模型, 然后在螺钉钉尾安装预弯好的长棒。在模拟  $90^\circ$  转棒的同时在各螺钉尾部分别施加与椎体自身旋转方向相反的旋转力矩, 模拟椎体直接去旋转。

1.5 前路矫形手术的模拟 于  $T_5 \sim T_{10}$  椎体的凸侧各植入一构建好的螺钉模型, 然后在螺钉钉尾安

装预弯好的长棒。结合实际术中操作, 无论是开放手术还是胸腔镜下选择性主胸弯融合, 与腰椎侧凸前路矫形不同的是, 只进行凸侧节段性加压, 而无  $90^\circ$  去旋转的过程。

1.6 评估指标 对上胸弯和主胸弯的冠状面 Cobb 角、矢状面后凸角、顶椎旋转度、侧凸矫正率、双肩平衡参数及椎体位移等临床关注的指标进行记录。临床双肩高度差的测量为在患者大体照片上双侧腋窝皱襞向上的垂线相交于肩部 a1 和 a2 两点, 经 a1 和 a2 的水平线的距离差。本例患者模拟术前为左肩高于右肩 6 mm。

## 2 结果

模拟的 5 种矫形方案对脊柱形态的矫正和位移云图见图 3~5。方案 D 和方案 E 冠状面上胸弯自发矫正率较低, 分别为 12.5% 和 17.9%, 前路略优于后路。方案 A 上胸弯矫正率最高, 为 44.8%。各矫形方案的冠状面主胸弯矫正率差异无统计学意义 (表 1)。各方案的矢状面正常曲度得以维持, 顶椎旋转度的矫正差异无统计学意义。

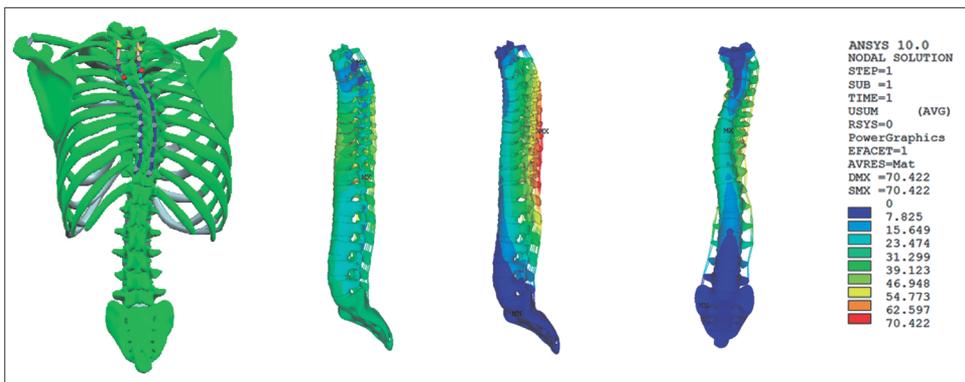


图 3  $T_2 \sim T_{11}$  后路矫形有限元模拟

Fig 3 Simulation of posterior correction ( $T_2 \sim T_{11}$ )



图 4  $T_5 \sim T_{11}$  后路选择性主胸弯融合有限元模拟

Fig 4 Simulation of posterior selective main thoracic curve fusion ( $T_5 \sim T_{11}$ )

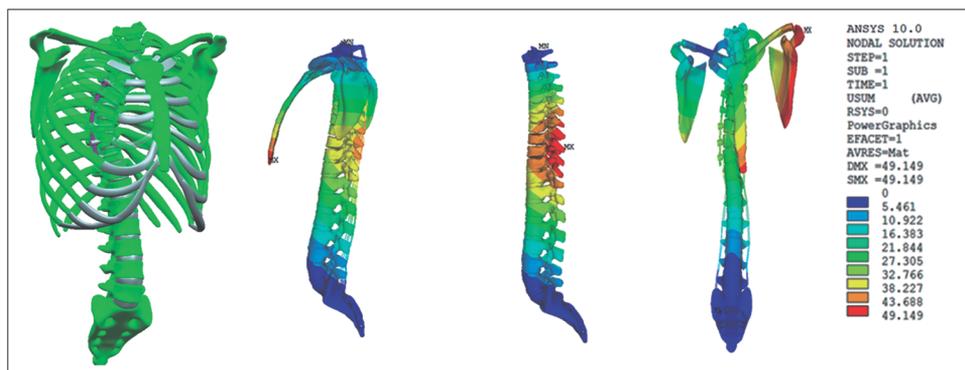


图 5 T<sub>5</sub> ~ T<sub>10</sub> 前路选择性主胸弯融合有限元模拟

Fig 5 Simulation of anterior selective main thoracic curve fusion (T<sub>5</sub>-T<sub>10</sub>)

表 1 模拟不同矫形方案手术前、后冠状面 Cobb 角

Tab 1 Coronal plane changes before and after different correction strategies

	$\theta/^\circ$	
	Proximal thoracic curve (T <sub>2</sub> -T <sub>5</sub> )	Main thoracic curve (T <sub>5</sub> -T <sub>10</sub> )
Preoperation	39	56
Strategy A	21.5(44.8%)	29.2(47.9%)
Strategy B	26.5(32.1%)	28.6(48.9%)
Strategy C	28.1(27.9%)	28.1(49.8%)
Strategy D	34.1(12.5%)	31.3(44.1%)
Strategy E	32.0(17.9%)	30.5(45.5%)

各矫形方案术后各双肩平衡影像学参数较术前有所升高,除方案 A 外,其余各方案的喙突高度差均 >9 mm,锁骨角均 >2.5°,锁骨倾斜角差均 >4.5° (表 2)。

表 2 模拟不同矫形方案手术前、后双肩平衡影像学参数变化

Tab 2 Comparison of radiographic shoulder balance parameters before and after different correction strategies

	Coracoid height difference l/mm	Clavical angle $\theta/^\circ$	Clavicular tilt angle difference $\theta/^\circ$
Preoperation	7.5	2.2	4.1
Strategy A	8.6	2.4	4.4
Strategy B	9.2	2.7	4.7
Strategy C	13.5	2.9	5.4
Strategy D	18.4	3.4	8.6
Strategy E	18.2	3.5	8.3

### 3 讨论

Lenke 2 型特发性脊柱侧凸患者,其结构性上胸弯的存在是影响双肩平衡的主要因素。后路不同上端固定椎的选择和能否进行前路选择性胸主弯融合仍然是争论的焦点。盲目地完全融合上胸弯会导

致手术时间延长、失血量增加、上胸椎椎旁肌失神经支配、难以接受的切口瘢痕和内固定物的背部皮下凸起。当前随着全节段椎弓根螺钉技术的广泛应用和追求主胸弯 100% 矫正率的趋势,使得选择性主胸弯融合术后双肩不平衡的风险更大,脊柱外科医生面对此类问题存在着很大的困惑。

因而,本研究基于有限元模型的可重复性和精确性<sup>[4]</sup>,试图探讨对于本病例类型选择后路不同上端固定椎的矫形效果和前路选择性胸主弯融合策略的可行性和优缺点。

3.1 Lenke 2 型 AIS 的前路选择性主胸弯融合术 Dwyer 和 Schafer<sup>[5]</sup>于 1974 年最早报道在特发性胸椎侧凸中采用前路内固定矫形技术,其策略制定来源是 Zielke 等<sup>[6]</sup>在胸腰段或腰段侧凸矫形中建立的理论。Zielke 端-端融合原则适用于所有前路矫形融合病例。

前路器械矫正胸椎侧凸采用的是单纯凸侧加压技术,无 90° 去旋转的过程,通过节段间的去耦合和钉棒间的相互平移来实现椎体的直接去旋转,这和后路采用的矫形技术完全不同。很多学者报道前路矫形可获得更好的轴状面旋转畸形矫正和更好地恢复矢状面生理后凸,同时能减少融合节段<sup>[7-8]</sup>。受前路矫形技术和局部解剖复杂性的影响,几乎不可能将融合节段延长到 T<sub>4</sub> 以上的上胸椎节段。所以 Lenke 2 型 AIS 不是前路矫形融合的最佳适应证,术前需评估和认识结构性上胸弯的存在与否。Lee 等<sup>[9]</sup>采用胸腔镜下前路选择性胸主弯融合矫正 40 例双胸弯患者,取得 37.4% 的上胸弯矫正率。术后仅 3 例出现轻度双肩不平衡 (<20 mm)。他认为术前轻度左肩高的患者 (<20 mm),若上胸弯或下胸弯的上半部分 <30°,采用前路选择性胸主弯融合可取得术后良好的双肩平衡状态,前路选择性胸主弯融合的指征不像后路矫正那么严格。前路选择性胸

主弯融合术后双肩失衡发生率较低的原因与其不同的三维矫形机制有关;前路器械材料的可塑性更强,其矫形丢失率更高;前路矫形对人体自我平衡调节能力影响较小,保留更多的未融合节段使其具有更高的上胸弯自发矫正率。因此 Lenke 2 型 AIS 是前路选择性胸主弯融合的相对适应证。

本研究中 E 方案为前路选择性主胸弯融合,采用 Zielke 端-端融合原则,融合节段为  $T_5$ - $T_{10}$ ,融合节段比后路更短,主胸弯的矫正率为 45.5%,结构性上胸弯的自发矫正率较低,为 17.9%,难以恢复其正常的上胸椎序列。由于上胸弯比主胸弯更僵硬,模拟术后显示上胸弯的自发矫正不能完全代偿主胸弯的主动矫正,术后左肩明显抬高。根据 Akel 等<sup>[10]</sup>的相关性研究,喙突高度差  $>9$  mm,锁骨角  $>2.5^\circ$ ,锁骨倾斜角差  $>4.5^\circ$  相当于临床双肩高度差  $>10$  mm。本例患者采用前路选择性主胸弯融合术后会出现轻度~中度双肩失衡。因此当术前左肩高或双肩等高,上胸弯为  $>30^\circ$  的结构性侧弯时,不宜采用方案 E。

3.2 Lenke 2 型 AIS 的后路手术及融合节段的选择 后路矫形手术一直是 Lenke 2 型 AIS 的金标准。Lenke 2 型 AIS 患者通常主胸弯比上胸弯更柔软,所以即使两个弯都固定和融合,仍有双肩不平衡的可能,这是因为主胸弯比上胸弯往往可以获得更多的矫形。因此确定是否需要将上胸弯进行融合及上端固定椎如何选择非常重要。

King 等<sup>[11]</sup>在分析 King V 型双胸弯患者后认为,  $T_1$  倾斜进入上胸弯凹侧(正性倾斜)且在 Bending 像上为结构性侧凸时应融合上胸弯。Winter 等<sup>[12]</sup>认为如果上胸弯在 Bending 像上能够矫正到主胸弯可能矫正的度数,那么就不需要融合上胸弯,因此 Bending 像对融合节段的选择非常重要。随着三维矫形技术的发展和胸椎弓根螺钉的应用,对上胸弯的认识和融合策略也逐渐发生了变化。Lenke 等<sup>[3]</sup>在 2001 年发表其 Lenke 分型时认为上胸弯在凸侧 Bending 像上  $\geq 25^\circ$  或  $T_2$ ~ $T_5$  的矢状面后凸  $\geq 20^\circ$  时为需要融合上胸弯。Rose 等<sup>[13]</sup>在选择融合节段方法上加入了术前双肩平衡情况的因素并较为具体地确定了上端融合椎的位置。对于存在 Lenke 2 型 AIS 患者的结构性上胸弯而言,术前左肩高的患者需要固定到  $T_2$  水平;术前双肩水平的患者可只固定到  $T_3$  水平,即部分固定上胸弯;对于术前右肩高的患者,尽管主胸弯的矫正可以抬高左肩,但考虑到上胸弯的柔韧性较差,单纯融合主胸弯后上胸弯主动回复的能力较弱,仍然需要部分固定上胸弯至  $T_3$  水平。国内邱贵兴等<sup>[14]</sup>对上胸弯融合策略的研究

也认为对于含有上胸弯、术前左肩高或双肩等高的 AIS 患者,手术矫形时应考虑融合上胸弯,以获得更好的上胸弯冠状面矫正率及避免或减少术后双肩失衡的发生。

本研究中,后路不同上端固定椎的矫形方案中,其矢状面后凸角的维持、顶椎旋转度的矫正及主胸弯冠状面 Cobb 角的矫正率均无显著性差别。本例患者术前左肩高,上胸弯的 Bending 像为  $35^\circ$ ,  $T_2$ ~ $T_5$  后凸角为  $20^\circ$ ,为僵硬性结构性上胸弯,按 Lenke 和 Rose 的理论,需完全融合上胸弯并固定到  $T_2$  水平。本研究中,随着后路向上延长上端固定椎,上胸弯的矫正率逐渐提高。方案 D 即后路选择性主胸弯融合,由于上胸弯的僵硬程度高,其自发性矫正率低,为 12.5%,不足以恢复正常的脊柱序列。方案 A 即完全融合上胸弯,上胸弯的矫正率最高,为 44.8%,基本恢复了脊柱正常的椎体序列。后路各矫形方案术后各双肩平衡影像学参数都不同程度升高,尤以方案 D 升高显著。除方案 A 外,其余各方案的喙突高度差均  $>9$  mm,锁骨角均  $>2.5^\circ$ ,锁骨倾斜角差均  $>4.5^\circ$ 。即除方案 A 外,其余各方案术后会出现轻度到中度双肩失衡。这主要与后路矫形采用主胸弯凹侧为矫形侧(通常为左侧),并行  $90^\circ$  去旋转有关,使得主胸弯矫形后左肩不可避免地抬高。而方案 A 采用上胸弯节段性凸侧加压和凹侧撑开技术,使左肩抬高具有可控性。方案 D 选择性主胸弯融合,其主胸弯的矫形力很难精确控制,使得左肩高进一步加重而导致双肩失衡。因此方案 A 可作为本例患者较为理想的手术方案。

3.3 双肩平衡状态的评估指标 相关文献中出现了很多用于评估双肩不平衡的影像学指标。在这些指标中,最常用的是  $T_1$  倾斜,由 Ginsburg 等<sup>[15]</sup>最早提出,  $T_1$  正性倾斜提示存在上胸弯,但  $T_1$  倾斜的方向往往与双肩倾斜的方向并不一致。因此,  $T_1$  倾斜方向不能够反映双肩的平衡情况。Kuklo 等<sup>[16]</sup>提出了放射学双肩高度差(radiographic shoulder height difference)的概念,是指站立位脊柱全长 X 线片上直接位于肩锁关节上方软组织阴影的高度差,并分为明显不平衡( $>3$  cm)、中度不平衡(2~3 cm)、轻度不平衡(1~2 cm)和平衡( $<1$  cm)。Akel 等<sup>[10]</sup>在分析正常青少年临床双肩高度差与影像学指标之间的相关性时,采用了包括喙突高度差(CPD)、锁骨角(CA)、锁骨肋骨交点高度差(CRID)、锁骨倾斜角差(CTAD)和  $T_1$  倾斜( $T_1$  tilt),认为在 X 线片上双侧肩关节包括在内清晰可见时,喙突高度差是相关性最高的首选。如果双侧肩关节不包括在 X 线片上,那么锁骨倾斜角差是预

测双肩平衡的最佳影像学指标。喙突高度差 $>9$  mm,锁骨角 $>2.5^\circ$ ,锁骨倾斜角差 $>4.5^\circ$ ,锁骨肋骨交点高度差 $>7.1$  mm被认为是相当于临床双肩高度差 $>10$  mm<sup>[17]</sup>。因此本研究采用与临床双肩高度差相关性较高的喙突高度差、锁骨角和锁骨倾斜角差作为评价双肩平衡的影像学参数。

综上所述,本研究利用三维有限元的方法,成功模拟了Lenke 2型AIS的前、后路不同矫形方案对双肩平衡的影响。对于本例左肩高的结构性上胸弯患者,后路上端固定椎选择T2可取得上胸弯、主胸弯的良好三维矫形,前路或后路选择性胸主弯融合容易导致术后轻度~中度双肩失平衡。但本研究也存在一些不足,有限元分析中采取了一定程度的简化,比如矫形过程中载荷和边界条件的设定和选取,以及软组织生物力学特性的线性简化处理等。因此,通过计算机模拟方法得到的结果更多是一种趋势上的预测,其实验结果的推广有待于更大样本量实验和临床实践的验证。

#### 4 利益冲突

所有作者声明本文不涉及任何利益冲突。

#### [参考文献]

[1] Sweet F A, Lenke L G, Bridwell K H, Blanke K M, Whorton J. Prospective radiographic and clinical outcomes and complications of single solid rod instrumented anterior spinal fusion in adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2001, 26:1956-1965.

[2] Kuklo T R, Lenke L G, Won D S, Graham E J, Sweet F A, Betz R R, et al. Spontaneous proximal thoracic curve correction after isolated fusion of the main thoracic curve in adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2001, 26:1966-1975.

[3] 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-A:1169-1181.

[4] 杨晓明, 顾苏熙, 李明, 余慧琴, 丁祖泉, 傅强, 等. 特发性脊柱侧凸椎体楔形变有限元模型分析[J]. *中国矫形外科杂志*, 2008, 16:1493-1495.

[5] Dwyer A F, Schafer M F. Anterior approach to scoliosis. Results of treatment in fifty-one cases[J]. *J Bone Joint Surg Br*,

1974, 56:218-224.

- [6] Zielke K, Pellin B. [New instruments and implants for supplementation of the arrington system][J]. *Z Orthop Ihre Grenzgeb*, 1976, 114:534-537.
- [7] Lonner B S, Kondrachov D, Siddiqi F, Hayes V, Scharf C. Thoracoscopic spinal fusion compared with posterior spinal fusion for the treatment of thoracic adolescent idiopathic scoliosis[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2006, 88:1022-1034.
- [8] Picetti G D III, Ertl J P, Bueff H U. Endoscopic instrumentation, correction, and fusion of idiopathic scoliosis[J]. *Spine J*, 2001, 1:190-197.
- [9] Lee C S, Chung S S, Shin S K, Park Y S, Park S J, Kang K C. Changes of upper thoracic curve and shoulder balance in thoracic adolescent idiopathic scoliosis treated by anterior selective thoracic fusion using VATS[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2011, 24:462-468.
- [10] Akel I, Pekmezci M, Hayran M, Genc Y, Kocak O, Derman O, et al. Evaluation of shoulder balance in the normal adolescent population and its correlation with radiological parameters[J]. *Eur Spine J*, 2008, 17:348-354.
- [11] King H A, Moe J H, Bradford D S, Winter R B. The selection of fusion levels in thoracic idiopathic scoliosis[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1983, 65:1302-1313.
- [12] Winter R B, Denis F. The King V curve pattern: its analysis and surgical treatment[J]. *Orthop Clin North Am*, 1994, 25:353-362.
- [13] Rose P S, Lenke L G. Classification of operative adolescent idiopathic scoliosis: treatment guidelines[J]. *Orthop Clin North Am*, 2007, 38:521-529.
- [14] 邱贵兴, 王以朋, 于斌, 仇建国, 沈建雄, 翁习生, 等. 含有上胸弯的青少年特发性脊柱侧凸患者的矫形效果分析[J]. *中华外科杂志*, 2007, 45:520-524.
- [15] Ginsburg H, Goldstein L, DeVanny J. An evaluation of upper thoracic curve in idiopathic scoliosis: guidelines in the selection of the fusion area[C]. *The Annual Meeting of the Scoliosis Research Society, Hong Kong*, 1977.
- [16] Kuklo T R, Lenke L G, Graham E J, Won D S, Sweet F A, Blanke K M, et al. Correlation of radiographic, clinical, and patient assessment of shoulder balance following fusion versus nonfusion of the proximal thoracic curve in adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2002, 27:2013-2020.
- [17] Uzumcugil O, Atici Y, Ozturkmen Y, Yalcinkaya M. Evaluation of shoulder balance through growing rod intervention for early-onset scoliosis[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2011, 11:10-16.

[本文编辑] 尹茶