

Lenke 1A 和 2A 型青少年特发性脊柱侧凸远端融合椎选择与远端叠加现象的研究进展

Lowest instrumented vertebra selection and distal adding-on phenomenon in Lenke 1A and 2A adolescent idiopathic scoliosis

殷睿,秦晓东,何中,刘臻,邱勇,朱泽章

(南京大学医学院附属鼓楼医院脊柱外科 210008 南京市)

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2021.02.11

中图分类号: R682.3, R619 文献标识码: A 文章编号: 1004-406X(2021)-02-0173-05

远端叠加现象(adding-on, AO)指脊柱畸形矫正术后固定远端发生的主弯延长,椎体累及数目叠加的现象^[1]。包括:(1)远端融合椎(lowest instrumented vertebra, LIV)下位椎间盘成角增加 $>5^{\circ}$;(2)LIV 下位椎体偏离骶骨中线(central sacral vertical line, CSVL)距离增加 $>5\text{mm}$ (图 1)。AO 的发生率较高,为 12.9%~51.1%^[1-5],且可引起腰背疼痛甚至躯干再次失衡而需要翻修等^[6,7]。寻找其发生的危险因素并加以预防,成为脊柱外科医生关注的重点。Cho 等^[8]发现年龄小、Risser 征低的患者更易发生 AO。孙旭等^[9]的研究也发现 Risser 征 0~1 级组和 2~3 级组 AO 的发生率显著高于 4~5 级组;Y 软骨开放组 AO 发生率同样远高于 Y 软骨闭合组。由此可见,骨骼的成熟度在 AO 的发生中有着重要的影响。同样,弯度的过度矫正也易发生 AO。Yang 等^[10]认为术后即刻腰弯的 Cobb 角大小是 Lenke 1、2 型青少年特发性脊柱侧凸(AIS)患者 AO 发生的危险因素。Yang 等^[10]归纳总结了前人的研究成果并进行 Meta 分析,结果发现,和非 AO 患者相比,发生 AO 患者术前的上胸弯、主胸弯、腰弯、锁骨角、T1 倾斜角和肩部高度差普遍较小,而上胸弯的术后矫正率较大。术前较小的上胸弯、主胸弯、腰弯,较大术前冠状面和矢状面的失衡以及冠状面与矢状面的过度矫正可视为 AO 发生的危险因素。

除此以外,与 AO 发生关系最为密切的便是 LIV 的选择^[1,4,6-8,11-19]。Parisini 等^[20]早就提出了 AO 的发生与 LIV 相关,在入选的 31 例患者中有 4 例发生了 AO,危险因素包括 LIV 的选择。随后 Wang 等^[11]分析了 Lenke 1A 型患者 AO 发生的危险因素,在对 45 例患者的回顾性研究中,发现 AO 的发生与 LIV 的选择高度相关。AO 发生与 LIV 选择的关系逐渐得到了广大学者的关注并得以深入研究。笔者将对 Lenke 1A 和 2A 型 AIS 患者 LIV 选择与远端 AO 的研究进展综述如下。

第一作者简介:男(1994-),在读硕士研究生,研究方向:脊柱外科
电话:(025)68182022 E-mail:rayinspine@gmail.com
通讯作者:朱泽章 E-mail:zhuzezhong@126.com

1 端椎(EV)、中立椎(NV)和稳定椎(SV)

既往学者们在主胸弯的远端定义了三个独特的标志性椎体:端椎(ending vertebra, EV)、中立椎(neutral vertebral, NV)和稳定椎(stable vertebral, SV)。EV 是指结构性弯远端最倾斜的椎体;NV 是指在结构性弯的远端保持旋转中立位的椎体,其两侧椎弓根在全脊柱正位 X 线片上保持对称;SV 则是 EV 远端第一个被 CSVL 平分的椎体(图 2)。早期,根据 Harrington 等^[21]提出的治疗原则,LIV 至少要选择 SV。Lenke 等^[22]也认为,远端融合至 SV 最为安全。如果不遵守该原则,约 22% 的 AIS 患者可能出现术后失代偿。King 等^[23]认为,在 King 3 型(Lenke 1A)和 4 型(Lenke 2A)患者中,LIV 应选择在第一个被骶骨中线平分的椎体,即 SV。Moe 等^[24]和 Tambornino 等^[25]则建议融合节段应包括所有同向旋转的椎体而止于 NV。随着内固定系统的不断发展,第三代三维矫形内固定系统已经被脊柱外科医生广泛采用,尽管现在有多种内固定的方式,椎弓根螺钉系统凭借其优异的多平面矫正能力,较短的融合时间和更低置入失败率,已成为 AIS 三维矫形的主流内固定方式^[26-31]。

立足于三维矫形时代,Suk 等^[32]首先提出以 NV 作为基准选择 LIV,认为 Harrington 时期选择 SV 作为 LIV 并不适合当前的椎弓根螺钉系统。这是由于椎弓根螺钉所固有的去旋转能力,可能使得术后的 SV 与术前的 SV 并不一致^[33]。基于使用椎弓根螺钉系统治疗的 42 例 AIS 患者的回顾性研究,Suk 等提出,当术前 NV 与 EV 的距离不大于 2 个椎体时(即 $NV-EV \leq 2$),LIV 应融合至 NV;若术前 NV 与 EV 的距离大于 2 个椎体(即 $NV-EV > 2$),LIV 选择在 NV-1 效果良好;当 LIV 选择在 NV-2 或 NV-3 时,AO 的发生率显著升高^[32]。耿翔等^[17]在一项包含 54 例 Lenke 1 型脊柱侧凸患者的研究中发现,固定到 NV 是最佳选择。当 NV-1 作为 LIV 时,术前 LIV 偏离 CSVL 的距离超过 10mm 容易发生 AO。

张宏志等^[34]对 Suk 的理论做出了修改,他们在对 72 例患者的回顾性研究中发现,在 Lenke 1 型中存在 $EV \geq$

NV $\geq$ SV($\geq$ 表明位于近端或者重合)的关系,在这 72 例患者中,有 16 例患者存在 NV、SV 相差一个椎体以上的现象(即 SV-NV $\geq$ 2),对于这部分患者,根据 Suk 原则,将前 6 例患者的 LIV 定在 NV,而剩下的 10 例则融合至 SV 的上一个椎体(即 SV-1),在平均 15.9 个月的随访中发现,前 6 例患者有 2 例出现轻度冠状面失衡,矫正率也显著低于后 10 例,因此他们提出,当 NV、SV 相差 $\leq$ 1 个椎体时(即 SV-NV $\leq$ 1),按照 Suk 的原则理论上可以取得良好的效果;但当 NV、SV 相差 $\geq$ 2 个椎体时(即 SV-NV $\geq$ 2),LIV 应选择 SV-1。同样是基于 SV 的角度考虑,Erdemir 等^[35]对 69 例行后路选择性融合的 Lenke 1A 型患者进行了分析,根据腰椎旋转程度将患者分为三组:在第一组中,腰椎是中立的;在第二组中,腰椎旋转的方向与主弯相同;在第三组中,腰椎旋转的方向与主弯相反。根据这样的分类,作者发现并非所有 Lenke 1A 型患者根据 NV 进行 LIV 的选择都能产生令人满意的结果,对于第二组患者,LIV 的选择仍需参考 SV。孙旭等^[9]也发现,当 LIV 选择在距离 SV 一个椎体以内时(即 SV-LIV $\leq$ 1),AO 的发生率明显降低;相反,当选择在距离 SV 两个或两个以上椎体时(即 SV-LIV $\geq$ 2),易出现 AO。

2007 年,Lenke 等^[36]在原先的 Lenke 分型基础上进行了补充,并建议对 Lenke 1 型患者应以 LEV 作为 LIV 选择的参考。他们认为,对于 Lenke 1A 型的患者,LIV 通常选择 TL/L 区域最靠近头端且与骶骨中线相交的椎体,它通常比主胸弯的 LEV 低一级,即选择 LEV+1;Lenke 2 型的选择往往也与 1 型相似。Sarlak 等^[37]则根据 L3 和 L4 椎体的倾斜情况,将 Lenke 1A 型分为 4 个亚型:1A-A 型,L3 和 L4 椎体位于中立位,这也是最为常见的一种情况(52.7%);1A-B 型,L3 右倾而 L4 保持中立位(27.7%);1A-C 型,这是一种和 King 4 型非常相似的弯型,其 L3 和 L4 都倾向右侧(8.3%);1A-D 型:L3 中立而 L4 左倾(11.1%)。基于这种分型,他们对 36 例 Lenke 1A 型患者开展了平均随访时间为 52.1 个月的回顾性研究,发现在 1A-A 和 1A-D 的弯型中,远端融合应该延伸至 LEV-1;而在 1A-B 和 1A-C 的弯型中,LIV 选择在 LEV 是相当必要的。其研究结果证实,在 Lenke 1A 和 2A 型患者的 LIV 选择中,LEV 同样是有力的参考指标。

无论是根据以上何种椎体作为 LIV 选择的主要参考指标,众多学者的研究显示患者均可取得良好的预后情况。具体如何选择,还得视患者情况和医生的过往经验加以权衡。但对于 EV、NV、SV 的定位,却存在着一定观察者间的偏倚。Potter 等^[38]对于 AIS 患者 EV、NV、SV 的可靠性进行了研究,作者让 3 名不同年资的医生(住院医、低年资主治医师和高年资主治医师)对 100 例预行矫形手术的患者进行术前的影像学评估,结果显示,对于 EV、NV 和 SV 判定,观察者内可重复性很好,并且随着观察者经验的增加而增加,但是观察者间的可靠性则显得不尽如人意,对于 EV、NV 和 SV,观察者之间的一致性分别为 48.5%、41.7%

和 51%。故而寻找一个可重复性高、观察者间差异性小的参考椎体,便成了一个全新的探索方向。

2 远端触及椎(lasting touching vertebra,LTV)

Cho 等^[8]定义了一个全新的参考椎体,触及椎(touching vertebra,TV)或 LTV。LTV 是指在远端第一个接触骶骨中线的椎体。借由此定义,Matsumoto 等^[18]在一项包含 112 例 Lenke 1A 型 AIS 患者的回顾性研究中发现,当 LIV 位于 LTV 近端时,二者距离越远,术后 AO 的发生率越高,建议将 LIV 的选择延伸至 LTV,以避免术后 AO 的发生。Cao 等^[7]对 116 例 Lenke 2A 型的患者进行同样的研究,根据 LIV 相对于 LTV 的位置关系将患者分成了三组:LIV<LTV 组、LIV=LTV 组、LIV>LTV 组,长达 2 年的随访发现,选择 LTV 作为 LIV 能够有效避免 AO 的发生。随后 Clément 等^[39]对 Lenke 1 和 2 型患者术后远端第一个未融合椎体的倾斜情况进行了长达 5 年的随访研究,在 182 例患者的多中心研究中,无论腰椎的修正型是 A、B 或 C,Lenke 1 型和 2 型的患者以 LTV 作为 LIV 都可以取得良好的预后效果。Zang 等^[40]对严重且僵硬的侧凸患者的 AO 发生和 LIV 选择进行了研究,在 48 例严重侧凸患者中,除了术后即刻主弯的过度矫正,LIV 位于 LTV 近端与 AO 的发生显著相关,而融合至 LTV 及其远端则可很好地避免 AO 的发生。可见对于重度侧凸患者,LTV 依然是一个可靠的选择。

同样是基于对 LTV 的理解,对 LIV 的选择还有另一种意见。施剑雄等^[41]在对 43 例 Lenke 1A 型患者行后路椎弓根螺钉选择性胸椎融合的研究中,再次证实 AO 的发生与 LIV 的选择密切相关,LIV 延伸至 LTV+1 可有效防止术后 AO 的发生。他们认为,尽管 Matsumoto 等^[18]在 112 例患者术后 2 年多的随访结果研究中仅 21 例发生 AO(18.8%),但因为该研究为多中心研究,难以对所用矫形器械和矫形手法加以控制,故结果存在一定缺陷。因此,LIV 选择在 LTV 是不够的,应选择 LTV+1 进行融合。近来,Joo 等^[42]又从骶骨倾斜的角度对 Lenke 1A 型患者 LIV 的选择进行了分析,在 126 例患者中,有 36 例(28.6%)出现了骶骨倾斜,其中骶骨右倾通常发生在 King 3 型中,而骶骨左倾则在 King 4 型中多见;骶骨右倾的患者 LTV 位置较低,因此其 LIV 的选择常常位于 LTV 近端,增加了 AO 的发生风险。因此,外科医生们在保留更多运动节段和预防 AO 的发生之间很难取舍。未来需要更大样本量和更长随访时间的研究去探索其中合理选择的奥秘。

3 充分触及椎(last substantially touched vertebra,LSTV)

既往学者对于 LIV 的选择仍存在一定争议,有的学者建议 LTV,有的则倾向于 LTV+1。其关键在于研究者对于 LTV 的判断仍不够准确。有时 CSVL 仅触及椎体的一角,此时很难判断该椎体是否为 LTV。为了解决这个问题,

广大学者的注意力从 LTV 逐渐转移到 LSTV。LSTV 是指骶骨中线与椎弓根相交或位于两侧椎弓根之间的最头端的腰椎^[9]。过往学者依据 L4 的倾斜方向,将 Lenke 1A 型分为两个亚型,1A-R 和 1A-L^[43],Lenke 1A-R 型的患者发生远端 AO 的几率是 1A-L 型患者 2.2 倍,并建议对该型患者应选择 LSTV 作为 LIV。Murphy 等^[46]将 LSTV 的应用从 Lenke 1 型延伸至 Lenke 2 型,他们研究了 2008~2012 年间 Lenke 1A 和 2A 且为 AR 修正型(即 L4 右倾),并行后路融合患者的预后情况和远端 AO 的危险因素,不仅是 Lenke 1A-R 型,选择 LSTV 作为 LIV 的 Lenke 2A-R 型患者术后远端 AO 的发生率同样显著性降低。所以 LSTV 作为 LIV 适用于 Lenke 1A 和 2A 型、伴 L4 向右倾斜的 AIS 患者。随后 Bai 等^[43]就选择 LSTV 作为 LIV 的 Lenke 1A 和 2A 型的患者进行了预后分析研究,在对 120 例患者随访时间至少为 3 年的回顾性研究中证实,不只是 L4 右倾的患者,凡是融合至 LSTV 的 Lenke 1A、2A 型患者均获得了良好的预后。以 LSTV 为标准,不单单有利于降低患者术后 AO 的发生,减少失代偿的风险,同样也简化了 LIV 的选择。

虽然 LSTV 被广泛认可和采用,但对于 TV 的认识并没有因此而停滞。Qin 等^[44]在 LSTV 的基础之上,又重新定义了非充分触及椎(non-substantially touched vertebral, nSTV)(图 3)。nSTV 是指骶骨正中线位于椎体的边缘和椎弓根外侧的 LTV。区分 STV 和 nSTV,不单单优化了 LIV 的选择,同样降低了术后远端发生 AO 的风险。该研究分析了 104 例行后路融合的 Lenke 1A 型的患者,并对他们进行了长达至少 2 年的随访,结果显示,远端融合延伸至 LSTV 或者 nSTV+1 节段时,都能获得良好的效果。nSTV 的提出是对 TV 概念的又一次拓展延伸。同样,Xu 等^[44]对

TV 也有新的理解。他们尝试将“触及”现象分为 A、B、C 三种类型:A 型,骶骨中线位于椎体边缘并未触及椎弓根。这类似于 nSTV;B 型,骶骨中线仅仅触及椎弓根;C 型,骶骨中线位于两侧椎弓根内。在该研究中,92 例 AIS 患者有 22 例术后发生了 AO,其中 18 例患者 LIV 的选择是“触及”A 型,4 例是 B 型,而 C 型术后未见 AO 的发生。他们建议最佳的 LIV 选择是融合至“触及”C 型,这样可以最大限度地保证腰椎的活动性,且术后的 SRS-22 评分与较短融合节段的控制组无显著性差异。值得一提的是,该研究囊括了从 Lenke 1 型至 Lenke 6 型中除了 Lenke 4 以外所有的分型,这使得他们的研究结果对于单纯 Lenke 1A 和 2A 型的 LIV 选择指导意义不那么明确。尽管如此,“触及”分型仍可以作为 LIV 选择的参考,并有待进一步的研究。

4 其他

除了熟知的 EN、NV、SV 和 TV,还有一些其他的选择方式,例如远端第一个偏离骶骨中线 10mm 的椎体(the first vertebra in cephalad direction from sacrum with deviation from CSVL of more than 10mm, DV)。Wang 等^[4]首次提出了 DV 这一概念。他们在研究中发现,LIV 的选择与术后 AO 的发生强相关。当术前的 LIV+1 偏离骶骨中线超过 10mm,AO 的发生率显著提高;当选择 DV 作为 LIV 时,不但可以预防术后 AO 的发生,同时对于腰椎活动性的保留有很好的效果。为了更好地预测 AO 的发生风险,Yang 等^[49]还提出了 Dnfs (number of vertebra from the first non-fused vertebra to L5 vertebra),并引入了 AO 指数(adding-on index, ADI)的概念。其中 Dnfs 表示远端未融合的椎体数目。作者根据回归分析的结果,给出了 ADI 的计算公式: $ADI=4 \times Dnfs$ -术后即刻的腰弯角度;当 $ADI > 12$

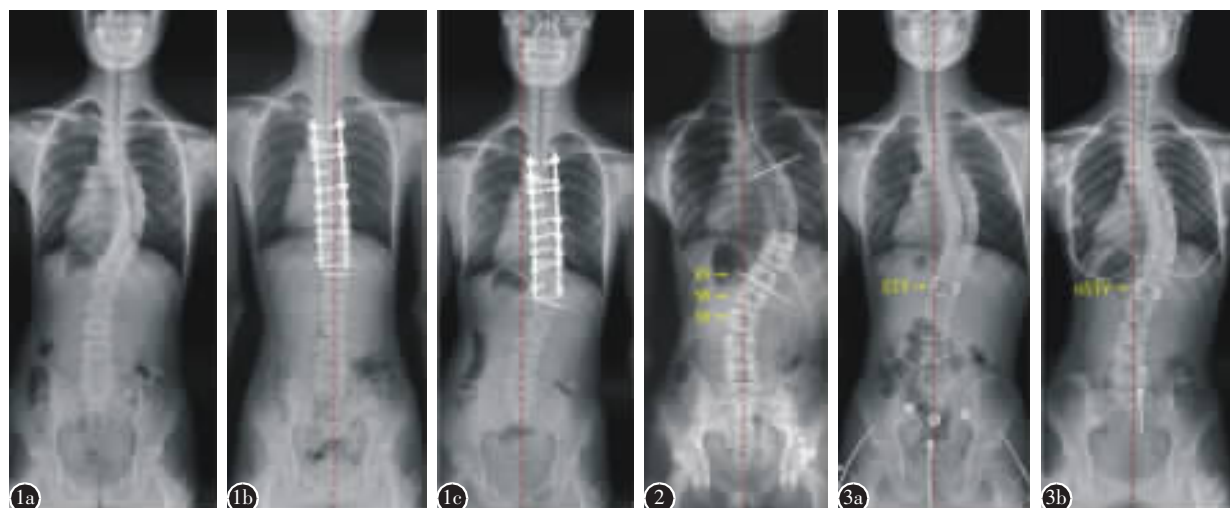


图1 患者女,12岁,Lenke 1A型 AIS患者,术后发生远端叠加现象 a 术前正位片示胸弯 Cobb角 48°,Risser 0级 b 术后正位片示胸弯 Cobb角矫正至 8°,LIV 为 L1,LIV 下位椎间盘成角 0° c 术后 3 个月随访时 X 线正位片示胸弯 Cobb角 17°,LIV 下位椎间盘成角 12°
图2 端椎(EV)、中立椎(NV)和稳定椎(SV)确定方法:EV,指结构性弯远端最倾斜的椎体;NV,指结构性弯远端处于旋转中立位的椎体;SV,指远端第一个被骶骨中线平分的椎体 图3 充分触及椎(STV)和非充分触及椎(nSTV)确定方法 a STV,指骶骨正中线切过一侧椎弓根或位于两侧椎弓根之间的远端触及椎 b nSTV,指骶骨正中线位于椎弓根外缘与椎板边缘之间的远端触及椎

时, AO 的发生率为 88%。

基于以往的研究, Qin 等^[12]还将 AO 现象分为进展型和非进展型, 进展型 AO 指的是在初次发现 AO 后的进一步随访中, LIV 下位椎间盘成角增加 $>5^{\circ}$ 和/或 LIV 下位椎体偏离骶骨中线距离增加 $>5\text{mm}$; 其中进展型占有 AO 的 39.3%; 骨骼成熟度低, 术后左肩高, LIV 位于 LSTV 的近端是进展型 AO 的危险因素。

5 总结与展望

目前, 学者们已提出许多方法来确定 LIV 的选择, 以确保更高的矫正率并预防术后 AO 的发生。但关于 LIV 的选择, 依然没有形成一个统一的标准。随着研究的深入, 大家的目光也从原先 EV、NV、SV 逐渐转向 TV。LSTV 逐渐得到大家的认可, nSTV 的提出又对 LSTV 进行了补充。但当前的研究更多的考虑还是冠状面的平衡, 在矢状面乃至横断面的分析还有所欠缺。LIV 的选择同样是腰椎前凸丢失和术后远端交界性后凸的危险因素^[44-46], 而术后的肩平衡也与 AO 的发生和发展密切相关^[12, 47]。伴随着理论的创新和科技的进步, 基于三维角度或与人工智能相结合选择 LIV, 预测患者预后, 让患者获得最佳矫正的同时保留更多的腰椎活动度, 仍是今后研究的重要方向^[48-50]。

6 参考文献

- Wang Y, Hansen ES, Hoy K, et al. Distal adding-on phenomenon in Lenke 1A scoliosis: risk factor identification and treatment strategy comparison[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2011, 36(14): 1113-1122.
- Suk SI, Kim JH, Lee SM, et al. Determination of distal fusion level with segmental pedicle screw fixation in single thoracic idiopathic scoliosis[J]. Spine, 2003, 28(5): 484-491.
- Wang Y, Bunger CE, Zhang Y, et al. Distal adding on in lenke 1a scoliosis: what causes it? how can it be prevented [J]. Spine Deform, 2014, 2(4): 301-307.
- Qin X, Sun W, Xu L, et al. Selecting the last "substantially" touching vertebra as lowest instrumented vertebra in Lenke type 1A curve[J]. Spine, 2016, 41(12): E742-E750.
- Yang C, Li Y, Yang M, et al. Adding-on phenomenon after surgery in Lenke type 1, 2 adolescent idiopathic scoliosis: is it predictable[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2016, 41(8): 698-704.
- Yang C, Li Y, Yang M, et al. Adding-on phenomenon after surgery in Lenke type 1, 2 adolescent idiopathic scoliosis[J]. Spine, 2016, 41(8): 698-704.
- Cao K, Watanabe K, Kawakami N, et al. Selection of lower instrumented vertebra in treating Lenke type 2A adolescent idiopathic scoliosis[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2014, 39(4): E253-261.
- Cho RH, Yaszay B, Bartley CE, et al. Which Lenke 1A curves are at the greatest risk for adding-on... and why [J]. Spine, 2012, 37(16): 1384-1390.
- 孙旭, 邱勇, 孙超, 等. 特发性胸椎侧凸选择性融合术后远端叠加现象[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2013, 23(2): 103-108.
- Yang M, Zhao Y, Yin X, et al. Prevalence, risk factors, and characteristics of the "adding-on" phenomenon in idiopathic scoliosis after correction surgery[J]. Spine, 2018, 43(11): 780-790.
- 秦晓东, 夏超, 薛冰川, 等. 青少年特发性脊柱侧凸术后远端叠加现象的自然史研究[J]. 中华骨科杂志, 2018, 38(4): 220-227.
- Qin X, Xia C, Xu L, et al. Natural history of postoperative adding-on in adolescent idiopathic scoliosis: what are the risk factors for progressive adding-on [J]. Biomed Res Int, 2018, 2018: 3247010.
- Bai J, Chen K, Wei Q, et al. Selecting the LSTV as the lower instrumented vertebra in the treatment of Lenke types 1A and 2A adolescent idiopathic scoliosis[J]. Spine, 2018, 43(7): E390-E398.
- Xu W, Chen C, Li Y, et al. Distal adding-on phenomenon in adolescent idiopathic scoliosis patients with thoracolumbar vertebra fusion [J]. Medicine, 2017, 96(38): e8099.
- Cho W, Faloony MJ, Essig D, et al. Additional risk factors for adding-on after selective thoracic fusion in adolescent idiopathic scoliosis: implication of lowest instrumented vertebra angle and lumbosacral takeoff[J]. Spine Deform, 2018, 6(2): 164-169.
- Murphy JS, Upasani VV, Yaszay B, et al. Predictors of distal adding-on in thoracic major curves with ar lumbar modifiers[J]. Spine, 2017, 42(4): E211-E218.
- 耿翔, 王孝宾, 吕国华, 等. Lenke 1A 型青少年特发性脊柱侧凸患者胸弯融合术后附加现象的原因分析[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2013, 23(7): 622-627.
- Matsumoto M, Watanabe K, Hosogane N, et al. Postoperative distal adding-on and related factors in Lenke type 1A curve [J]. Spine, 2013, 38(9): 737-744.
- Yang C, Li Y, Yang M, et al. Adding-on phenomenon after surgery in lenke type 1, 2 adolescent idiopathic scoliosis: is it predictable[J]. Spine, 2015, 41(8): 698-704.
- Parisini P, Di Silvestre M, Lolli F, et al. Selective thoracic surgery in the Lenke type 1A: King III and King IV type curves[J]. Eur Spine J, 2009, 18(Suppl 1): 82-88.
- Harrington PR. Treatment of scoliosis: correction and internal fixation by spine instrumentation[J]. J Bone Joint Surg Am, 1962, 44: 591-610.
- Lenke LG, Bridwell KH, Baldus C, et al. Preventing decompensation in King type II curves treated with Cotrel-Dubousset instrumentation: strict guidelines for selective thoracic fusion[J]. Spine, 1992, 17(8 Suppl): S274-281.
- King HA, Moe JH, Bradford DS, et al. The selection of fusion levels in thoracic idiopathic scoliosis[J]. J Bone Joint Surg Ame, 1984, 65(9): 1302-1313.
- Moe J. A critical analysis of methods of fusion for scoliosis:.

- an evaluation in two hundred and sixty-six patients [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1958, 40(3): 529-554.
25. Tambornino JM, Armbrust EN, Moe JH. Harrington instrumentation in correction of scoliosis: a comparison with cast correction[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1964, 46(2): 313-321.
26. Rafi S, Munshi N, Abbas A, et al. Comparative analysis of pedicle screw versus hybrid instrumentation in adolescent idiopathic scoliosis surgery[J]. *J Neurosci Rural Pract*, 2016, 7(4): 550-553.
27. Lehman RA Jr, Lenke LG, Keeler KA, et al. Operative treatment of adolescent idiopathic scoliosis with posterior pedicle screw-only constructs: minimum three-year follow-up of one hundred fourteen cases [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2008, 33(14): 1598-1604.
28. Karatoprak O, Unay K, Tezer M, et al. Comparative analysis of pedicle screw versus hybrid instrumentation in adolescent idiopathic scoliosis surgery[J]. *Int Orthop*, 2008, 32(4): 523-529.
29. Lehman RA Jr, Lenke LG, Keeler KA, et al. Computed tomography evaluation of pedicle screws placed in the pediatric deformed spine over an 8-year period [J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2007, 32(24): 2679-2684.
30. Kuklo TR, Potter BK, Lenke LG, et al. Surgical revision rates of hooks versus hybrid versus screws versus combined anteroposterior spinal fusion for adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2007, 32(20): 2258-2264.
31. Kim YJ, Lenke LG, Kim J, et al. Comparative analysis of pedicle screw versus hybrid instrumentation in posterior spinal fusion of adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2006, 31(3): 291-298.
32. Suk SI, Lee SM, Chung ER, et al. Determination of distal fusion level with segmental pedicle screw fixation in single thoracic idiopathic scoliosis[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2003, 28(5): 484-491.
33. Suk SL, Lee SM, Chung ER, et al. Selective thoracic fusion with segmental pedicle screw fixation in the treatment of thoracic idiopathic scoliosis: more than 5-year follow-up[J]. *Spine*, 2005, 30(14): 1602-1609.
34. 张宏志, 张永刚, 张雪松, 等. 后路选择性融合治疗青少年特发性脊柱侧凸单胸弯[J]. *中华医学杂志*, 2007, 87(9): 599-601.
35. Erdemir C, Musaoglu R, Selek O, et al. Distal fusion level selection in Lenke 1A curves according to axial plane analyses[J]. *Spine J*, 2015, 15(11): 2378-2384.
36. Lenke LG. The Lenke classification system of operative adolescent idiopathic scoliosis [J]. *Neurosurg Clin N Am*, 2007, 18(2): 199-206.
37. Sarlak AY, Atmaca H, Kim WJ, et al. Radiographic features of the Lenke 1A curves to help to determine the optimum distal fusion level selection [J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2011, 36(19): 1592-1599.
38. Potter BK, Rosner MK, Lehman RA, et al. Reliability of end, neutral, and stable vertebrae identification in adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Spine*, 2005, 30(14): 1658-1663.
39. Clément JL, Solla F, Morin C, et al. Five-year outcomes of the first distal uninstrumented vertebra after posterior fusion for adolescent idiopathic scoliosis Lenke 1 or 2 [J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2017, 103(5): 727-731.
40. Zang L, Hai Y, Yuan S, et al. Distal adding-on and risk factors in severe and rigid scoliosis[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2017, 42(3): 160-168.
41. 施剑雄, 叶峰, 周跃, 等. 主胸弯型特发性脊柱侧凸后路选择性胸弯融合术后远端叠加现象的危险因素分析[J]. *中国修复重建外科杂志*, 2016, 30(10): 1258-1263.
42. Joo YS, Hwang CJ, Cho JH, et al. Does sacral slanting affect distal adding-on in Lenke type 1A adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Spine*, 2018, 43(17): E990-E997.
43. Miyajiri F, Pawelek JB, Van Valin SE, et al. Is the lumbar modifier useful in surgical decision making? defining two distinct Lenke 1A curve patterns[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2008, 33(23): 2545-2551.
44. Trobisch PD, Samdani AF, Betz RR, et al. Analysis of risk factors for loss of lumbar lordosis in patients who had surgical treatment with segmental instrumentation for adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Eur Spine J*, 2013, 22(6): 1312-1316.
45. Yang J, Andras LM, Broom AM, et al. Preventing distal junctional kyphosis by applying the stable sagittal vertebra concept to selective thoracic fusion in adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Spine Deformity*, 2018, 6(1): 38-42.
46. Fischer CR, Lenke LG, Bridwell KH, et al. Optimal lowest instrumented vertebra for thoracic adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Spine Deformity*, 2018, 6(3): 250-256.
47. Cao K, Watanabe K, Hosogane N, et al. The association of postoperative shoulder balance with adding-on in Lenke type II adolescent idiopathic scoliosis [J]. *Spine*, 2014, 39(12): E705-E712.
48. Pasha S, Flynn J. Data-driven classification of the 3d spinal curve in adolescent idiopathic scoliosis with an applications in surgical outcome prediction [J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 16296.
49. Kadoury S, Mandel W, Roy-Beaudry M, et al. 3D morphology prediction of progressive spinal deformities from probabilistic modeling of discriminant manifolds [J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2017, 36(5): 1194-1204.
50. Kim JS, Arvind V, Oermann EK, et al. Predicting surgical complications in patients undergoing elective adult spinal deformity procedures using machine learning[J]. *Spine Deformity*, 2018, 6(6): 762-770.

(收稿日期:2020-06-23 末次修回日期:2020-07-21)

(本文编辑 卢庆霞)