

DOI: 10.16781/j.0258-879x.2019.04.0356

· 专题报道 ·

特发性脊柱侧凸的生物力学特点及治疗策略研究进展

邹一鸣¹, 赵 检², 白锦毅², 杨长伟², 康一凡^{1*}

1. 海军军医大学(第二军医大学)东方肝胆外科医院骨科, 上海 200438

2. 海军军医大学(第二军医大学)长海医院骨科脊柱外科, 上海 200433

[摘要] 特发性脊柱侧凸是一种病因未明的脊柱畸形疾病, 在其发病过程与治疗方法选择上, 生物力学因素起着重要作用。脊柱及其附件的空间载荷不均等、椎体发育的不平衡以及骨盆倾斜和旋转导致的基座不稳均对特发性脊柱侧凸的病情演变有重要影响, 而支具治疗和椎弓根钉棒系统治疗都以生物力学特点为中心不断发展进步。本文从发病过程和治疗策略出发, 总结了特发性脊柱侧凸的生物力学特点。

[关键词] 特发性脊柱侧凸; 生物力学; 病因学; 治疗

[中图分类号] R 682.13 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0258-879X(2019)04-0356-06

Biomechanical characteristics and therapy strategy of idiopathic scoliosis: research advances

ZOU Yi-ming¹, ZHAO Jian², BAI Jin-yi², YANG Chang-wei², KANG Yi-fan^{1*}

1. Department of Orthopedics, Eastern Hepatobiliary Surgery Hospital, Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200438, China

2. Department of Spine Surgery, Changhai Hospital, Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

[Abstract] Idiopathic scoliosis is a spinal deformity without clear etiology, and biomechanical factors play an important role in its pathogenesis and treatment. The spatial load inequality of the spine and its accessories, the unbalanced development of the vertebral body, and the pedestal instability caused by pelvic inclination and rotation have important influences on the development of idiopathic scoliosis. Both brace therapy and pedicle screw-rod system therapy are based on biomechanical characteristics and are continuously progressing. This review sums up the research advances on biomechanical characteristics of idiopathic scoliosis and its therapy strategy in recent years.

[Key words] idiopathic scoliosis; biomechanics; etiology; therapy

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2019, 40(4): 356-361]

脊柱是维持躯干平衡的最重要的组织结构。正常情况下, 脊柱从冠状面来看呈垂直状态, 从矢状面来看有颈椎前凸、胸椎后凸、腰骶椎前凸 3 个生理弯曲^[1], 但力线分布依旧是平衡的, 这就使各段脊柱分担了来自身体重力和胸腹腔的各种压力。当这种平衡被打破, 就会发生脊柱畸形。脊柱侧凸是脊柱畸形的一种, 即脊柱的一个或多个节段偏离了平衡状态, 主要表现为冠状面向一侧的偏移、矢状面胸椎后凸的减少和水平面椎体的旋转, 失去了生理上的平衡状态, 并在不对称的

生长发育、重力作用等力学因素的影响下逐渐加重, 导致肋骨受压变形, 颈胸椎生理曲度变直, 甚至随着胸腔、腹腔的变形, 压迫心肺等器官^[2], 导致各种并发症, 影响外观甚至降低预期寿命^[3]。脊柱侧凸类型多样, 病因也各不相同, 人群中最多见的是特发性脊柱侧凸(idiopathic scoliosis, IS)^[4]。在 IS 病程变化过程及手术矫形过程中, 生物力学因素及其对治疗的指导起到了举足轻重的作用。本文就目前国内外关于 IS 的生物力学特点及相应治疗策略综述如下。

[收稿日期] 2018-12-24 **[接受日期]** 2019-04-04

[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] 邹一鸣, 硕士生, 住院医师. E-mail: meraul@sina.com

*通信作者(Corresponding author). Tel: 021-81887675, E-mail: kangyfl1@163.com

1 IS 发病的生物力学因素

IS 常发生于青少年时期, 病因未明, 发病率约为 1%~3%, 女性多见^[5-6]。长期以来, 学者们致力于 IS 病因的探索, 找到了一些发病的影响因素, 如染色体遗传因素^[7-8]、褪黑素分泌因素^[9]、结缔组织因素^[10]、神经系统发育因素^[11]、生长速度不平衡因素^[12]等, 但均不能完全解释。虽病因尚未明确, 但在脊柱侧凸进展的过程中生物力学因素起到了主导作用。脊柱空间上的载荷不均等、椎体生长发育的不平衡以及骨盆倾斜等是导致脊柱侧凸逐渐加重的重要原因^[13]。

1.1 脊柱空间上的载荷不均等 脊柱的空间结构精巧复杂, 但为了支撑直立行走, 脊柱胸段、腰段的负荷较大, 容易发生损伤及退变。脊柱侧凸病程长, 大多数患者病情进展较慢。Villemure 等^[14]利用长期随访数据建立三维有限元模型对脊柱侧凸的进展情况进行模拟, 发现影响脊柱三维空间中力量载荷的因素在脊柱侧凸进展过程中起着关键作用, 包括棘突旁、椎旁的肌肉力量不均等, 肌纤维的变异, 结缔组织中弹性纤维和胶原组织的含量不同等。由于椎体之间椎间盘弹性应变的存在, 这些变量最终都可以视为作用于椎间盘, 因此椎间盘的继发形态及受力变化成为目前研究的焦点。

1.2 椎体生长发育不平衡 在自然生长的过程中, 椎体多数情况下能够平衡发育, 使脊柱的生长无明显偏移。先天性脊柱侧凸的患者常有分节不全、椎弓根发育异常、半椎体畸形等明显不足^[15-16], 若不进行提前干预, 必然导致脊柱生长不同步, 进而导致脊柱侧凸的形成^[12]; 另有研究表明, 马凡综合征(一种结缔组织病)患者椎旁两侧肌肉力量小且不均衡, 几乎所有患者都会发生脊柱侧凸^[17]。这些具有明确病因的脊柱侧凸在发育过程中的力学因素也引发了众多学者对 IS 的关注。脊椎骨的椎体部分承担了绝大部分的负荷, 在外伤、骨坏死等外在条件下, 椎体可能会有轻微的形变及压缩^[18]。有学者曾尝试用放射线照射椎体, 使骨质破坏, 此后长期随访发现椎体出现了轻微的压缩和形变, 破坏了脊柱的平衡, 逐渐发生了脊柱侧凸^[19]。椎体的生长是通过软骨终板的增殖发生的^[20], 有学者在猪模型上通过破坏小部分软骨终板, 使一个或多个椎体长期发育速度不平衡, 也逐

渐出现了脊柱侧凸现象^[21]。根据上述研究推测, IS 可能是在幼年或儿童时期, 因外伤、姿势习惯等原因导致了椎骨本身的轻微破坏或椎体附件和肌肉组织的轻微损伤, 虽然这些轻微损伤通过目前的辅助检查设备无法察觉, 但在长年累月的生长发育过程中不断积累生物力学的变化, 逐渐出现了脊柱侧凸现象, 待 Cobb 角大到一定程度之后, 椎体的塌陷、肋骨的限制和重力的作用亦会进一步加重脊柱侧凸程度, 直至表现出相应症状。

1.3 骨盆倾斜 骨盆是脊柱的基座和生物力学基础, 对整个脊柱结构的平衡起着重要作用。骨盆倾斜可导致脊柱侧凸发生, 现从冠状位、矢状位和水平位 3 个方面总结骨盆倾斜对脊柱侧凸的影响。

1.3.1 冠状位 从冠状位上来看, C₇ 椎体中垂线偏离骶骨中垂线 (center sacral vertical line, CSVL) 超过 2 cm 即可视为冠状位不平衡, 常常随之出现双肩不等高, 腰椎旋转加重等典型症状^[22]。在 King 和 Lenke 分型中, 未将骨盆纳入其中, 即默认骨盆是水平的, 但在实际临床病例中并非如此, 很多患者合并了骨盆倾斜^[23]。因此, Salanova^[24]提出了 pelvis included (骨盆倾斜至主胸弯凸侧) 和 pelvis excluded (骨盆倾斜至主胸弯凹侧) 这两个概念, 进而针对不同倾斜状况分析其力学特点, 并据此选择不同的手术方案。有了这个理论, 临床上可以更准确合理地选择融合节段, 以减少术后冠状位不平衡的发生概率。

1.3.2 矢状位 骨盆与脊柱矢状位平衡密切相关。骨盆入射角 (pelvic incidence, PI) 是目前较为公认的评价骨盆解剖特点的矢状位参数, 反映了骶骨倾斜角的大小^[25], PI 增大时, 骶骨倾斜角增大, 腰椎前凸也要相应增大与之适应。当腰椎前凸增大时, 胸椎为了维持矢状位的平衡, 生理后凸会随之减少, 数据表明腰椎前凸增大的角度与胸椎后凸减少的角度有明显的线性回归关系^[26], 具有高度的相关性, 即脊柱侧凸患者的脊柱矢状位参数间接与骨盆参数发生了关系^[27]。在制定手术策略的过程中, 根据骨盆在矢状位的倾斜角度可以指导弯棒矫形的程度, 使矫形后保持矢状位的平衡, 防止失衡甚至发生近端交界性后凸 (proximal junctional kyphosis, PJK), 提高患者的生命质量^[28]。

1.3.3 水平位 在脊柱全长片中, 很多患者骨盆两侧的大小是不对称的, 以往将其归结为解剖上的不

对称、发育不平衡,而 Asher 和 Cook^[29]则认为骨盆两侧不对称是由于骨盆旋转引起的。Gum 等^[30]通过进一步研究总结,提出了“骨盆旋转”的概念,证明大部分主胸弯型 IS 患者具有与胸弯方向一致的骨盆旋转。Qiu 等^[31]通过对比术前与术后的骨盆正位 X 线片,发现术前大小不同的两侧髂骨翼在矫形手术后逐渐接近对称,提示此不对称并不是解剖不对称,而是由于骨盆旋转引起。骨盆的旋转可以当作腰椎旋转的一部分,也可以视作单独的发生机制,但大多数学者认为,骨盆旋转也是对脊柱侧凸的重要代偿,以维持躯干的平衡^[32]。当骨盆发生旋转时,脊柱的生物力学基础不稳,随着旋转的加剧,侧凸的 Cobb 角进一步增大^[33]。因此,在临床诊疗中要重视骨盆水平位旋转的评估,从而更好地理解 and 预测脊柱侧凸的进一步发展。

2 IS 治疗中的生物力学因素

研究 IS 的生物力学特点主要是为了了解自然状态下疾病的发展趋势,以更科学地指导治疗。IS 的治疗方法经历了很长时间的演变,矫形器械及工具得到了飞速发展。治疗 IS 的方法很多,主要可分为非手术治疗和手术治疗。

2.1 非手术治疗中的生物力学因素 IS 的非手术治疗主要目的是在疾病的快速进展期对其进行控制,一般适用于发病和诊断较早、程度较轻或刚刚进入青春发育期的患儿。非手术治疗主要的优点是可以控制脊柱侧凸的进展速度,尽量拖延手术时间甚至避免手术,将对患儿身高的影响降到最低。

常见的非手术治疗方法包括手法按摩、形体锻炼、矫形支具、牵引石膏固定等,其中矫形支具治疗更符合 IS 的生物力学特点,疗效获得公认。要取得良好的治疗效果,应严格把握矫形支具治疗的适应证。一般认为, Cobb 角 $>25^{\circ}$ 或 Cobb 角 $\leq 25^{\circ}$ 但随访发现角度增加较快者,须进行支具治疗^[34]。最早的治疗 IS 的矫形支具是由 Blount 于 1948 年报道的 Milwaukee 支具^[35],即带有颈部固定器的矫形支具,可应用于顶椎较高患者 (T_7 以上),是具有代表性的颈胸腰骶支具;对顶椎在 T_7 以下者,可去掉颈椎部分,即使用胸腰骶支具 (thoracolumbosacral orthosis, TLSO) 进行矫正^[36]。目前临床上常用的 TLSO 支具有 Boston 支具和 Chennia 支具^[37-38]。无论是哪种类型的支

具,其原理均离不开生物力学^[39]。一般来说,单侧凸的患者可用三点加力的支具,双侧凸的患者可使用四点加力的支具,其产生的矫形力通过肋骨传递到脊柱,可将力分解为横向与纵向的力,横向力起到减少侧凸角度、避免角度增大的作用,纵向力有一定的牵引作用,有助于减少骨盆的倾斜、减缓椎体的旋转进展^[40]。有研究显示,具有矫形支具治疗适应证的患者可部分避免手术治疗,手术率约为 7.0%~43.0%^[41]。

2.2 手术治疗中的生物力学因素 IS 手术治疗经历了漫长的发展阶段。早期具有代表性的手术固定有后路内固定系统 (Harrington 棒系统)、节段性脊柱内固定系统、CD 棒系统、椎板钩内固定系统等^[42-44]。在当时的医学条件下,这些治疗方法在一定程度上解决了患者的侧凸问题,但从生物力学角度看都有很多不足。例如, Harrington 棒系统随着患者身高发展容易发生断棒、脱钩等并发症;节段性内固定系统操作烦琐,容易损伤脊髓神经,安全性较差;CD 棒及椎板钩系统虽强于 Harrington 棒系统,但仍有很大可能发生脱钩、断棒等^[45]。

目前,应用最广泛的是椎弓根钉棒内固定系统,与早期方法相比,椎弓根螺钉可提供三柱机械固定,坚强而牢靠,同时稳定的结构可以带来更好的融合率,减少脱钩、断棒的概率。20 世纪 90 年代,韩国的 Suk 等^[46]率先将全节段椎弓根螺钉技术应用于脊柱侧凸治疗,由于椎弓根螺钉三柱固定的坚强性,使脊柱侧凸矫正率进一步提高,并发症也相应减少,取得良好疗效。这是脊柱畸形治疗领域的一个里程碑式进展,随后这一技术在国际上逐渐普及。Suk 等^[46]和 Kim 等^[47]认为,全节段椎弓根螺钉技术在胸椎畸形矫正程度、减少矫正角度的丢失、减少出血、改善心肺功能等方面都具有绝对的优势。在 IS 的手术治疗中,全椎弓根螺钉的矫形效果毋庸置疑,也是当今主流的脊柱侧凸手术治疗方式。

虽然椎弓根螺钉把持力、矫形力十分显著,但同时也因其坚强的固定牺牲了脊柱的生物力学特性,带来一些不良反应。由于手术节段融合坚固,邻近节段的具有活动度的椎体与手术节段之间就可能会发生术后 PJK,影响患者外观和手术效果,甚至需要翻修手术延长融合节段^[48]。这成为长期以来困扰脊柱外科医师的问题。为克服这一缺陷,医师

们尝试了上端椎使用钩子代替椎弓根螺钉^[49]、使用弹性材料制作的椎弓根螺钉内固定系统^[50]等, 结果发现端椎使用钩子保留部分活动度或使用弹性内固定装置矫形可以降低邻近椎间盘的压力, 减少相邻节段退变的概率。Berven^[51]研究发现, 一味地减少内固定的节段会影响手术矫形的效果, 且会导致内固定系统松动、融合失败、翻修手术等, 降低了固定可靠性。这也在生物力学方面给了我们新的启发。如何在保证内固定的坚固性和手术矫形效果的同时, 减少手术节段与非手术节段之间的相对活动, 进而减少 PJK 或近端交界性失败 (proximal junctional failure, PJF) 的发生, 是我们日后研究的又一方面。

此外, 全节段椎弓根螺钉技术还存在下述缺点: (1) 椎弓根螺钉存在置钉安全性的问题, 特别是在胸椎节段置入椎弓根螺钉, 由于脊柱椎体的畸形及脊髓的偏移, 置钉不慎可造成脊髓、神经根及大血管损伤可能^[52-54]。虽然这些并发症发生率并不高, 但带来的后果非常严重, 所以如何避免置钉的并发症是学术界研究的热点。(2) 全椎弓根螺钉技术器械费用较高。按照全节段椎弓根螺钉矫形技术的要求, 拟固定融合的侧凸每个节段的椎体都需置入螺钉, 由于医疗器械费用成本高, 动辄数十万元的医疗费用给患者带来沉重的经济负担^[55], 很多患者不能得到及时治疗。为解决这些问题, 本课题组设计出了 Lenke I 型脊柱侧凸患者三维有限元仿真模型, 并选择柔韧性较好的 IS 患者, 利用这一模型在国内率先开展了间隔置钉、关键椎体置钉等减少置钉比例的计算机模拟及临床效果观察, 发现对轻中度 IS 患者适当减少置钉比例对冠状位矫形结果未产生明显影响, 也未增加器械相关的并发症^[56-57]。其他学者也进行了类似研究, 结果也支持这一结论^[58-59]。

虽然上述研究已证实对柔韧性较好的 IS 患者, 可以减少置钉密度而获得效果良好的矫形, 但在置钉方案的选择上常常依据医师既有的知识经验, 缺乏统一规范的标准。采用怎样的置钉方案, 减少置钉密度到何种程度而不影响手术疗效? 减少置钉数量后, 在矫形过程和矫形最终的维持中, 螺钉或棒上的应力势必增加, 这种应力增加到何种程度会导致固定结构的失败? 针对这些关键问题目前仍未获得有力的证据, 尚需更多的生物力学研究来解释。

3 小 结

本文通过对 IS 的发生发展和干预治疗过程中生物力学特点原理和变化的分析, 总结了目前 IS 的重要特点与诊治方法的发展过程, 以期为临床治疗提供依据。IS 生物力学特点对临床的指导意义主要体现在: (1) 在 IS 发生的早期, 如何通过增强锻炼、塑形训练、支具矫形等方法抑制其加重; (2) 在手术前, 对术者选择适宜的手术节段和手术方案进行指导; (3) 对于容易发生 PJK、PJF 的患者, 暴露切口时尽量减少对上位关节突、关节囊以及椎旁韧带的破坏, 必要时可以使用钩子或其他弹性内固定器械, 以减少手术的翻修率及其他相关并发症的发生。尽管对于 IS 的认识日渐完善, 但还有很多需要攻克的学术难题。相信随着 IS 生物力学特点的阐明, 能够研发出更好、更合理的干预方法, 预防该疾病的进展, 降低致残率, 减轻患者及社会的负担。

[参 考 文 献]

- [1] PIZONES J, MARTIN M B, PEREZ-GRUESO F J S, YILGOR C, VILA-CASADEMUNT A, SERRA-BURRIEL M, et al. Impact of adult scoliosis on rousouly sagittal shape classification[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2019, 44: 270-279.
- [2] LI X, GUO H, CHEN C, TAN H, LIN Y, LI Z, et al. Does scoliosis affect sleep breathing?[J/OL]. World Neurosurg, 2018, 118: e946-e950. doi: 10.1016/j.wneu.2018.07.106.
- [3] DIARBAKERLI E, GRAUERS A, DANIELSSON A, ABBOTT A, GERDHEM P. Quality of life in males and females with idiopathic scoliosis[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2019, 44: 404-410.
- [4] MABRY-HERNANDEZ I, TANNIS C. Screening for adolescent idiopathic scoliosis[J]. Am Fam Physician, 2018, 97: 666-667.
- [5] MOALEJ S, ASADABADI M, HASHEMI R, KHEDMAT L, TAVACOLIZADEH R, VAHABI Z, et al. Screening of scoliosis in school children in Tehran: the prevalence rate of idiopathic scoliosis[J]. J Back Musculoskeletal Rehabil, 2018, 31: 767-774.
- [6] SHAO K, WANG H, LI B, TIAN D, JING J, TAN J, et al. Morphology-based realization of a rapid scoliosis correction simulation system[J]. Comput Biol Med, 2018, 94: 85-98.
- [7] HOU D, KANG N, YIN P, HAI Y. Abnormalities associated with congenital scoliosis in high-altitude geographic regions[J]. Int Orthop, 2018, 42: 575-581.

- [8] GARCÍA-GIMÉNEZ J L, RUBIO-BELMAR P A, PEIRÓ-CHOVA L, HERVÁS D, GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ D, IBAÑEZ-CABELLOS J S, et al. Circulating miRNAs as diagnostic biomarkers for adolescent idiopathic scoliosis[J/OL]. *Sci Rep*, 2018, 8: 2646. doi: 10.1038/s41598-018-21146-x.
- [9] 周传坤,高书涛,王欢,王峥强,方煌. 褪黑素在青少年特发性脊柱侧凸发病中作用的研究进展[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2015, 25: 1104-1109.
- [10] BYLSKI-AUSTROW D I, GLOS D L, WALL E J, CRAWFORD A H. Scoliosis vertebral growth plate histomorphometry: comparisons to controls, growth rates, and compressive stresses[J]. *J Orthop Res*, 2018, 36: 2450-2459.
- [11] TOLL B J, SAMDANI A F, JANJUA M B, GANDHI S, PAHYS J M, HWANG S W. Perioperative complications and risk factors in neuromuscular scoliosis surgery[J]. *J Neurosurg Pediatr*, 2018, 22: 207-213.
- [12] PASHA S, BALDWIN K. Are we simplifying balance evaluation in adolescent idiopathic scoliosis?[J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2018, 51: 91-98.
- [13] VILLEMURE I, AUBIN C E, GRIMARD G, DANSEREAU J, LABELLE H. Progression of vertebral and spinal three-dimensional deformities in adolescent idiopathic scoliosis: a longitudinal study[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2001, 26: 2244-2250.
- [14] VILLEMURE I, AUBIN C E, DANSEREAU J, LABELLE H. Biomechanical simulations of the spine deformation process in adolescent idiopathic scoliosis from different pathogenesis hypotheses[J]. *Eur Spine J*, 2004, 13: 83-90.
- [15] TANIGUCHI Y, OICHI T, OHYA J, CHIKUDA H, OSHIMA Y, MATSUBAYASHI Y, et al. In-hospital mortality and morbidity of pediatric scoliosis surgery in Japan: analysis using a national inpatient database[J/OL]. *Medicine (Baltimore)*, 2018, 97: e0277. doi: 10.1097/MD.00000000000010277.
- [16] CHEN Z, QIU Y, ZHU Z, LI S, CHEN X, XU L, et al. Posterior-only hemivertebra resection for congenital cervicothoracic scoliosis: correcting neck tilt and balancing the shoulders[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2018, 43: 394-401.
- [17] QIAO J, XU L, LIU Z, ZHU F, QIAN B, SUN X, et al. Surgical treatment of scoliosis in Marfan syndrome: outcomes and complications[J]. *Eur Spine J*, 2016, 25: 3288-3293.
- [18] VELDTHUIZEN A G, WEVER D J, WEBB P J. The aetiology of idiopathic scoliosis: biomechanical and neuromuscular factors[J]. *Eur Spine J*, 2000, 9: 178-184.
- [19] STOKES I A, GARDNER-MORSE M. Muscle activation strategies and symmetry of spinal loading in the lumbar spine with scoliosis[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2004, 29: 2103-2107.
- [20] GARROSA M, FERNÁNDEZ-MARIÑO J R, GAYOSO M J, TOMEY M J, AL-MAJDALAWI A, RODRÍGUEZ L P. Paravertebral muscles in experimental scoliosis: a light and electron microscopic study[J]. *Histol Histopathol*, 1998, 13: 927-937.
- [21] ROAF R. The treatment of progressive scoliosis by unilateral growth-arrest[J]. *J Bone Joint Surg Br*, 1963, 45: 637-651.
- [22] MÁRKUS I, SCHLÉGL Á T, BURKUS M, JÓZSEF K, NIKLAI B, THAN P, et al. The effect of coronal decompensation on the biomechanical parameters in lower limbs in adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2018, 104: 609-616.
- [23] ABOUSAMRA O, SULLIVAN B T, SAMDANI A F, YASZAY B, CAHILL P J, NEWTON P O, et al. Three methods of pelvic fixation for scoliosis in children with cerebral palsy: differences at 5-year follow-up[J/OL]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2019, 44: E19-E25. doi: 10.1097/BRS.0000000000002761.
- [24] SALANOVA C, DUBOUSSET J, MORENO P, BOULOT J. [Segmental instrumentation in idiopathic scoliosis. Role of the upright frontal plate for determination of the area of fusion][J]. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot*, 2000, 86: 441-451.
- [25] LEGAYE J, DUVAL-BEAUPÈRE G, HECQUET J, MARTY C. Pelvic incidence: a fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves[J]. *Eur Spine J*, 1998, 7: 99-103.
- [26] ZHAO Z H, BAO H D, TSENG C C, ZHU Z Z, QIU Y, LIU Z. Prediction of respiratory function in patients with severe scoliosis on the basis of the novel individualized spino-pelvic index[J]. *Int Orthop*, 2018, 42: 2383-2388.
- [27] 张原诚,鲍虹达,舒诗斌,顾琦,刘臻,朱泽章,等. 青春期骨盆解剖形态变化与骨盆入射角的关系[J]. *中华骨科杂志*, 2019, 39: 226-233.
- [28] PASHA S, ILHARREBORDE B, BALDWIN K. Sagittal spinopelvic alignment after posterior spinal fusion in adolescent idiopathic scoliosis: a systematic review and meta-analysis[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2019, 44: 41-52.
- [29] ASHER M A, COOK L T. The transverse plane evolution of the most common adolescent idiopathic scoliosis deformities. A cross-sectional study of 181 patients[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1995, 20: 1386-1391.
- [30] GUM J L, ASHER M A, BURTON D C, LAI S M, LAMBART L M. Transverse plane pelvic rotation in adolescent idiopathic scoliosis: primary or compensatory?[J]. *Eur Spine J*, 2007, 16: 1579-1586.
- [31] QIU X S, WANG Z W, QIU Y, WANG W J, MAO S H, ZHU Z Z, et al. Preoperative pelvic axial rotation: a possible predictor for postoperative coronal decompensation in thoracolumbar/lumbar adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Eur Spine J*, 2013, 22: 1264-1272.
- [32] ZHANG H, GUO H, HE S, HUI H, HAO D. Sacral agenesis combined with spinopelvic dissociation: A case report and literature review[J/OL]. *Medicine (Baltimore)*, 2018, 97: e12162. doi: 10.1097/MD.00000000000012162.

- [33] GAU Y L, LONSTEIN J E, WINTER R B, KOOP S, DENIS F. Luque-Galveston procedure for correction and stabilization of neuromuscular scoliosis and pelvic obliquity: a review of 68 patients[J]. *J Spinal Disord*, 1991, 4: 399-410.
- [34] KUROKI H. Brace treatment for adolescent idiopathic scoliosis[J/OL]. *J Clin Med*, 2018, 7. pii: E136. doi: 10.3390/jcm7060136.
- [35] NOONAN K J, WEINSTEIN S L, JACOBSON W C, DOLAN L A. Use of the Milwaukee brace for progressive idiopathic scoliosis[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1996, 78: 557-567.
- [36] 任凯, 龚晓明, 章荣, 曾祥斌, 刘佳, 詹俊杰. 不同非手术治疗对儿童青少年特发性脊柱侧弯效果的对比研究[J]. *中国医药导报*, 2014, 11: 25-27.
- [37] ZAINA F, DE MAUROY J C, GRIVAS T, HRESKO M T, KOTWIZKI T, MARUYAMA T, et al. Bracing for scoliosis in 2014: state of the art[J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2014, 50: 93-110.
- [38] FANG M Q, WANG C, XIANG G H, LOU C, TIAN N F, XU H Z. Long-term effects of the Chêneau brace on coronal and sagittal alignment in adolescent idiopathic scoliosis[J]. *J Neurosurg Spine*, 2015, 23: 505-509.
- [39] RIGO M, JELAČIĆ M. Brace technology thematic series: the 3D Rigo Chêneau-type brace[J/OL]. *Scoliosis Spinal Disord*, 2017, 12: 10. doi: 10.1186/s13013-017-0114-2.
- [40] GOMEZ J A, HRESKO M T, GLOTZBECKER M P. Nonsurgical management of adolescent idiopathic scoliosis[J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2016, 24: 555-564.
- [41] WEINSTEIN S L, DOLAN L A, CHENG J C, DANIELSSON A, MORCUENDE J A. Adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Lancet*, 2008, 371: 1527-1537.
- [42] HARRINGTON P R. Technical details in relation to the successful use of instrumentation in scoliosis[J]. *Orthop Clin North Am*, 1972, 3: 49-67.
- [43] LUQUE E R. The anatomic basis and development of segmental spinal instrumentation[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1982, 7: 256-259.
- [44] LONNER B S, REN Y, YASZAY B, CAHILL P J, SHAH S A, BETZ R R, et al. Evolution of surgery for adolescent idiopathic scoliosis over 20 years: have outcomes improved?[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2018, 43: 402-410.
- [45] TAMBE A D, PANIKKAR S J, MILLNER P A, TSIRIKOS A I. Current concepts in the surgical management of adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Bone Joint J*, 2018, 100-B: 415-424.
- [46] SUK S I, LEE C K, MIN H J, CHO K H, OH J H. Comparison of Cotrel-Dubousset pedicle screws and hooks in the treatment of idiopathic scoliosis[J]. *Int Orthop*, 1994, 18: 341-346.
- [47] KIM Y J, LENKE L G, KIM J, BRIDWELL K H, CHO S K, CHEH G, 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: 291-298.
- [48] 宋富立, 王丽萍, 李永禄, 何世达, 倪剑锋. 椎弓根螺钉内固定系统再次手术原因的流行病学分析[J]. *检验医学与临床*, 2013, 2013: 2606-2608.
- [49] SCHEER J K, FAKURNEJAD S, LAU D, DAUBS M D, COE J D, PAONESSA K J, et al. Results of the 2014 SRS survey on PJK/PJF: a report on variation of select srs member practice patterns, treatment indications, and opinions on classification development[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2015, 40: 829-840.
- [50] 许小多, 于秀淳, 黄伟敏, 孔令南. PEEK 椎弓根螺钉内固定系统对椎间盘内压力变化影响的生物力学研究[J]. *中国矫形外科杂志*, 2018, 26: 1041-1047.
- [51] BERVEN S H. Clinical incidence of PJK/ASD in adult deformity surgery: a comparison of rigid fixation and semirigid fixation-rigid[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2016, 41 Suppl 7: S35-S36.
- [52] FLYNN J M, BETZ R R, O'BRIEN M F, NEWTON P O; Harms Study Group. Radiographic classification of complications of instrumentation in adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2010, 468: 665-669.
- [53] COE J D, ARLET V, DONALDSON W, BERVEN S, HANSON D S, MUDIYAM R, et al. Complications in spinal fusion for adolescent idiopathic scoliosis in the new millennium. A report of the Scoliosis Research Society Morbidity and Mortality Committee[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2006, 31: 345-349.
- [54] CAREY P A, SCHOENFELD A J, CORDILL R D, TOMPKINS B J, CASKEY P M. A comparison of cell salvage strategies in posterior spinal fusion for adolescent idiopathic scoliosis[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2015, 28: 1-4.
- [55] FLETCHER N D, SHOURBAJI N, MITCHELL P M, OSWALD T S, DEVITO D P, BRUCE R W. Clinical and economic implications of early discharge following posterior spinal fusion for adolescent idiopathic scoliosis[J]. *J Child Orthop*, 2014, 8: 257-263.
- [56] LI M, SHEN Y, FANG X, NI J, GU S, ZHU X, et al. Coronal and sagittal plane correction in patients with Lenke 1 adolescent idiopathic scoliosis: a comparison of consecutive versus interval pedicle screw placement[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2009, 22: 251-256.
- [57] 杨长伟, 赵云飞, 朱晓东, 李明. Lenke1 型青少年特发性脊柱侧凸矫形结果与置钉密度关系研究[J]. *中国骨与关节杂志*, 2015, 4: 771-774.
- [58] GEBHART S, ALTON T B, BOMPADRE V, KRENGEL W F. Do anchor density or pedicle screw density correlate with short-term outcome measures in adolescent idiopathic scoliosis surgery?[J/OL]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2014, 39: E104-E110. doi: 10.1097/BRS.0000000000000075.
- [59] QUAN G M, GIBSON M J. Correction of main thoracic adolescent idiopathic scoliosis using pedicle screw instrumentation: does higher implant density improve correction?[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2010, 35: 562-567.

[本文编辑] 孙 岩