

· 综述 ·

## 青少年特发性脊柱侧弯非手术治疗的现状<sup>△</sup>

石茂彪, 马亚萍, 季文军, 王 信\*

(遵义医科大学附属医院骨科, 贵州遵义 563003)

**摘要:** 青少年特发性脊柱侧弯是常见的无明显发病原因的脊柱畸形, 不及时治疗会引起侧后凸角度加重及心肺功能障碍等多种并发症, 使得生活质量下降, 甚至威胁生命。目前对于青少年特发性脊柱侧弯的治疗手段分为非手术治疗和手术治疗, 主张早发现、早诊断、早治疗, 有效阻止侧弯进展。本文对现有非手术疗法中主要的运动疗法和支具治疗方法进行综述, 为青少年特发性脊柱侧弯非手术治疗方法提供参考。

**关键词:** 青少年特发性脊柱侧弯, 脊柱侧弯特异性练习, 矫形器, 保守治疗

**中图分类号:** R682.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-8478 (2023) 13-1189-05

**Current non-surgical treatment for adolescent idiopathic scoliosis // SHI Mao-biao, MA Ya-ping, JI Wen-jun, WANG Xin. Affiliated Hospital, Zunyi Medical University, Zunyi 563003, China**

**Abstract:** Adolescent idiopathic scoliosis is a common spinal deformity with no obvious cause. If not treated in time, it will lead to a variety of complications such as aggravation of lateral curvature angle and cardiopulmonary dysfunction, which makes patients' quality of life decline and even threaten their lives. At present, the treatment of adolescent idiopathic scoliosis can be divided into non-surgical treatment and surgical treatment. Early detection, diagnosis and treatment are advocated to effectively prevent the progression of scoliosis. In this paper, the main non-surgical treatment methods, including exercise therapy and brace therapy, were reviewed to provide reference for the clinical non-surgical treatment of adolescent idiopathic scoliosis.

**Key words:** adolescent idiopathic scoliosis, scoliosis specific exercises, orthosis, conservative treatment

青少年特发性脊柱侧弯 (adolescent idiopathic scoliosis, AIS) 是指脊柱 1 个或者多个节段的侧弯和旋转畸形, 而无其他器质性疾病。AIS 是最常见的特发性脊柱畸形, 约占脊柱侧弯的 80%<sup>[1]</sup>, 好发于 10~16 岁的青少年<sup>[2]</sup>。早期可无明显症状, 随着疾病进展, 逐渐出现腰背痛、脊柱侧凸畸形等症状, 进而影响心、肺功能, 最终导致其功能衰竭。病因目前尚不明确, 多项研究表明可能与遗传学、雌激素及其受体、褪黑素、钙调蛋白、结缔组织异常、中枢神经系统异常等有关<sup>[3-8]</sup>。Cobb 角 $>10^\circ$ 即可诊断<sup>[9]</sup>。目前为止, AIS 的治疗方法分为非手术治疗和手术治疗, 国际脊柱侧弯研究协会 (Scoliosis Research Society, SRS) 推荐  $10^\circ < \text{Cobb 角} \leq 45^\circ$  时选择保守治疗, Cobb 角 $>45^\circ$  的重度侧弯进行手术治疗。本文就目前有关 AIS 主要保守疗法及最新进展的相关文献做一综述。

### 1 运动疗法

运动疗法理论基于 AIS 患者生物力学因素等, 增加骨骺端压力会抑制骨骺生长, 减弱骨骺端压力会促进骨骺生长。所以可通过运动疗法来纠正侧弯脊柱两侧不对称的肌力, 从而达到完全或部分阻止病情进展的目的。本文阐述的运动疗法指的是国际脊柱侧凸矫形和康复治疗协会在 2011 年发布的脊柱侧弯特异性练习 (physiotherapeutic scoliosis specific exercise, PSSE)<sup>[10]</sup>, PSSE 强调根据不同的侧弯情况制定个性化的治疗方案和教育患者在日常生活中的自我矫正, 主要的治疗方法包括 Schroth 疗法、巴塞罗那体疗学校 (Barcelona Scoliosis Physical Therapy School, BSPTS) 疗法、Lyon 疗法、脊柱侧弯科学锻炼法 (scientific exercise approach to scoliosis, SEAS) 疗法、

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2023.13.07

<sup>△</sup>基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 31960209); 贵州省科技厅基础研究计划项目 (编号: 黔科合基础[2020]1Y093)

作者简介: 石茂彪, 在读硕士, 研究方向: 骨缺损早期愈合的基础研究, (电话) 15329027696, (电子信箱) shi980527@163.com

\* 通信作者: 王信, (电话) 13639288558, (电子信箱) lchwx@aliyun.com

侧移疗法、DoboMed 疗法、脊柱侧弯个性化功能 (functional individual therapy of scoliosis, FITS) 疗法。

### 1.1 Schroth 疗法

Schroth 将身体分成 3 个模块, 通过脊柱的拉伸及反向运动、强化弱勢肌群、拉伸紧张肌群, 配合特定的呼吸模式矫正脊柱侧弯<sup>[11]</sup>, 包括体位感知、姿势矫正、旋转成角呼吸法、脊柱稳定运动。体位感知指患者长期已适应脊柱侧弯畸形的姿势, 故需用 X 线片、照片、镜子等让患者意识到自己异常的身体姿势, 帮助患者形成正确的感知。姿势矫正的原则有躯干伸展、从下往上矫正及三维矫正。旋转成角呼吸法指脊柱侧弯患者由于脊柱畸形吸气时空气多进入凸侧, 通过这种呼吸训练以深长的腹式呼吸为基础, 加上吸气时引导患者收缩凸侧躯干的肌肉从而降低凸侧呼吸活动, 增强凹侧躯干的呼吸活动。脊柱稳定运动指患者由于侧弯畸形, 脊柱凹侧躯干的肌肉缩短, 凸侧的肌肉拉伸会加重躯体的旋转, 所以通过具体的动作锻炼萎缩的肌肉, 恢复两侧肌肉的平衡。Schreiber 等<sup>[12]</sup>将 50 例年龄 10~18 岁的 AIS 患者, 曲线 10°~45°, Risser 分级 0~5 级, 随机分到实验组和对照组, 观察 6 个月 Schroth 疗法干预对 AIS 患者 Cobb 角的影响, 结果显示 6 个月后 Schroth 组的最大曲线明显小于对照组。Park 等<sup>[13]</sup>也发现 Schroth 疗法对于 Cobb 角为 10°~30°的脊柱侧弯患者比 Cobb 角>30°的脊柱侧弯患者效果更好。

### 1.2 BSPTS 疗法

BSPTS 疗法与 Schroth 疗法相似之处为两者都将身体进行了“模块化”, 也通过旋转成角呼吸法和肌肉训练进行三维矫正。但与 Schroth 方法的“强化住院康复”相比, BSPTS 疗法更强调“强化门诊治疗”, BSPTS 疗法注重鼓励患者对生活充满热情, 促进社会心理的成长<sup>[14]</sup>。Jelačić 等<sup>[15]</sup>对 47 例用 BSPTS 疗法治疗的脊柱侧弯患者进行回顾分析, 发现 BSPTS 疗法能够在短期内改善背部不对称、部分脊柱不平衡。Zapata 等<sup>[16]</sup>发现通过 BSPTS 疗法还可改善 Cobb 角, 提高脊柱灵活性。

### 1.3 Lyon 疗法

Lyon 疗法是 Stagnara 在 20 世纪发明的一种非手术疗法, 非常注重运动疗法和支具佩戴的配合。内容包括呼吸训练、脊柱三维矫正、髋骨-腰椎角度松动、患者教育及坐姿控制等, 并帮助患者穿戴支具后做脊柱伸展训练和日常训练。Lyon 方法还强调确定治疗方案时要评估患者的年龄、姿势不平衡和 Cobb 角; 通过镜子、视频等工具帮助患者对躯干畸形的认识从而进行曲线矫正; 帮助患者做脊柱伸展训练过程

中要避免脊柱外展, 并加强胸椎后凸和腰椎前凸、核心肌力训练、本体感觉促进、机体平衡和稳定训练; 避免矢状面的极端运动(弯曲和伸展)和导致呼吸急促的运动, 使用旋转成角的呼吸方式增加肺活量。Demauroy<sup>[17]</sup>从数据库中选择 136 例 Cobb 角>40°的 AIS 患者, 在进行 Lyon 疗法治疗后, 其中 65% 的患者脊柱侧弯得到改善。

### 1.4 SEAS 疗法

首要目标是稳定躯干, 具体内容包括帮助患者提高对自身脊柱畸形的认知, 从而能自我在脊柱三维层面上进行矫正; 在矫正姿势下进行脊柱旁深层肌肉的力量训练; 在矫正姿势下提高身体平衡能力; 通过难度渐进的不同运动达到康复; 控制练习神经对肌肉的支配运动; 特定的呼吸训练。Negrini 等<sup>[18]</sup>将 145 例 AIS 患者纳入 SEAS 方法训练, 结果显示 SEAS 方法对于避免 AIS 患者病情进展的有效性优于常规理疗。Negrini 等<sup>[19]</sup>的病例报告中, 说明了 SEAS 疗法对治疗脊柱侧弯有效性。

### 1.5 侧移疗法

通过主动使躯干不断地向凹侧做横向运动, 这样能使下端椎体的侧倾减小, 增强椎旁肌肉的力量, 拉伸关节间韧带。此外, 对于脊柱节段的单弯和双弯还须配合相应的练习方法。Maruyama 等<sup>[20]</sup>纳入 328 例进行支具治疗和侧移方法的 AIS 女性患者, 从首次就诊随访至 15 岁或者骨骼成熟, 当 Cobb 角>50°时建议手术治疗, 结果在这 328 例 AIS 患者中仅有 20 例 (6.1%) 进行了手术治疗, 另外的 308 例 AIS 患者 Cobb 角无明显增加<sup>[21]</sup>。

### 1.6 DoboMed 疗法

该方法是以骨盆和肩带在对称位置上闭链运动为基础, 从矢状面、冠状面、水平面方向上进行脊柱和姿势的自我状态下的闭链运动, 针对侧凸主弯矫正问题, 特别重视恢复胸椎后凸和腰椎前凸的生理曲线。然后配合选择性呼吸运动使凹侧胸廓充盈, 从而阻止病情进一步恶化, 提高脊柱稳定性、改善呼吸功能。Durmala 等<sup>[22]</sup>发现 48 例胸腰椎双弯的患者在经过 1 年的 DoboMed 疗法后, 60.5% 的患者胸段 Cobb 角没有继续进展; 另针对 88 例单弯的患者, 64.7% 的患者 Cobb 角没有继续增加。Dobosiewicz 等<sup>[23]</sup>也发现 DoboMed 疗法对抑制脊柱侧弯的曲线进展, 改善呼吸功能有积极的作用。

### 1.7 FITS 疗法

使患者意识到脊柱躯干的侧凸状况、感觉-运动平衡训练、解除肌筋膜在矫正运动时三维空间上的限制、保持肢体-骨盆稳定、矫正主曲线同时保持次曲

线及在功能体位和佩戴支具时进行三维平面的矫正呼吸。Białek<sup>[24]</sup>随访了 41 例 AIS 患者, 平均年龄为 (12.5±3.4) 岁, 平均随访时间 4.8 年, 结果示 27 例病情好转, 13 例病情稳定, 1 例病情恶化<sup>[25]</sup>。

## 2 支具疗法

脊柱侧弯的患者凸侧椎体骨骺所受压力变小, 而凹侧椎体骨骺所受压力变大就进入恶性循环, 侧凸的弯度会愈发严重。因此, 通过佩戴支具增加凸侧椎体骨骺的压力, 减少凹侧椎体骨骺的压力可以抑制脊柱侧弯的进展甚至矫正脊柱侧弯此外, 额面“三点力系统”、局部“力对系统”和矢状面脊柱平衡都为支具治疗的可行性提供了理论基础<sup>[26]</sup>。

### 2.1 支具治疗适应证及并发症

脊柱侧凸研究学会 (Scoliosis Research Society, SRS) 对 AIS 支具治疗的标准: (1) 年龄>10 岁的患者; (2) Risser 征: 0~2 级; (3) 原发性脊柱侧弯 Cobb 角 20°~40°并且在此之前未进行任何治疗者; (4) 月经未至或月经已至但不满 1 年的女性患者。并发症主要有支具对患者生活质量的影响造成患者心理障碍, 支具长期佩戴压迫导致皮肤疼痛、溃疡等。

### 2.2 支具种类

目前临床上已应用的脊柱侧弯支具根据矫正原理和应力方式来分有刚性支具和软支具; 根据矫正位置的高低可分为颈胸腰骶支具和胸腰骶支具; 根据佩戴时间的长短可分为日用型支具和夜用型支具; 根据工作原理可分为主动型支具和被动型支具。

#### 2.2.1 Boston 支具

属于 TLSO 支具, 为全时支具<sup>[27]</sup>。通过在顶端放置垫板对凸侧提供矫正力, 被矫正的脊柱可靠向凹侧的开放区域减小侧弯的角度。该种支具应用较为广泛, 因为其适用范围较广、低调、舒适感尚可。但由于每日佩戴时间长, 对日常生活影响比较大, 所以患者的依从性可能较差。

#### 2.2.2 Milwaukee 支具

由颈环、立柱、胸垫、腰垫和骨盆腰带组成<sup>[28]</sup>, 矫正力主要是胸垫、腰垫提供的被动矫正力和患者自我活动提供的主动矫正力构成, 它最大的缺点是颈环对患者产生的心理影响, 且外形不美观、对生活质量影响较大, 所以逐渐被 TLSO 支具取代。

#### 2.2.3 夜间支具

常见的有两种类型, 即 Charleston 支具和 Providence 支具。Charleston 支具是在 1979 年由 Charleston 和他的同事 Hooper 共同创造的<sup>[27]</sup>, 用一个能最

大限度矫正曲线的框架, 然后制作石膏模型使患者处于“过度矫正”的位置, 与传统的 TLSO 相比, Charleston 支具的矫正力更强, 所以每日佩戴的时间只需 8~10 h, 这样就减轻了长时间佩戴支具对生活的影响, 虽然减少了每日佩戴的时间, 但由于过度矫正拉伸造成的不适也会影响患者的依从性。Providence 支具由 Amato 和 McCoy 发明<sup>[29]</sup>, 在患者仰卧位时通过支具内的垫子向脊柱中线移动和旋转从而对躯干施加侧向和旋转的力量来矫正脊柱畸形。虽然夜用型支具开始是被当作 TLSO 支具的代替品, 但目前它相对于 TLSO 的有效性仍有所分歧。

#### 2.2.4 SpineCor 支具

SpineCor 支具是软体支具<sup>[30]</sup>, 主要由热塑性的骨盆腰带、腿带、胯部带和 4 条矫正弹性带组成。它带来的舒适性和顺应性给患者的体验较好, 并且能根据侧弯的类型调整矫正带, 但是相对于刚性支具, SpineCor 支具矫正的失败率更高<sup>[31]</sup>。

#### 2.2.5 Chêneau 支具

属于 TLSO 类支具, 且每天需佩戴 23 h。在 1978 年之前由 Chêneau 开发的, 主要机制是通过多点的压力区和扩张室系统对侧弯的脊柱进行三维矫正<sup>[32]</sup>。其矫正效果相对于 Boston 支具更好。随后在 Chêneau 支具基础上出现了 RSC (rigo-system-chêneau) 支具 WCR (wood-chêneau-rigo) 支具、GBW (gensingen-brace-weiss) 支具, 但舒适性、对生活质量影响较大等方面的问题依然没有得到很好的解决。

### 2.3 新技术的应用

Lou 等<sup>[33]</sup>开发了一种无线传感器网络, 能够持续监测支具对脊柱施加的力并记录下来, 有助于研究、调整日常生活中支具内部力的分布。依从性是支具治疗效果的关键因素, Donzelli 等<sup>[34]</sup>在支具的压力垫内置入了由热传感器、电池、储存器组成的小型温度数据记录仪, 它能够监控支具实际磨损的情况, 从而优化治疗方案、提高依从性。支具治疗的效果与支具佩戴的方式有关, 以规定的紧缚度佩戴支具能取得更好的效果。Chalmers 等<sup>[35]</sup>开发了一种主动智能支具系统, 在支具内使用气囊、电子泵、控制气囊气压的阀门、传感器来调整支具的紧缚度保持支具对躯干的压力在规定的范围内。此外, 在支具治疗过程中躯干的刚度即躯干的几何形状、脊柱曲线、脂肪分布、骨骼成熟度可能随着时间的推移发生变化, 而支具所产生的矫正力是通过躯干软组织、肋骨传递到脊柱。Park 等<sup>[36]</sup>利用 RoSE 动态支具对人体躯干的三维刚度进行了表征。在互联网快速发

展的背景下,可以收集患者日常佩戴支具的相关数据进行云储存,再与患者的移动终端、医院的网站管理后台共同组成智能支具个性化管理系统<sup>[37]</sup>,患者能根据实时数据对自身的佩戴情况进行调整,医师也能对患者进行远程指导从而提高治疗效果。

传统支具工艺精度较低<sup>[38]</sup>,取模以石膏为主。3D打印支具常使用的材料有尼龙、ABS、PLA、光敏树脂等,不同材料制得的支具有不同的特性,如PLA材料硬度性高、ABS材料柔软性好<sup>[39]</sup>。但现在逐渐不再单用一种材料制作,混合材料所打造的支具将具有更高的强度、更耐热等特性<sup>[40]</sup>。另外,智能材料也开始逐渐在医疗领域引起关注,特别是形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)的超弹性功能使得所制成的支具有连续和可控的矫正力,有望被选为新的支具材料<sup>[41]</sup>。计算机辅助设计/计算机辅助制作(computer aided design/computer aided manufacturing, CAD/CAM)能获取个体化脊柱形态数据,有限元模型(finite element models, FEM)来模拟计算施加在患者躯干上的压力来测试支具的生物力学,在这基础上配合3D打印技术能缩短支具制作的时间、减少材料的消耗并提高个体化支具的准确性<sup>[42, 43]</sup>。4D打印在原有3D打印的3个空间维度上增加了时间维度,所制作的4D打印智能脊柱侧弯矫形器能够在患者佩戴治疗一段时间后根据病情的进展和治疗方案的改变在不增加额外驱动装置的情况下进行自我变形调节<sup>[44]</sup>。

### 3 其他保守疗法

电刺激疗法是通过刺激侧弯凸侧的肌肉收缩锻炼使得比凹侧肌肉产生更强的牵拉力从而矫正脊柱。Dodge等<sup>[45]</sup>在动物实验上研究发现电刺激疗法还可抑制凸侧椎体的生长。但到目前为止,电刺激相关的文献大多已年代比较久远且数量较少。另外还有牵引疗法、针刀治疗、中药疗法等。

### 4 小结

运动疗法和支具疗法作为目前保守疗法的主要手段,虽有很多研究证实了运动疗法的有效性,但不同运动疗法之间疗效的比较及对于不同侧弯程度的患者适合应用哪种运动疗法之类的研究还较少,并未达成共识。此外在4D打印技术、生物力学、材料学进一步发展的条件下,未来有望开发出更有效、更舒适、更个体化的支具来阻止AIS的进展,

联合人工智能、云计算、5G等实现支具更加智能化的实时管理调控。这两种主要治疗方法之间怎样联用来提高保守治疗的疗效需要进一步研究。

### 参考文献

- [1] Negrini S, Donzelli S, Aulisa AG, et al. 2016 SOSORT Guidelines: orthopaedic and rehabilitation treatment of idiopathic scoliosis during growth [J]. *Scoliosis Spinal Disord*, 2018, 13 (1): PMC5795289.
- [2] Weinstein SL, Dolan LA, Cheng JC, et al. Adolescent idiopathic scoliosis [J]. *Lancet*, 2008, 371 (9623): 1527-1537.
- [3] Andersen MO, Thomsen K, Kyvik KO. Adolescent idiopathic scoliosis in twins: a population-based survey [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2007, 32 (8): 927-930.
- [4] Linek P, Saulicz E, Kuszewski M, et al. Ultrasound assessment of the abdominal muscles at rest and during the aslr test among adolescents with scoliosis [J]. *Clin Spine Surg*, 2017, 30 (4): 181-186.
- [5] Zhang Y, Gu Z, Qiu G. The association study of calmodulin 1 gene polymorphisms with susceptibility to adolescent idiopathic scoliosis [J]. *Biomed Res Int*, 2014, 2014: 168106.
- [6] 吕峰. 神经系统异常在青少年特发性脊柱侧凸发病学中的作用 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2012, 20 (13): 1203-1205.
- [7] 吴洁, 邱勇, 张乐. 青少年特发性脊柱侧凸患者骨组织中雌激素受体的表达 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2007, 17 (7): 528-531.
- [8] 朱锋, 邱勇, 张兴. 褪黑素信号通路对青少年特发性脊柱侧凸软骨细胞增殖的影响 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2013, 23 (2): 156-160.
- [9] 柯扬, 刘汝落. 青少年脊柱侧弯流行病学研究进展 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2009, 17 (13): 990-994.
- [10] Stefano N, Angelo A, Lorenzo A, et al. 2011 SOSORT guidelines: orthopaedic and rehabilitation treatment of idiopathic scoliosis during growth [J]. *Scoliosis*, 2012, 7 (1): PMC3292965.
- [11] 王阳阳, 李杨. 特定运动疗法在特发性脊柱侧凸患者中的应用及效果研究进展——以 Schroth 疗法为例 [J]. *中国康复医学杂志*, 2019, 34 (11): 1378-1382.
- [12] Schreiber S, Parent EC, Khodayari E, et al. Schroth physiotherapeutic scoliosis-specific exercises added to the standard of care lead to better Cobb angle outcomes in adolescents with idiopathic scoliosis - an assessor and statistician blinded randomized controlled trial [J]. *PLoS One*, 2016, 11 (12): e0168746.
- [13] Park JH, Jeon HS, Park HW. Effects of the Schroth exercise on idiopathic scoliosis: a meta-analysis [J]. *Eur J Phy Rehabil Med*, 2018, 54 (3): 440-449.
- [14] Berdishevsky H, Lebel A, Bettany J, et al. Physiotherapy scoliosis-specific exercises - a comprehensive review of seven major schools [J]. *Scoliosis Spinal Disord*, 2016, 11: 20.
- [15] Jelačić M, Villagrasa M, Pou E, et al. Barcelona Scoliosis Physical Therapy School - BSPTS- based on classical Schroth principles: short term effects on back asymmetry in idiopathic scoliosis [J]. *Scoliosis*, 2012, 7 (S1): O57.
- [16] Zapata K, Parent EC, Sucato D. Immediate effects of scoliosis-specific corrective exercises on the Cobb angle after one week and af-

- ter one year of practice [J]. *Scoliosis Spinal Disord*, 2016, 11 (Suppl 2): 36.
- [17] Demauroy JC. Prospective study of 136 adolescent scoliosis of more than 40° treated with the Lyon brace [J]. *Scoliosis*, 2013, 8 (S1): PMC3675409.
- [18] Negrini S, Donzelli S, Negrini A, et al. Specific exercises reduce the need for bracing in adolescents with idiopathic scoliosis: a practical clinical trial [J]. *Ann Phys Rehabil Med*, 2019, 62 (2): 69–76.
- [19] Negrini A, Parzini S, Negrini MG, et al. Adult scoliosis can be reduced through specific SEAS exercises: a case report [J]. *Scoliosis*, 2008, 3: PMC2639536.
- [20] Maruyama T, Kitagawa T, Takeshita K, et al. Conservative treatment for adolescent idiopathic scoliosis: can it reduce the incidence of surgical treatment [J]. *Pediatr Rehabil*, 2003, 6 (3–4): 215–219.
- [21] Maruyama T, Takeshita K, Kitagawa T. Side-shift exercise and hitch exercise [J]. *Stud Health Technol Inform*, 2008, 135: 246–249.
- [22] Durmala J, Dobosiewicz K, Kotwicki T, et al. Influence of asymmetric mobilisation of the trunk on the Cobb angle and rotation in idiopathic scoliosis in children and adolescents [J]. *Ortop Traumatol Rehabil*, 2003, 5 (1): 80–85.
- [23] Dobosiewicz K, Durmala J, Kotwicki T. Dobosiewicz method physiotherapy for idiopathic scoliosis [J]. *Stud Health Technol Inform*, 2008, 135: 228–236.
- [24] Bialek M. Mild angle early onset idiopathic scoliosis children avoid progression under FITS method (Functional Individual Therapy of Scoliosis) [J]. *Medicine (Baltimore)*, 2015, 94 (20): e863.
- [25] Bialek M. Conservative treatment of idiopathic scoliosis according to FITS concept: presentation of the method and preliminary, short term radiological and clinical results based on SOSORT and SRS criteria [J]. *Scoliosis*, 2011, 6: PMC4566502.
- [26] 怡丽丹, 魏见伟, 王艾琳, 等. 支具治疗青少年特发性脊柱侧弯 [J]. *国际骨科学杂志*, 2021, 42 (1): 45–48, 53.
- [27] Fayssoux RS, Cho RH, Herman MJ. A history of bracing for idiopathic scoliosis in North America [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2010, 468 (3): 654–664.
- [28] Maruyama T, Takeshita K, Kitagawa T. Milwaukee brace today [J]. *Disabil Rehabil Assist Technol*, 2008, 3 (3): 136–138.
- [29] Ruffilli A, Flore M, Barile F, et al. Evaluation of night-time bracing efficacy in the treatment of adolescent idiopathic scoliosis: a systematic review [J]. *Spine Deform*, 2021, 9 (3): 671–678.
- [30] Weiss HR, Weiss GM. Brace treatment during pubertal growth spurt in girls with idiopathic scoliosis (IS): a prospective trial comparing two different concepts [J]. *Pediatr Rehabil*, 2005, 8 (3): 199–206.
- [31] Wong MS, Cheng JCY, Lam TP, et al. The effect of rigid versus flexible spinal orthosis on the clinical efficacy and acceptance of the patients with adolescent idiopathic scoliosis [J]. *Spine*, 2008, 33 (12): 1360–1365.
- [32] Degiorgi S, Piazzolla A, Tafuri S, et al. Cheneau brace for adolescent idiopathic scoliosis: long-term results. Can it prevent surgery [J]. *Eur Spine J*, 2013, 22 (Suppl 6): S815–S822.
- [33] Edmond DLH, James VR. A wireless sensor network system to determine biomechanics of spinal braces during daily living [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2010, 48: 235–243.
- [34] Donzelli SZF, Negrini S. In defense of adolescents: They really do use braces for the hours prescribed, if good help is provided. Results from a prospective everyday clinic cohort using thermobrace [J]. *Scoliosis*, 2012, 7 (1): PMC3475113.
- [35] Chalmers E, Lou E, Hill D, et al. Development of a pressure control system for brace treatment of scoliosis [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2012, 20 (4): 557–563.
- [36] Park JH, Stegall PR, Roye DP, et al. Robotic spine exoskeleton (RoSE): Characterizing the 3-D stiffness of the human torso in the treatment of spine deformity [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2018, 26 (5): 1026–1035.
- [37] 朱策, 吴强, 肖彬, 等. 智能支具个性化管理系统治疗青少年特发性脊柱侧凸的初步临床观察 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2021, 35 (7): 801–806.
- [38] Ali A, Fontanari V, Fontana M, et al. Spinal deformities and advancement in corrective orthoses [J]. *Bioengineering (Basel)*, 2020, 8 (1): PMC7824216.
- [39] 郑坤, 宋艳, 邓迁, 等. 3D 打印在矫形器领域的应用和研究进展 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2021, 29 (14): 1300–1303.
- [40] Munoz-guijosa JM, Zapata MR, Martinez CA, et al. Rapid prototyping of personalized articular orthoses by lamination of composite fibers upon 3D-printed molds [J]. *Materials (Basel)*, 2020, 13 (4): 939.
- [41] Wingyu C, Joanne Y, Kitlun Y, et al. Mechanical and clinical evaluation of a shape memory alloy and conventional struts in a flexible scoliotic brace [J]. *Ann Biomed Eng*, 2018, 46 (8): 1194–1205.
- [42] Cobetto N, Aubin CE, Parent S, et al. 3D correction of AIS in braces designed using CAD/CAM and FEM: a randomized controlled trial [J]. *Scoliosis Spinal Disord*, 2017, 12: PMC5525241.
- [43] Cobetto N, Aubin CE, Parent S, et al. Effectiveness of braces designed using computer-aided design and manufacturing (CAD/CAM) and finite element simulation compared to CAD/CAM only for the conservative treatment of adolescent idiopathic scoliosis: a prospective randomized controlled trial [J]. *Eur Spine J*, 2016, 25 (10): 3056–3064.
- [44] 张志强, 杨荣, 宋亮, 等. 4D 打印在常见矫形器技术领域的应用前景初探 [J]. *中国康复医学杂志*, 2022, 37 (7): 985–989.
- [45] Dodge GR, Bowen JR, Jeong CH, et al. Vertebral growth modulation by electrical current in an animal model: potential treatment for scoliosis [J]. *J Pediatr Orthop*, 2010, 30 (4): 365–370.

(收稿:2022-05-24 修回:2022-11-25)

(同行评议专家: 刘凌 杨波 鄢家强)

(本文编辑: 宁桦)