

运动干预青少年特发性脊柱侧凸的研究进展

Research progress on exercise intervention for adolescent idiopathic scoliosis

孙红梅,王帅兵,张茵,袁近玉,张茂林

(山东体育学院 250102 济南市)

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2024.11.10

中图分类号:R682.3 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2024)-11-1195-06

青少年特发性脊柱侧凸 (adolescent idiopathic scoliosis, AIS) 是指青少年脊柱侧凸及旋转畸形,而无先天脊柱畸形或合并神经-肌肉、骨骼等疾病,属脊柱结构三维平面畸形,典型特征是 Cobb 角 $>10^{\circ}$,约占青少年人群脊柱异常的 80%~90%^[1-2]。全球范围内 AIS 患病率约为 2%~3%, 10~16 岁为高危人群,且女性发病率高于男性,常伴有躯体平衡异常导致的椎体和躯干代偿,引起顽固性疼痛,严重者因胸廓畸形造成心肺功能障碍和脊髓损伤等^[2]。AIS 发病原因极其复杂,是多因素复合协同作用的结果,包括遗传^[3-4]、激素^[5]、神经-肌肉因素^[6-7]、骨骼和软骨异常^[8]、结缔组织异常^[1-8]、生物力学因素^[8-9]、环境因素^[9]等。在内在遗传因素作用下,神经、内分泌等异常会诱导 AIS 发生,在外界环境因素作用下,骨骼、软骨、生物力学因素等异常会加速 AIS 的进展。目前, AIS 已成为影响青少年体质健康的重要因素,早发现、早诊断、早干预成为治疗 AIS 的关键。AIS 治疗方法主要有运动疗法、支具固定和手术治疗等^[2]。国际脊柱侧凸矫形与康复治疗协会推荐 Cobb 角 $<10^{\circ}$ 时,应定期观察; $10^{\circ}\leq\text{Cobb 角}<20^{\circ}$ 时,可选择运动治疗; $20^{\circ}\leq\text{Cobb 角}<45^{\circ}$ 时,可选择支具配合运动疗法; Cobb 角 $\geq 45^{\circ}$ 时,可考虑手术治疗^[10]。AIS 的运动干预由于费用低、副作用低、可操作性强、依从性强等优势,备受社会瞩目,运动干预形式、方法、频率、时间、强度等运动学因素,运动干预效果及运动干预机制等成为研究热点^[1]。从病因学角度,运动可从源头上干预 AIS 的发病原因,其可能会成为阻止或抑制 AIS 发生发展的有效方法^[9]。基于此,笔者对 AIS 的运动干预效果及机制等进行综述,以期为 AIS 的精准防治提供理论和实践参考。

1 运动干预 AIS 的效果

目前, AIS 运动干预主要有: ①一般运动干预,主要包括低强度牵伸和强化运动,如核心肌力训练、瑜伽、普拉提

等有氧运动^[11]; ②特定运动干预,即特定运动疗法 (physiotherapeutic scoliosis specific exercises, PSSE), 主要包括德国 Schroth 疗法、西班牙 BSPTS (Barcelona scoliosis physical therapy school) 疗法、意大利 SEAS (scientific exercise approach to scoliosis) 疗法、波兰 FITS (functional individual therapy of scoliosis approach) 疗法、法国 Lyon 疗法、波兰 DoboMed 疗法、英国 Side shift 疗法等^[11,12]; ③民族传统体育项目运动干预,主要包括太极拳、易筋经、八段锦、五禽戏等^[12,13]。中、高等级循证医学证据显示,运动干预可有效控制和矫正轻度 AIS^[14]。

1.1 一般运动干预

一般运动干预主要以全身性训练为基础,通过抗阻训练、肢体牵引、躯体平衡干预等手段,改善躯干及四肢姿态异常,延缓 AIS 进展。Cobb 角是评价 AIS 的主要指标之一,一般运动干预效果和 AIS 患者 Cobb 角的改善虽未呈显著相关^[11],但 Fishman 等^[15]发现 6.8 个月瑜伽训练干预可使 AIS 患者 Cobb 角平均减小 11.6° ,且胸、腰段 Cobb 角的改善更为明显。本体感觉神经肌肉促进练习作为常用的一般运动干预方法,可经由适当运动模式牵拉肌腱,纠正错误身体姿势,通过影响神经系统,刺激习惯性动作变化并改善身体对位置变化的感知。Stepień 等^[16]认为本体感觉神经肌肉促进练习符合国际脊柱侧凸矫形和康复治疗协会指南要求,可用于 AIS 患者保守治疗,有针对性的本体感觉神经肌肉促进练习对 AIS 身体姿势参数均具积极影响。Lee 等^[17]采用 30min/次, 3 次/周,为期 6 周的本体感觉神经肌肉促进练习干预女大学生特发性脊柱侧凸,发现其脊柱摆动改善,静态和动态平衡能力提升。有氧运动被认为是改善 AIS 患者呼吸功能的有效方法, AIS 患者分别进行 12 周有氧训练和有氧联合抗阻训练干预后,其呼吸功能显著改善,最大通气能力增加,且后者的干预效果更明显^[18]。

1.2 特定运动干预

PSSE 以特定主动运动矫正和训练为主,同时辅以本体感觉、平衡和神经运动控制训练等核心稳定性训练,最终目的是利用姿势矫正,减少甚至阻止脊柱侧凸造成的脊柱两侧负荷失衡诱发的脊柱不对称生长,进而防止侧凸继续恶化的过程,即扭转“恶性循环”。PSSE 可延缓 AIS 患者

基金项目: 国家社会科学基金项目 (19BTY114)

第一作者简介: 女 (1980-), 教授, 硕士生导师, 研究方向: 运动与人体健康促进

电话: (0531) 89655387 E-mail: 511633810@qq.com

通讯作者: 张茂林 E-mail: stzhmlin@sina.com

Cobb角进展,改善患者躯干不对称,且对患者自我形象和心理健康有积极效果^[19]。采用 Schroth 疗法联合 SEAS 疗法干预轻度 AIS 的研究^[20]显示,31 例 AIS 患者 Cobb 角平均为 19.23°,6 个月联合干预后,Cobb 角平均改善 2.9°,轴向躯干旋转角改善 1.2°,脊柱侧凸研究学会患者问卷-22 评分改善。Kim 等^[21]的研究显示,PSSE 在减缓 AIS 患者 Cobb 角进展,改善疼痛和生活质量等方面效果显著。

不同 PSSE 治疗目的大致相同。Schroth 疗法是应用最广泛的 PSSE 疗法之一,主要以特定姿势矫正、姿势感知矫正和呼吸模式矫正为核心治疗手段^[11]。Schroth 疗法可减缓 AIS 患者 Cobb 角(<30°)进展,提升生活质量,且对于 Cobb角(>30°)较大患者亦有一定疗效。Kim 等^[21]研究发现,12 周 Schroth 疗法显著改善了 AIS 患者 Cobb 角及背部不对称状态。影像学研究显示,1 例胸弯、腰弯 Cobb 角分别为 70°、48°的 AIS 患者,Schroth 治疗 1 年后,胸弯、腰弯 Cobb 角分别降低 32°、18°^[22]。BSPTS 疗法是针对不同侧凸分型的三维自我矫正。前瞻性队列研究显示,Risser 分级为 0、未佩戴过支具的 AIS 患者随机分为 BSPTS 组(Cobb 角 16.3°±3.4°)和对照组(Cobb 角 16.0°±3.2°),前者接受 3d/周,15min/d BSPTS 训练,内容包含仰卧、坐立、侧卧、俯卧和站立 5 种体位的 BSPTS 练习,每周通过有 2 个问题的电子邮件询问参与者前 1 周内 BSPTS 训练的频率和时间,后者仅观察随访,两组每 3~9 个月进行 1 次临床评估,以确定是否需要支具;6 个月后随访时 BSPTS 组和对照组 Cobb 角分别为 16.6°±5.2°和 19.3°±4.9°,1 年后随访时 BSPTS 组和对照组 Cobb 角分别为 16.3°±5.8°和 21.6°±6.1°,且两组支具使用情况相似(运动组使用率 37%,对照组使用率 43%),BSPTS 组 Cobb 角进展显著延缓,甚至停止^[23]。

此外,PSSE 结合支具、传统医学疗法的效果亦得到较高等级实验证据。AIS 患者接受 6 个月 PSSE 联合胸腰骶支具佩戴治疗后,平均 Cobb 角降低 4.87°,呼吸功能、躯干肌肉耐力明显改善,而单纯接受支具治疗的 AIS 患者仅平均 Cobb 角降低 2.05°,其他无显著改善^[24]。接受 Schroth 疗法联合筋膜链康复技术治疗 AIS 1 个月后,患者 Cobb 角、脊柱旋转角显著改善,且改善效果优于单纯 Schroth 疗法^[25]。相比于单纯 Schroth 疗法,接受 6 个月 Schroth 疗法联合中药药剂治疗后,AIS 患者 Cobb 角、肺通气能力等改善更显著^[26]。

1.3 民族传统体育项目干预

太极拳中的“云手”“野马分鬃”“揽雀尾”“搂膝拗步”“尾闾中正”、易筋经的“九鬼拔马刀势”“打躬势”、八段锦的“两手攀足固肾腰”“摇头摆尾去心火”、五禽戏的“虎戏”“鹿戏”“熊戏”等,这些动作均以脊柱为中轴,通过屈、伸、侧屈、回旋及环转等练习,增加腰背肌,尤其是脊柱两侧核心肌群力量,改善脊柱周围筋膜、肌腱、关节囊、软骨、韧带等功能,以恢复脊柱生物力学平衡,提高稳定性。

近来,民族传统体育项目干预 AIS 倍受学者青睐。30

例 AIS 患者接受 12 周八段锦联合督灸干预后,Cobb 角及椎体旋转角均显著改善^[27]。12 周五禽戏联合旋转式呼吸训练干预 AIS 后,AIS 患者躯干倾斜角、两侧竖脊肌硬度差值、莫尔纹图等高线间距及脊柱侧凸研究学会患者问卷-22 评分显著改善,治疗效果显著高于以直腿抬高、小燕飞和单腿单手支撑为内容的体育锻炼组^[28]。相比于支具治疗,6 个月易筋经联合整脊推拿治疗 AIS 的总体有效率、Cobb 角、Cobb 角矫正率及脊柱侧凸研究学会患者问卷-22 评分显著改善,提示该法在纠正侧凸,提高脊柱功能,减轻疼痛,改善心理健康等方面有积极效果^[29]。不同民族传统体育项目的不同动作对脊柱的影响各不相同,亦有自己的适应证和禁忌证,临床可根据 AIS 患者实际症状选择最适宜的项目对症治疗^[13]。

基于上述分析,综合运动干预 AIS 的 Meta 分析^[2,30]、可视化分析^[31]等,将运动干预 AIS 方法的运动学特征总结如下(表 1),不同运动干预方法的运动学特征不尽相同,不同运动干预方法的治疗效果也不尽相同,且各具优、劣势。结合 Peng 等^[32]、Baumann 等^[33]、Romano 等^[34]的 Meta 分析发现,PSSE 干预 AIS 的效果优于一般运动,而一般运动的干预效果优于传统脊柱训练。但是有关不同运动方法干预 AIS 效果的对比研究并不系统,尤其是不同 PSSE 间、不同民族传统体育项目间及不同 PSSE 与不同民族传统体育项目间干预效果的对比研究尚少。

2 运动干预 AIS 的机制

2.1 改善神经感觉功能

AIS 患者脊柱神经-肌肉系统调控的姿势平衡受到破坏^[7],存在不同程度的本体感觉障碍^[6,9]、前庭功能障碍^[7]、体感诱发电位异常^[9]、感觉统合障碍^[9]等,而外周的本体感觉信息、前庭感觉信息、视觉信息等异常甚至错误的感觉信号传输到脊髓、脑干、大脑或小脑等中枢神经系统后,可产生异常平衡指令,导致错误的肌肉控制,进一步恶化脊柱平衡^[9]。AIS 患者前庭功能康复锻炼干预后,姿势控制能力、步态稳定性、平衡能力均显著改善,前庭器官功能及平衡控制能力提升^[43]。Monticone 等^[37]和 Dupuis 等^[44]分别以本体感觉训练为主的任务导向训练和整体体位再教育法对 AIS 患者干预后,患者本体感觉能力显著提升,脊柱畸形改善。Yagei 等发现中度 AIS 患者 10 周核心稳定性训练干预和身体意识训练干预可减小 Cobb 角,显著性改善患者姿势和触觉垂直性感知以及主观视觉^[45]。运动通过改善前庭系统、本体感觉系统、视觉系统的感觉功能,减轻异常感觉信号的中枢输入,降低异常肌肉控制,进而通过调整脊柱神经-肌肉系统平衡状态来改善 AIS。

2.2 改善核心肌力

脊柱神经-肌肉系统异常姿势控制使得脊柱骨骼肌肉系统形成错误肌肉控制,导致脊柱动力学结构产生代偿性变化,凸、凹侧肌张力失衡,不加以调节干预会导致两侧肌张力失衡逐渐加剧,甚至无法参与维持脊柱稳定^[7]。目

前,多数运动疗法主要是以核心肌力训练为基础的运动干预^[6]。核心肌力训练属非平衡性、不稳定性、多负荷、多形式的力量训练,在安全前提下,最大负荷、最不稳定状态下的闭链运动干预可自发性改善脊柱浅层及深层稳定性肌群功能^[46]。中立位训练、等长收缩、静态拉伸等核心肌力训练可促进脊柱两侧弱化肌群力量及肌纤维长度等恢复,并可对正常肌群产生积极影响,进一步强化神经控制能力和脊柱稳定系统,加快脊柱功能恢复;动、静态拉伸等形式的训练可有效牵引强劲肌群,使侧凸脊柱恢复至正常的负重状态^[47]。核心肌力训练亦是一种本体感觉训练,多负荷、多形式的力量训练可刺激脊柱浅、深层肌群肌梭、腱梭等本体感受器,强化本体感觉的感知能力,使之感受肌肉牵拉、收

缩和关节伸展,改善弱化肌肉延展,恢复强劲肌肉长度及韧性,促进正常感觉功能恢复,进而改善脊柱神经-肌肉系统的调控^[48]。躯干偏移角度如 Cobb 角、椎体顶端旋转角等,可反映脊柱两侧肌肉核心力量失衡程度^[49]。Gür 等^[50]对 12 例 AIS 患者进行 10 周核心肌力训练干预后发现,其 Cobb 角、椎体顶端旋转角及躯干外观畸形等均有明显改善;Yagci 等^[49]的研究结果与此基本一致,提示核心肌力训练可通过改善脊柱两侧肌力平衡矫正脊柱异常姿势。

此外,刘晓慧等^[42]的研究提供了运动可通过改善核心肌力以干预 AIS 进展更为直接的实验证据。16 例 AIS 患者进行 12 周瑜伽练习干预,采集干预前、后背部肌电信号,发现干预前 AIS 患者背部凸侧和凹侧椎旁肌积分肌电

表 1 不同运动干预方法的运动学特征

运动干预方法	干预手段	干预频率	干预周期	结局指标	干预优劣势
一般运动干预	抗阻训练、肢体牵引、 躯体平衡等 ^[2,19-21]	3~5 次/周,30~ 60min/次 ^[2,19-21]	1.5~12 个月 ^[2,19-21]	Cobb角、呼吸功能、外观 美学指标 ^[2,19-21]	以全身性训练为基础,缺乏针对性训练 ^[2,19-21]
特定运动干预					
Schroth 疗法	姿势矫正、姿势感知 矫正以及呼吸模式 矫正 ^[11,12]	3次/周, 60min/次 ^[2,12]	3~12 个月 ^[2,11,12,31]	Cobb角、躯干旋转角、脊 柱侧凸研究学会患者问 卷 ^[22] ^[2,11,12]	强调全天姿势纠正,将训练融入日 常生活,需住院或医疗机构治疗 ^[11]
BSPTS 疗法	自我姿势矫正、呼吸 模式矫正 ^[11,12]	3次/周, 45min/次 ^[11]	6~12 个月 ^[11,31]	Cobb角、躯干旋转角、外 观美学指标 ^[11]	缓解脊柱弯曲“恶性循环”,强调门诊 治疗 ^[11]
SEAS 疗法	自我姿势矫正 ^[11,12]	2~3 次/周, 45min/次或 6~7 次/周,20min/次 ^[11]	12个月及以上 ^[12,31]	Cobb角、躯干旋转角、外 观美学指标、神经运动 能力指标 ^[12]	不需任何外部辅助,个性化主动自 我矫正 ^[12]
FITS 疗法	姿势矫正、呼吸模式 矫正 ^[12,32]	3次/周,45~ 60min/次 ^[12,32]	12个月及以上 ^[12,32]	Cobb角 ^[12,32]	Cobb角 10°~15°AIS 患者疗效最佳, 强调个性化治疗 ^[12,32]
Lyon 疗法	姿势矫正、呼吸模式 矫正 ^[12]	2~3 次/周,45~ 60min/次 ^[11,12]	6个月及以上 ^[11,12]	Cobb角、呼吸功能 ^[11,35]	Cobb角>20°AIS 患者疗效最佳,强调 结合支具治疗 ^[11]
DoboMed 疗法	自我姿势矫正、呼吸 模式矫正 ^[12]	3次/周,45~ 60min/次 ^[11,31]	6~12 个月 ^[12,31]	Cobb角、呼吸功能 ^[12]	注重矢状面前、后凸二维矫正,忽略 侧凸及旋转三维矫正 ^[11,35]
Side shift 疗法	自我姿势矫正 ^[11,12]	3次/周, 45min/次 ^[11,31]	12个月及以上 ^[11,31]	Cobb角 ^[12]	注重冠状面前、后凸二维矫正,忽略 侧凸及旋转三维矫正 ^[11,35]
民族传统体育 项目干预	太极拳、易筋经、八 段锦、五禽戏 ^[13,27-29]	3~5 次/周,45~ 60min/次 ^[13,27-29]	3~6 个月 ^[13,27-29]	Cobb角、呼吸功能、脊柱 侧凸研究学会患者问 卷 ^[22] ^[13,27-29]	以脊柱为中轴,通过屈、伸、侧曲、回 旋及环转等练习,恢复脊柱生物力 学平衡,各项目具动作特异性 ^[13,27-29]

表 2 不同运动干预方法的治疗效果

研究	运动干预方法	运动干预方案	运动干预结果
妙定坤, 等 ^[36]	运动组:PSSE 对照组:常规健康宣教	运动组:60min/次,3 次/周,12 周	运动组生活质量显著改善
Monticone, et al ^[37]	运动组:PSSE 对照组:伸展训练	运动组:门诊 60min/周;居家 30min/次,2 次/周,1 年后随访 对照组:门诊 60min/周;居家 30min/次,2 次/周,1 年后随访	运动组 Cobb 角和生活 质量改善更显著
Kim, et al ^[21]	运动组:PSSE 对照组:普拉提	运动组:60min/次,3 次/周,12 周 对照组:60min/次,3 次/周,12 周	运动组 Cobb 角和生活 质量改善更显著
Kocaman, et al ^[38]	运动组:PSSE 对照组:核心稳定性训练	运动组:30min/次,3 次/周,10 周 对照组:30min/次,3 次/周,10 周	运动组 Cobb 角和生活 质量改善更显著
Mohamed, et al ^[39]	运动组:PSSE 对照组:本体感觉神经肌肉促进	运动组:60min/次,3 次/周,24 周 对照组:60min/次,3 次/周,24 周	运动组 Cobb 角改善 更显著
Yagci, et al ^[40]	运动组:PSSE 对照组:传统脊柱训练	运动组:60min/次,2 次/周,10 周 对照组:60min/次,2 次/周,10 周	运动组 Cobb 角改善 更显著
廖粤生 ^[41]	运动组:核心稳定性训练 对照组:常规观察	运动组:50min/次,3 次/周,12 周	运动组 Cobb 角显著 改善
刘晓慧, 等 ^[42]	运动组:瑜伽训练 对照组:常规观察	运动组:90min/次,4 次/周,12 周	运动组 Cobb 角显著 改善

值和平均肌电波幅比值显著不对称,干预后凹侧椎旁肌积分肌电值和平均肌电波幅比值均显著增加,并出现肉眼可见的背部形态改善,提示经过 12 周瑜伽练习干预后 AIS 患者背部凸侧和凹侧肌力对称性改善。

2.3 改善内分泌功能

“双重神经-骨骼理论”认为,瘦素-下丘脑-交感神经系统等自主神经系统和神经-骨成熟时机自动调节系统等躯体神经系统双重调控下的脊柱和躯干发育失衡引起 AIS 发生^[7]。异常的瘦素-下丘脑-交感神经系统可增强下丘脑瘦素敏感性,增强的瘦素敏感性可经由交感神经系统双向传递到轴向骨骼,诱导脊柱侧凸发生。骨质骨量相对减少、脊柱生长调节异常、钙调节蛋白功能障碍等都可加剧脊柱和躯干发育不协调^[7]。虽然目前尚未见到有关运动通过改善内分泌功能干预 AIS 的直接实验证据,但有关运动通过改善内分泌功能干预运动系统功能的研究提供了间接实验证据。运动可通过改善维生素 D 代谢酶、内分泌调节因子、脂肪和骨骼肌等血液循环外储存组织及维生素 D 受体等方式,调节血液循环维生素 D 水平,改善骨骼健康^[51]。运动可通过增加骨骼肌中雌激素生成前体物质脱氢表雄酮及肌肉中芳香化酶的蛋白质和 mRNA 水平等,改善骨骼肌雌激素生成^[52]。运动还可通过调控骨骼特异性骨蛋白骨钙素和成纤维细胞生长因子 23 分泌,调节机体瘦素、脂联素等多种反馈信号通路,作用于骨骼代谢,改善其健康^[53]。长期运动可使瘦素、脂联素等作用于骨保护素/核因子 κ B 受体活化因子配体/核因子 κ B 受体活化因子系统,调控成骨细胞和破骨细胞表达分化,进而影响内分泌通路,在维持骨代谢平衡中发挥重要作用^[54]。运动或可通过改善雌激素、瘦素、脂联素、维生素 D 等激素分泌,经由自主神经系统调控脊柱和躯干协调发育,阻止或延缓 AIS 进展,但这尚需大量实验研究证实。

2.4 改善表观遗传功能

从全基因组关联分析发现的 AIS 基因易感性及基因多态性异常表达^[55],到外显子测序发现的相关基因位点突变^[9],再到表观遗传学发现的相关基因的异常甲基化^[4],均提供了不同等级的 AIS 发生发展的遗传学原因证据。近年,表观遗传修饰已成为运动促进人体健康研究的热点。表观遗传修饰具可逆性,运动可作为外源手段调控表观遗传修饰,通过对特定基因表观遗传修饰的调控可防治相关疾病^[56,57]。长期有氧运动、抗阻运动均可引起 DNA 损伤、DNA 甲基化等表观遗传的积极改变^[58],Boyne 等^[59]、Gargallo 等^[60]有关有氧运动和抗阻运动对表观遗传修饰影响的实验研究结果提示,运动干预 AIS 相关基因的表观遗传修饰或可延缓,甚至阻止其发生发展。

3 小结

AIS 属多病因疾病,运动干预 AIS 备受关注。不同运动干预方法及干预方案的不同运动学特征使得干预效果不尽相同。针对 AIS 发病原因的运动干预机制研究可为运

动精准干预 AIS 奠定基础。AIS 运动干预方法较为丰富,各种运动干预方案各具优劣,但不同的运动干预方案缺乏标准化的实施策略,研究结果间尚无法比较,且不同运动方法干预效果的对比研究尚少。现有运动干预研究主要以“普适性”干预为主,缺乏针对患者年龄、性别、病史、病因、侧凸类型及程度等多因素的个性化精准干预方案,且干预效果主要为干预周期前、后的对比,干预周期内的“动态”干预效果观察较少。目前有关运动干预 AIS 的机制研究尚处于“匮乏期”,尤其是运动改善 AIS 患者内分泌和表观遗传功能的研究更少,尚需大量系统实验研究为运动干预 AIS 有效性提供更高等级的实验证据。

4 参考文献

- 侯召猛, 苏少亭, 陈龙豪, 等. 青少年特发性脊柱侧凸研究热点及趋势的可视化分析[J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(21): 3424-3430.
- 韩娜娜, 余蕾, 黄晖明. 功能性训练对青少年特发性脊柱侧凸疗效的 Meta 分析[J]. 中国学校卫生, 2021, 42(8): 1169-1174.
- Haller G, McCall K, Jenkitkasemwong S, et al. A missense variant in SLC39A8 is associated with severe idiopathic scoliosis[J]. Nat Commun, 2018, 9(1): 4171.
- Liu G, Wang L, Wang X, et al. Whole-genome methylation analysis of phenotype discordant monozygotic twins reveals novel epigenetic perturbation contributing to the pathogenesis of adolescent idiopathic scoliosis[J]. Front Bioeng Biotechnol, 2019, 7: 364.
- 王成龙, 武书丽. 内分泌激素在青少年特发性脊柱侧凸中的应用进展[J]. 中国学校卫生, 2023, 44(8): 1276-1280.
- 廖粤生, 白莉莉. 青少年特发性脊柱侧凸发病机制及运动干预研究进展[J]. 中国学校卫生, 2022, 43(9): 1436-1440.
- 张宸洁, 董静梅. 青少年特发性脊柱侧凸的神经-肌肉系统调控机制研究进展[J]. 中国学校卫生, 2023, 44(8): 1266-1271.
- 崔宝林, 房玮, 李华南, 等. 青少年特发性脊柱侧凸病因学研究进展[J]. 医学理论与实践, 2022, 35(18): 3085-3087.
- 庄乾宇. 青少年特发性脊柱侧凸的病因学研究现状和进展[J]. 中华骨与关节外科杂志, 2021, 14(5): 337-343.
- 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: 3.
- 封玉琨, 刘介生, 吕振, 等. 青少年特发性脊柱侧凸运动康复治疗的研究进展[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2021, 31(11): 1039-1043.
- 周璇, 杜青. 脊柱侧凸特定运动疗法研究进展[J]. 中国康复医学杂志, 2016, 31(4): 478-481.
- 朱顺昌, 周红海, 黄伟恩, 等. 传统运动疗法防治脊柱病的研究进展[J]. 中国中医骨伤科杂志, 2019, 27(3): 86-88.
- 李锋华, 杨军林, 杨云琳, 等. 特定运动训练对骨骼未成熟轻度脊柱侧凸患儿干预效果评估[J]. 中国学校卫生, 2022, 43(11): 1737-1739, 1744.

15. Fishman LM. Isometric yoga-like maneuvers improve adolescent idiopathic scoliosis—a nonrandomized control trial [J]. *Glob Adv Health Med*, 2021, 10: 2164956120988259.
16. Stepień A, Fabian K, Graff K, et al. An immediate effect of PNF specific mobilization on the angle of trunk rotation and the trunk–pelvis–hip angle range of motion in adolescent girls with double idiopathic scoliosis—a pilot study[J]. *Scoliosis Spinal Disord*, 2017, 12(1): 29.
17. Lee BK. Influence of the proprioceptive neuromuscular facilitation exercise programs on idiopathic scoliosis patient in the early 20s in terms of curves and balancing abilities: single case study[J]. *J Exerc Rehabil*, 2016, 12(6): 567–574.
18. Xavier VB, Avanzi O, de Carvalho BDMC, et al. Combined aerobic and resistance training improves respiratory and exercise outcomes more than aerobic training in adolescents with idiopathic scoliosis: a randomised trial[J]. *J Physiother*, 2020, 66(1): 33–38.
19. Thompson JY, Williamson EM, Williams MA, et al. Effectiveness of scoliosis-specific exercises for adolescent idiopathic scoliosis compared with other non-surgical interventions: a systematic review and meta-analysis[J]. *Physiotherapy*, 2019, 105(2): 214–234.
20. 袁望舒, 沈建雄, 陈丽霞, 等. 脊柱侧凸特定性训练对轻度青少年特发性脊柱侧凸的治疗价值[J]. *协和医学杂志*, 2020, 11(1): 40–44.
21. Kim G, HwangBo PN. Effects of Schroth and Pilates exercises on the Cobb angle and weight distribution of patients with scoliosis[J]. *J Phys Ther Sci*, 2016, 28(3): 1012–1015.
22. Lebel A, Lebel VA. Severe progressive scoliosis in an adult female possibly secondary thoracic surgery in childhood treated with scoliosis specific Schroth physiotherapy: case presentation[J]. *Scoliosis Spinal Disord*, 2016, 11(S2): 41.
23. Zapata KA, Sucato DJ, Jo C. Physical therapy scoliosis-specific exercises may reduce curve progression in mild adolescent idiopathic scoliosis curves[J]. *Pediatr Phys Ther*, 2019, 31(3): 280–285.
24. Gao C, Zheng Y, Fan C, et al. Could the clinical effectiveness be improved under the integration of orthotic intervention and scoliosis-specific exercise in managing adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2019, 98(8): 642–648.
25. 徐斯颢, 罗斌华, 陈蕊, 等. 施罗斯疗法与筋膜链康复技术联合运用对青少年特发性脊柱侧凸的疗效研究[J]. *中国医学创新*, 2020, 17(32): 144–147.
26. 谢锐填, 魏伟明, 黄济嘉, 等. 中药酊剂联合施罗特疗法治疗青少年特发性脊柱侧凸效果[J]. *中外医学研究*, 2020, 18(9): 35–37.
27. 黄祖波, 周浩, 唐兴, 等. 八段锦联合督灸改善轻度青少年特发性脊柱侧凸(阳虚型)的临床疗效研究[J]. *四川中医*, 2023, 41(12): 183–185.
28. 朱安琪. 五禽戏结合旋转式呼吸训练治疗青少年特发性脊柱侧凸的疗效观察[D]. 上海中医药大学, 2023.
29. 刘苗. 整脊推拿配合易筋经锻炼治疗青少年特发性脊柱侧凸的临床研究[D]. 山东中医药大学, 2023.
30. 常赢, 夏渊, 孙韞頔, 等. 不同特定运动治疗青少年特发性脊柱侧凸有效性的网状 Meta 分析 [J]. *中国组织工程研究*, 2024, 28(36): 5899–5904.
31. 郑晓东, 高山, 韩文瑾, 等. 青少年特发性脊柱侧弯治疗的可视化分析[J]. *中国组织工程研究*, 2025, 29(3): 645–653.
32. Peng C, Li D, Guo T, et al. Efficacy of different exercises on mild to moderate adolescent idiopathic scoliosis: a systematic review and meta-analysis[J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2024, 103(6): 494–501.
33. Baumann AN, Orellana K, Oleson CJ, et al. The impact of patient scoliosis-specific exercises for adolescent idiopathic scoliosis: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials with subgroup analysis using observational studies[J]. *Spine Deform*, 2024, 12(3): 545–559.
34. Romano M, Minozzi S, Bettany-Saltikov J, et al. Therapeutic exercises for idiopathic scoliosis in adolescents[J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2024, 2(2): CD007837.
35. 石茂彪, 马亚萍, 季文军, 等. 青少年特发性脊柱侧凸非手术治疗的现状[J]. *中国矫形外科杂志*, 2023, 31(13): 1189–1193.
36. 妙定坤, 张潜龙. 以脊柱侧凸特定运动疗法为核心的康复干预在轻度特发性脊柱侧凸中的应用[J]. *实用临床医药杂志*, 2018, 22(23): 160–162.
37. Monticone M, Ambrosini E, Cazzaniga D, et al. Active self-correction and task-oriented exercises reduce spinal deformity and improve quality of life in subjects with mild adolescent idiopathic scoliosis: results of a randomised controlled trial[J]. *Eur Spine J*, 2014, 23(6): 1204–1214.
38. Kocaman H, Bek N, Kaya MH, et al. The effectiveness of two different exercise approaches in adolescent idiopathic scoliosis: a single-blind, randomized-controlled trial[J]. *PLoS One*, 2021, 16(4): e0249492.
39. Mohamed RA, Yousef AM. Impact of Schroth three-dimensional vs. proprioceptive neuromuscular facilitation techniques in adolescent idiopathic scoliosis: a randomized controlled study[J]. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*, 2021, 25(24): 7717–7725.
40. Yagci G, Ayhan C, Yakut Y. Effectiveness of basic body awareness therapy in adolescents with idiopathic scoliosis: a randomized controlled study [J]. *J Back Musculoskeletal Rehabil*, 2018, 31(4): 693–701.
41. 廖粤生. 核心稳定性训练对轻度青少年特发性脊柱侧凸治疗效果的研究[D]. 天津师范大学, 2022.
42. 刘晓慧, 杜美, 牛会康, 等. 瑜伽锻炼改善 AIS 大学生患者脊柱形态与椎旁肌肌电信号的研究[J]. *湖北体育科技*, 2021, 40(11): 984–989, 1034.
43. Melo RS, Lemos A, Paiva GS, et al. Vestibular rehabilitation exercises programs to improve the postural control, balance

- and gait of children with sensorineural hearing loss: a systematic review [J]. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 2019, 127: 109650.
44. Dupuis S, Fortin C, Caouette C, et al. Global postural re-education in pediatric idiopathic scoliosis: a biomechanical modeling and analysis of curve reduction during active and assisted self-correction[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2018, 19(1): 200.
45. Yagei G, Yakut Y. Core stabilization exercises versus scoliosis-specific exercises in moderate idiopathic scoliosis treatment[J]. *Prosthet Orthot Int*, 2019, 43(3): 301-308.
46. 于小明, 周欢霞, 蒋黎明, 等. 非手术脊柱减压系统结合核心肌力训练治疗腰椎间盘突出症的疗效观察[J]. *中国医刊*, 2016, 51(6): 79-81.
47. 李春煜. 早期腰背肌核心肌力训练对胸腰段骨折术后患者脊柱功能及步行功能恢复的影响[J]. *临床医学*, 2023, 43(12): 83-85.
48. 邱霞, 周晓吉, 景慧云, 等. 腰部核心肌力训练联合呼吸训练对 LDH 患者术后脊柱功能及生活质量的影响[J]. *河北医药*, 2023, 45(3): 361-364.
49. 闫旭. 核心肌力训练联合非手术脊柱减压对腰椎间盘突出症患者的康复疗效研究[D]. 武汉体育学院, 2023.
50. Gür G, Ayhan C, Yakut Y. The effectiveness of core stabilization exercise in adolescent idiopathic scoliosis: a randomized controlled trial[J]. *Prosthet Orthot Int*, 2017, 41(3): 303-310.
51. 张景华, 曹振波. 运动对机体内维生素 D 代谢影响机制研究进展[J]. *中国运动医学杂志*, 2023, 42(10): 825-835.
52. 冯钰, 史仍飞. 运动与骨骼肌内雌激素代谢的研究进展[J]. *生命科学*, 2019, 31(10): 1047-1053.
53. 徐帅, 李世昌, 方幸. 运动与骨内分泌系统研究进展[J]. *体育学刊*, 2017, 24(3): 139-144.
54. 王峰, 郑陆. 脂联素、瘦素与运动及骨代谢的关系[J]. *中国骨质疏松杂志*, 2016, 22(2): 221-227.
55. Zhu Z, Xu L, Leung-Sang Tang N, et al. Genome-wide association study identifies novel susceptible loci and highlights Wnt/beta-catenin pathway in the development of adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Hum Mol Genet*, 2017, 26(8): 1577-1583.
56. 胡晓磐, 李世昌, 孙朋. 运动对骨质影响的表观遗传机制研究进展[J]. *体育科学*, 2020, 40(4): 59-66.
57. Barrón-Cabrera E, Ramos-Lopez O, González-Becerra K, et al. Epigenetic modifications as outcomes of exercise interventions related to specific metabolic alterations: a systematic review[J]. *Lifestyle Genom*, 2019, 12(1-6): 25-44.
58. 杨裴. 不同运动方式对人体 DNA 损伤、DNA 甲基化和端粒长度的影响[J]. *中国组织工程研究*, 2024, 28(1): 147-152.
59. Boyne DJ, King WD, Brenner DR, et al. Aerobic exercise and DNA methylation in postmenopausal women: an ancillary analysis of the Alberta Physical Activity and Breast Cancer Prevention (ALPHA) Trial [J]. *PLoS One*, 2018, 13(6): e0198641.
60. Gargallo P, Colado JC, Jueas A, et al. The effect of moderate-versus high-intensity resistance training on systemic redox state and DNA damage in healthy older women[J]. *Biol Res Nurs*, 2018, 20(2): 205-217.
- (收稿日期:2024-05-27 修回日期:2024-07-30)
(本文编辑 谭 啸)