

中度 Lenke 3CN 型女性青少年特发性脊柱侧弯的 静态平衡足底压力特征

史 祎¹, 许亚民¹, 马晓丽¹, 王 政², 李宝新², 孟林盛³

(1. 山西工商学院 体育学院, 太原 030072; 2. 齐鲁理工学院 医学院, 济南 250200; 3. 山西大学 体育学院 太原 030006)

摘要:目的 了解中度 Lenke 3CN 型女性青少年特发性脊柱侧弯 (adolescent idiopathic scoliosis, AIS) 与同龄健康青少年的静态平衡足底压力特征差异, 为青少年脊柱侧弯的筛查、评估、治疗和评价预后提供科学依据。方法 选取 30 例中度 Lenke 3CN 型女性青少年特发性脊柱侧弯为 AIS 组, 30 例同龄健康女性青少年为对照组, 采集静态平衡足底压力数据, 比较分析两组足底压力分布特征。结果 足底压力特征方面, AIS 组左、右足的平均压力 ($P < 0.05$) 和后足压力 ($P < 0.05$) 均显著大于对照组, 前足压力均显著小于对照组 ($P < 0.05$), 双足对称性指数 (symmetry index, SI) 显著大于对照组 ($P < 0.05$)。AIS 组左足的足中内侧区和第 1 脚趾区足底压力显著大于对照组 ($P < 0.05$), 第 1、2、3、4、5 跖骨区足底压力显著小于对照组 ($P < 0.05$); AIS 组右足的足跟内侧区和第 1 脚趾区足底压力显著大于对照组 ($P < 0.05$), 足中外侧区、第 3、4、5 跖骨区和第 3、4、5 脚趾区足底压力显著小于对照组 ($P < 0.05$)。足底压力中心 (center of pressure, COP) 方面, AIS 组足底 COP 轨迹长度、95% 信赖区间椭圆面积、COP 左-右移动最大距离 (COP-X) 和 COP 前-后移动最大距离 (COP-Y) 均显著大于对照组 ($P < 0.05$)。结论 中度 Lenke 3CN 型 AIS 患者与同龄健康青少年的静态平衡足底压力特征存在显著性差异, 足部压力会偏向侧弯凸侧, 双足的对称性、稳定性较差, 平衡控制能力较弱。

关键词: Lenke 3CN 型; 青少年特发性脊柱侧弯; 足底压力; 压力中心; 静态平衡

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.05.019

Characterization of Static Equilibrium Plantar Pressure in Female Adolescents with Moderate Lenke 3CN Idiopathic Scoliosis

SHI Yi¹, XU Yamin¹, MA Xiaoli¹, WANG Zheng², LI Baoxin², MENG Linsheng³

(1. College of Physical Education, Shanxi Technology and Business University, Taiyuan 030072, China; 2. School of Medicine, Qilu Institute of Technology, Ji'nan 250200, China; 3. College of Physical Education, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Objective To analyze the differences in static balance plantar pressure characteristics between female adolescent idiopathic scoliosis (AIS) patients with moderate Lenke 3CN and healthy adolescents of the same age, and provide a scientific basis for scoliosis screening, assessment, treatment, and prognosis evaluation. **Methods** A total of 30 female patients with moderate Lenke 3CN AIS as the AIS group and 30 healthy female adolescents of the same age as the control group were selected, respectively. The plantar pressure data of the subjects were collected, and the characteristics of equilibrium plantar pressure distributions in two groups were

comparatively analyzed. **Results** Regarding the plantar pressure characteristics, the average pressure ($P < 0.05$) and hindfoot pressure ($P < 0.05$) of the left and right foot in the AIS group were significantly greater than those of the control group, the forefoot pressure was significantly lower than that of the control group ($P < 0.05$), and the symmetry index (SI) of both feet was significantly greater than that of the control group ($P < 0.05$). The plantar pressure of the left foot in the AIS group was significantly larger than that of the control group in the medial mid-foot area and 1st toe area ($P < 0.05$), and significantly smaller than that of the control group in the 1st, 2nd, 3rd, 4th and 5th metatarsal areas ($P < 0.05$); the plantar pressure of the right foot in the AIS group was significantly greater than that of the control group in the medial heel area and the 1st toe area ($P < 0.05$), and significantly smaller than that of the control group in the lateral mid-foot area, the 3rd, 4th, 5th metatarsal area and 3rd, 4th, 5th toe area ($P < 0.05$); and the plantar pressure in the right foot of the AIS group was significantly smaller than that of the control group in the medial heel area and 1st toe area ($P < 0.05$). The plantar pressures at lateral midfoot area, the 3rd, 4th, 5th metatarsal area and the 3rd, 4th, 5th toe area of the right foot were significantly larger than those of the control group ($P < 0.05$). Regarding the center of pressure (COP), the length of the COP trajectory, the ellipse area of the 95% confidence interval, the maximum distance of COP left-right movement (COP-X), and the maximum distance of COP anterior-posterior movement (COP-Y) of the AIS group were significantly larger than those of the control group ($P < 0.05$). **Conclusions** There are significant differences in static balance plantar pressure characteristics between female AIS patients with moderate Lenke 3CN and healthy female adolescents of the same age, with foot pressure favoring the side of the lateral convexity, poorer symmetry and stability of the feet, and weaker balance control.

Key words: type Lenke 3CN; adolescent idiopathic scoliosis; plantar pressure; center of pressure; static balance

青少年特发性脊柱侧弯 (adolescent idiopathic scoliosis, AIS) 是一种临床上 Cobb 角 $> 10^\circ$ 且发病原因不明确的脊柱三维畸形, 好发于 10~18 岁青少年, 女性的发病率高于男性^[1-2]。AIS 青少年由于脊柱和骨盆的生理位置发生异常变化, 进而影响了各项运动时下肢的生物力线的正确传导, 最终造成足底压力分布异常。而足底压力的长期不协调、不平衡分布, 则会通过机体的负反馈调节机制, 反过来影响机体原有的相对位置关系, 引起感觉输入异常, 从而导致脊柱侧弯进一步畸形, 产生恶性循环^[3-10]。

目前, 有关 AIS 青少年的足底压力特征的研究已经开展。黄一鸣等^[5] 研究发现, AIS 患者足底压力同健康人存在差异, 行走时凹侧足底压力大于凸侧。朱飞龙等^[11] 研究表明, AIS 青少年足跟内侧区压力较高、外侧区较小, 第 1 跖骨区压力较高, 而第 3~5 跖骨区压力较小。然而, 关于不同类型的 AIS 患者的足底压力细化研究较少。秦巨峰等^[12] 研究认为, Lenke 分型 3 个部分, 其中弯曲类型分为 1~6, 腰椎修正型分为 A、B、C, 胸椎矢状位修正型分为 -、N、+, Lenke 的综合分型是将 3 种分型结合。Lenke 3CN 型是一种临床常见的侧弯类型, 多由其他

类型侧弯病情发展形成, 是脊柱侧弯中较为稳定的一类, 由原发性和继发性两个弯曲构成。原发性是侧弯中是脊柱中最大的异常弯曲, 继发性比原发性弯曲小, 主要用于代偿原发性弯曲, 从而形成机体的新平衡^[13]。正由于机体处于“假平衡”状态, 在脊柱侧弯的筛查中更易被人忽视。此外, 多数研究忽略了女性的发病率高于男性这一特征, 在选取受试者时未充分考虑性别因素, 没有进行质量控制^[1-2, 14]。

本文选取中度 Lenke 3CN 型 (胸右腰左, 主胸弯) 女性青少年为研究对象, 通过分析该类型患者的足底压力特征, 为侧弯筛查提供帮助, 减少青少年频繁拍摄 X 线片造成的辐射影响, 同时为 AIS 青少年的进一步治疗、康复提供指导性意见。

1 方法

1.1 设计

本研究在山西省太原市德奥优骨优康运动康复中心完成, 为横断面实验。

1.2 研究对象

根据先前文献, 使用 G*Power 3.1.9.7 软件计算样本量得出每组受试者最少 26 人^[3]。本文选取

Lenke 3CN 型 AIS 患者 30 例(AIS 组),以及同龄健康青少年受试者 30 例(对照组)。本研究已经过山西大学伦理委员会审核批准(SXULL202408)。监护人签署知情同意书,受试者一般资料见表 1。与对照组相比,AIS 组一般资料比较差异无统计学意义,表明两组基线水平一致。

表 1 受试者一般资料

Tab. 1 General data of subjects

指标	AIS 组	对照组	P
人数	30	30	—
年龄/岁	14.16±2.25	13.69±1.20	0.54
身高/cm	160.20±5.31	158.60±6.76	0.31
体质量/kg	47.96±6.54	47.74±6.60	0.90
BMI	18.82±2.46	18.85±2.61	0.96
Cobb 角/(°)	26.40±5.26	—	—
左足长/cm	24.20±1.64	24.65±1.43	0.16
右足长/cm	24.06±1.54	24.50±1.49	0.15
左足面积/cm ²	33.06±8.50	35.99±12.46	0.40
右足面积/cm ²	33.43±8.72	37.69±12.24	0.25

注:受试者均为女性;BMI 为身体质量指数。

1.2.1 中度 Lenke 3CN 型组纳入标准 ①符合国际脊柱外科学会青少年特发性脊柱侧弯的诊断标准^[1],中度侧弯,Cobb 角 20°~35°^[15];②年龄 10~

18 岁,性别女性,右利足;③特发性脊柱侧弯类型为 Lenke 3CN 型。

1.2.2 中度 Lenke 3CN 型组排除标准 ①不符合国际脊柱外科学会青少年特发性脊柱侧弯的诊断标准;②特发性脊柱侧弯 Lenke 分型为其他类型。

1.2.3 对照组纳入标准 ①年龄 10~18 岁,性别女性,右利足;②生长发育正常,无脊柱侧弯畸形。

1.2.4 对照组排除标准 ①有重大神经肌肉骨骼异常病史或下肢手术史;②双下肢明显不等长或长度差大于 2 cm。

1.3 研究方法

1.3.1 一般资料检查 收集受试者一般资料信息,包含姓名、年龄、既往病史。测量人体的身高、体质量及身体成分。通过皮尺测量下肢长度,测量起止点为骨盆的髌前上嵴到胫骨内踝,由同一康复治疗师完成。

1.3.2 脊柱侧弯初筛 体态评估:通过正面观评估有无头侧歪、高低肩;左右侧面观评估有无头前倾;背面观评估有无肩胛骨位置异常;采用躯干前屈测试进行俯卧位评估^[16](见图 1)。上述评估出现异常姿态即诊断为阳性,进入复筛。

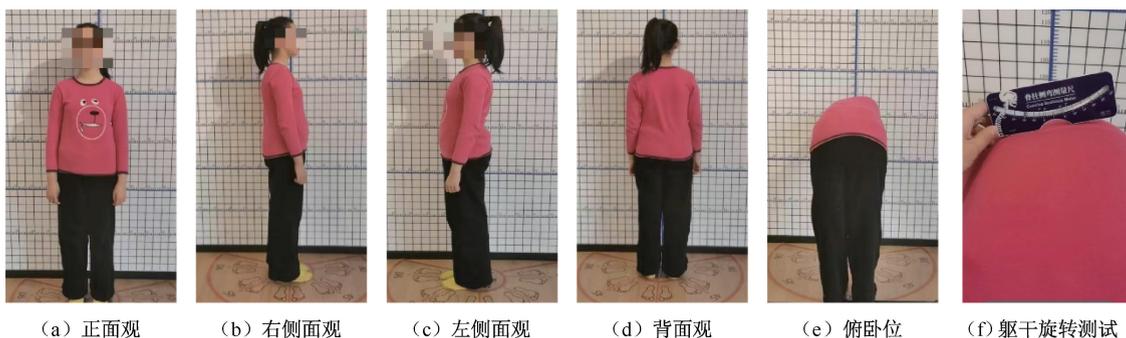


图 1 体态评估

Fig. 1 Posture assessment (a) Front view, (b) Right side view, (c) Left side view, (d) Back view, (e) Prone position view, (f) Torso rotation test

1.3.3 脊柱侧弯复筛 初筛阳性人员进行 X 射线片筛查,测量冠状位 Cobb 角在 20°~35°之间^[17],根据文献^[12]研究结果,进行脊柱侧弯 Lenke 分型诊断,将符合条件的受试者纳入 AIS 组。

1.3.4 足部形态扫描 使用 3D 足部形态学分析扫描仪提取受试者足长和足弓指数,足弓指数用于评价是否有异常姿态^[11],所有受试者均为正常

足型。

1.3.5 足底压力测试 采用 Matscan 压力测试平板(FM500, Tekscan 公司,美国)进行足底压力数据采集,规格为 500 mm×500 mm,传感器类型为半导体薄膜传感元件,传感器密度为 4 个/cm²,采样频率为 100 Hz。受试者以自然站立姿态,双足站立于足底压力板的传感器表面,双眼目视前方,待受试

者稳定站立后采集静态平衡足底压力数据,之后采集 30 s 足底压力中心(center of pressure, COP)。以上测试均重复采集 3 次,取平均值。

1.4 主要观察指标

1.4.1 静态平衡足底压力测试指标 ① 双足左、右、前、后足底压力百分比;② 左、右足平均压力;③ 双足对称性指数(symmetry index, SI)^[5];④ 足部 10 个分区(见图 2)足底的压力百分比。将所采集到的数据进行体质量归一化,故本研究中足底压力数据均为足底压力百分比。

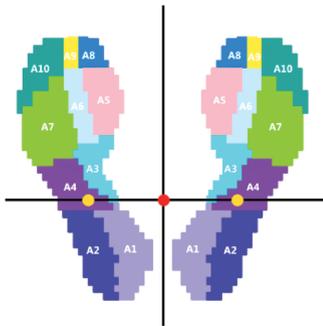


图 2 足底压力区域划分

Fig. 2 Area division of plantar pressures

注:以身体重心(红色点)分为左/右足,以重心(黄色点)分为前/后足。A1:足跟内侧区;A2:足跟外侧区;A3:足中内侧区;A4:足中外侧区;A5:第 1 跖骨区;A6:第 2 跖骨区;A7:第 3、4、5 跖骨区;A8:第 1 脚趾区;A9:第 2 脚趾区;A10:第 3、4、5 脚趾区。

1.4.2 静态平衡人体足底 COP 测试指标 ① 足底 COP 轨迹长度;② 足底 COP 轨迹 95% 信赖区间椭圆面积。③ 足底 COP 左-右移动最大距离(COP-X);④ 足底 COP 前-后移动最大距离(COP-Y)。

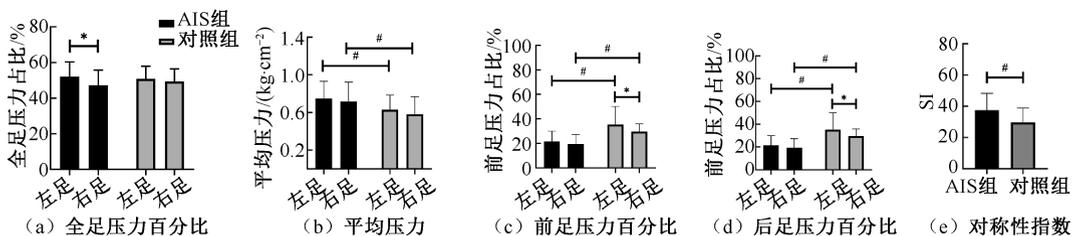


图 3 足底压力特征对比

Fig. 3 Comparison of the plantar pressure (a) Percentage of full foot pressure, (b) Average pressure, (c) Forefoot pressure percentage, (d) Hindfoot pressure percentage, (e) Symmetry index

注: * $P < 0.05$ 代表同组内左右足的比较, # $P < 0.05$ 代表 AIS 组与对照组的比较。

1.5 统计学分析

受试者双侧数据均被采集,采用 Excel 2019 软件录入原始数据,SPSS 26.0 软件进行数据分析。采用 Shapiro-Wilk 检验数据的正态性,计量资料符合正态分布的数据以(平均数 \pm 标准差)表示,组间比较采用独立样本 t 检验,组内比较采用配对样本 t 检验,不符合正态分布的数据采用非参数检验进行统计分析。 $P < 0.05$ 表示有显著性差异。

2 结果

2.1 静态平衡足底压力特征对比分析

全足压力方面,AIS 组左足全足压力显著大于右足;足平均压力方面,AIS 组左、右足平均压力均显著大于对照组;前足压力方面,对照组左足显著大于右足,AIS 组左、右足均显著小于对照组;后足压力方面,对照组和 AIS 组左足均显著小于右足,AIS 组左、右足均显著大于对照组;对称性指数,AIS 组显著大于对照组(见图 3)。

AIS 组左足的足中外侧区、第 1 脚趾区和第 3、4、5 脚趾区足底压力显著大于右足,第 2 脚趾区足底压力显著小于右足;对照组左足的第 1 跖骨区、第 2 跖骨区和第 3、4、5 脚趾区足底压力显著大于右足,足跟外侧区、第 2 脚趾区和第 3、4、5 跖骨区显著小于右足。

在左足方面,AIS 组的足中内侧区和第 1 脚趾区足底压力显著大于对照组,第 1 跖骨区、第 2 跖骨区和第 3、4、5 跖骨区足底压力显著小于对照组;在右足方面,AIS 组足跟内侧区和第 1 脚趾区足底压力显著大于对照组,足中外侧区、第 3、4、5 跖骨区和第 3、4、5 脚趾区足底压力显著小于对照组(见图 4)。

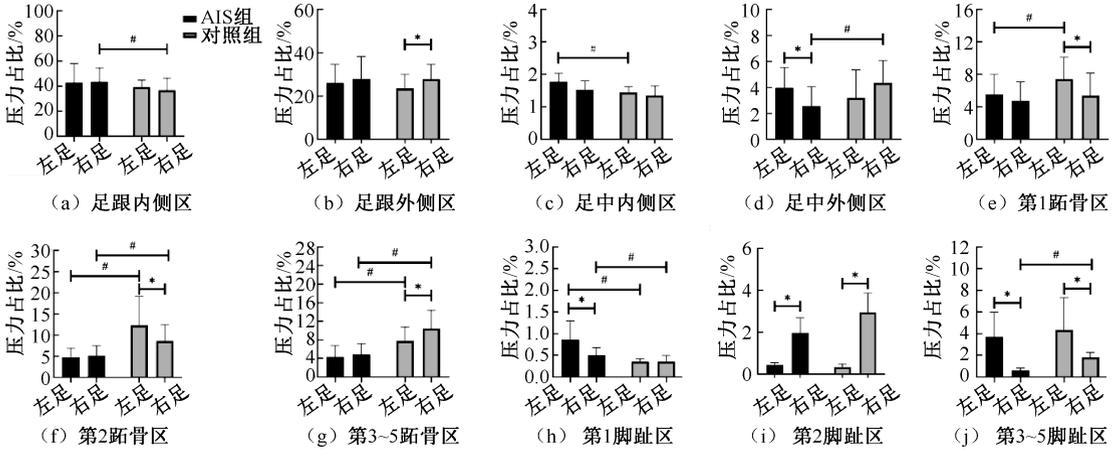


图 4 足底不同分区压力特征对比

Fig. 4 Comparison of the pressure characteristics for different the plantar areas (a) Medial heel area, (b) Lateral heel area, (c) Midmedial area of the foot, (d) Medial and lateral area of the foot, (e) 1st metatarsal area, (f) 2nd metatarsal area, (g) The 3rd-5th metatarsal, (h) 1st toe area, (i) 2nd toe area, (j) 3rd-5th toe area

注: * $P < 0.05$ 代表同组内左右足的比较, # $P < 0.05$ 代表 AIS 组与对照组的比较。

2.2 静态平衡人体足底 COP 特征对比分析

AIS 组的足底 COP 轨迹长度、95% 信赖区间椭圆

圆面积、COP-X 和 COP-Y 均显著大于对照组 (见图 5)。

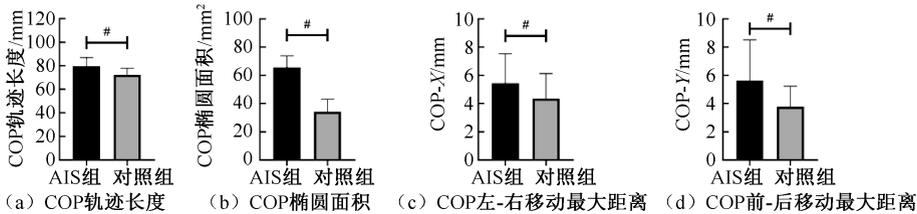


图 5 足底压力中心特征对比

Fig. 5 Comparison of plantar pressure center characteristics (a) COP trajectory length, (b) COP elliptical area, (c) Maximum distance of COP left-right movement, (d) Maximum distance of COP anterior-posterior movement

注: * $P < 0.05$ 代表同组内左右足的比较, # $P < 0.05$ 代表 AIS 组与对照组的比较。

同时, 本文发现, 相比对照组, AIS 组的足底 COP 轨迹更加凌乱, COP 摇摆幅度较大 (见图 6)。

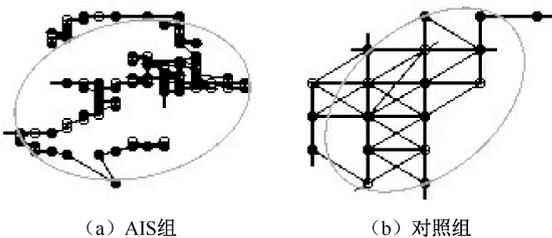


图 6 足底压力中心轨迹对比

Fig. 6 Comparison of the trajectory of the plantar pressure center (a) AIS group, (b) Control group

3 讨论

3.1 静态平衡足底压力特征分析

本文发现, AIS 患者与同龄健康青少年的静态平衡足底压力特征存在显著性差异, 主要表现在左足压力和足平均压力增高, 足部压力会偏向侧弯的凸侧, 双足对称稳定性下降。

研究表明, 脊柱中轴肌肉结构既是效应器也是感受器, 在维持静态平衡中起重要作用。AIS 患者由于该结构遭到破坏, 导致双侧全足压力分布不对称和平衡障碍^[9]。根据人体生物力学, 人在站立时

为保持直立姿势,脊柱应无任何方向的侧弯畸形,同时双腿保持直立,进而将身体的重量由双下肢传递到足弓高点,并通过足的纵弓向前后足传递,理应双足的前后压力均衡^[6,9]。本文发现,正常儿童双足静态平衡左右方向趋于对称,前后方向则表现为左前右后的对角线交叉平衡,而 AIS 患者双足静态平衡左右方向失衡,更偏向左侧,这与 Cağan 等^[3]结论一致,证明 AIS 患者存在躯干冠状面的左右不对称。

与对照组相比, AIS 组双足全足压力不存在显著性差异,平均压力均大于对照组,左、右前足压力均小于对照组,左、右后足压力均大于对照组。 AIS 组双足全足压力不存在显著性差异,该结果与 Cağan 等^[3]的研究结论不同,可能是由于后者研究的受试者是主腰段,而本研究纳入的是受试者主胸段,脊柱腰段骨骼肌肉系统作为人体核心力量的重要部位,是维持静态平衡的重要一环^[18],该结构遭受破坏,会导致足底压力分布异常^[19]。因此,主腰段 AIS 患者的侧弯畸形极易可能导致机体发生平衡障碍,引起双足全足压力的分布异常。而主胸段 AIS 患者虽在腰段也有异常弯曲,但通常是代偿机制导致的结果,腰段骨骼肌肉系统未遭受到破坏,这可能是主胸段 AIS 组全足压力与对照组无差异的原因。此外, AIS 患者双足的平均压力增大,可能会导致足部出现疼痛,步行距离减少,下肢髌膝踝等关节活动度改变,进而影响本体感觉,导致脊柱侧弯的恶化。 AIS 患者前足的压力显著小于后足,提示患者的身体重心落在后足,使后足的压力过高,可能会导致后足疼痛的发生,甚至出现局部压力性溃疡^[5],该结果与 Cağan 等^[3]研究结论一致。对称性指数反映双足对称性和整体稳定性,该值越大,说明双足对称性越低、稳定性越差,平衡功能会显著降低,从而使 AIS 患者在行走过程中左右横移变大,加大行走的不稳定性,加剧脊柱侧弯的不断恶化,最终形成恶性循环^[5,20]。

在人体维持正常站立过程中,在足底形成由第 1、第 5 跖骨区和足跟 3 个区域构成的三角形稳定结构,从而保证人体的平衡稳定,足底 10 个分区压力的具体特征,对筛查、诊断和治疗 AIS 患者具有重要的指导意见。 Cağan 等^[3]研究发现, AIS 患者左足的第 1 和第 5 跖骨区压力小于右足,足跟区压

力大于右足,与对照组相比,左、右足第 1 跖骨区和足跟区压力减小,第 5 跖骨区压力增大。 Szulc 等^[21]研究显示,凸侧足的第 1 脚趾压力较高。黄一鸣等^[5]研究表明, AIS 患者的第 1、2、3 跖骨区和足跟外侧区足底压力小于对照组。 Horng 等^[22]研究发现, AIS 组第 1 脚趾区足底压力大于对照组,第 1、2、3 跖骨区足底压力小于对照组。成西侠等^[23]研究发现, AIS 患者第 2、3、4、5 脚趾区、足中内侧区、足中外侧区压力大于对照组。

本文发现,与对照组相比, AIS 患者在足中内侧区和第 1 脚趾区压力显著增大,第 1、2、3、4、5 跖骨区压力均显著减小。在具体左右足方面, AIS 患者足中内侧区压力的增大主要表现在左足,第 1 跖骨区压力的减小主要表现在左足,第 3、4、5 跖骨区压力的减小主要表现在右足。另外, AIS 患者的右足足跟内侧区压力增大,右足中足外侧区和第 3、4、5 脚趾区压力减小,这些分区位置的压力变化可能是 Lenke 3CN 型 AIS 患者的独特之处。本文认为,在诊断该类 AIS 患者时,应注意这些特殊位置的压力,并且将其作为评价治疗效果的重要证据。并且,对比 Lenke 3CN 型 AIS 患者自身左右足压力发现,左足的足中外侧区,以及第 1、3、4、5 脚趾区压力大于右足,第 2 脚趾区压力小于右足。从足底 10 个分区压力特征而言,当脊柱侧弯发生时, Lenke 3CN 型 AIS 患者更倾向于左足前足的压力变大。因此,应注意该类型患者可能会有脚趾活动范围受限甚至出现踣僵直^[11]。

3.2 静态平衡人体 COP 特征分析

静态平衡能力是指人体在没有外力干扰情况下,控制身体重心在一定支撑面积内维持特定姿势的能力,这种能力依赖于人体感受器官的信息输入、中枢神经系统的信息整合以及肌肉骨骼系统的信息执行。在人体站立过程中,机体处于不稳定状态,需要通过调整重心的位置来保持平衡,此时足底 COP 轨迹不断移动,而较小的轨迹长度反映了机体在平衡调整中更为节制、精准和迅速, COP 轨迹 95% 信赖区间面积越小,表明机体的平衡控制更为精细,整体平衡调整范围更加优化和集中^[24-25]。

研究表明, COP 运动轨迹是评估姿势稳定性的重要生物力学工具,与正常组相比, AIS 患者的姿势控制较差, COP 轨迹长度和 95% 信赖区间椭圆面积

显著增加^[1,3]。本文也得到了相同的结论,AIS 患者的 COP 轨迹长度、95% 信赖区间椭圆面积、COP-X 和 COP-Y 的长度显著增加,表明 AIS 患者在维持平衡的过程中,重心调节幅度过大,平衡控制能力较弱。

本文仅对中度 Lenke 3CN 型女性 AIS 患者的静态平衡足底压力进行深入研究,有一定的局限性。后续将进一步探究不同程度、不同性别 Lenke 3CN 型 AIS 患者的动静态及步态足底压力参数,以进一步了解 AIS 患者的足底压力分布机制。

4 结论

本文对中度 Lenke 3CN 型 AIS 患者的足底压力进行了探讨。结果表明,AIS 患者的足底压力分布异常,足部压力会偏向侧弯凸侧,双足的对称稳定性较低,平衡能力较弱。本研究结果为筛查诊断中度 Lenke 3CN 型 AIS 患者提供理论依据,可作为临床判断的一个参考指标。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:史祎、许亚民负责研究设计、数据采集及论文撰写;马晓丽、王政和李宝新负责诊断评估和数据分析;孟林盛负责论文指导及修改。

参考文献:

[1] ADDAI D, ZARKOS J, BOWEY AJ. Current concepts in the diagnosis and management of adolescent idiopathic scoliosis [J]. *Childs Nerv Syst*, 2020, 36(6): 1111-1119.

[2] KUZNIA AL, HERNANDEZ AK, LEE LU. Adolescent idiopathic scoliosis: Common questions and answers [J]. *Am Fam Physician*, 2020, 101(1): 19-23.

[3] CAŢAN L, CERBU S, AMARICAI E, et al. Assessment of static plantar pressure, stabilometry, vitamin D and bone mineral density in female adolescents with moderate idiopathic scoliosis [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(6): 2167.

[4] 宋云雅,郭锦丽,曹策. 青少年特发性脊柱侧弯患者的三维步态特征研究 [J]. *实用骨科杂志*, 2023, 29(5): 417-421.

[5] 黄一鸣,吴茂东,赵秦,等. Lenke 1 型和 Lenke 5 型青少年特发性脊柱侧弯的足底压力特征 [J]. *生物医学工程与临床*, 2024, 28(2): 193-197.

[6] 韩秀兰,许轶,李小金,等. 青少年特发性脊柱侧弯患者的足底压力差异分析及穿戴矫形鞋垫的影响 [J]. *中山大学学报(医学科学版)*, 2017, 38(4): 582-589.

[7] KIM K, MULLINEAUX DR, JEON K. A Comparative study

of spinal deformity and plantar pressure according to the static standing posture of female adolescents with or without idiopathic scoliosis [J]. *Iran J Public Health*, 2019, 48(2): 345-346.

[8] WIERNICKA M, KOTWICKI T, KAMIŃSKA E, et al. Postural stability in adolescent girls with progressive idiopathic scoliosis [J/OL]. *Biomed Res Int*, 2019, doi: 10.1155/2019/7103546.

[9] 朱飞龙,张明,郭晓琦,等. 矫形鞋垫对青少年特发性脊柱侧弯患者脊柱畸形和步行的改善效果 [J]. *中国康复理论与实践*, 2021, 27(6): 645-652.

[10] 贾品茹,成慧,张静,等. 青少年特发性脊柱侧弯矢状位平衡与足底压力的相关性 [J]. *医用生物力学*, 2022, 37(5): 846-850.

JIA PR, CHENG H, ZHANG J, et al. Correlation between sagittal balance and plantar pressure in adolescent idiopathic scoliosis [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(5): 846-850.

[11] 朱飞龙,张明,吴宇,等. 青少年特发性脊柱侧弯患者足部姿势和步态特征的 3D 形态分析及生物力学评价 [J]. *中国组织工程研究*, 2021, 25(33): 5294-5300.

[12] 秦巨峰,陆敏,赵金丽,等. 青年特发性脊柱侧凸的基本影像判读及 Lenke 分型 [J]. *中国医学影像学杂志*, 2012, 20(9): 657-659.

[13] MALFAIR D, FLEMMING AK, DVORAK MF, et al. Radiographic evaluation of scoliosis: Review [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2010, 194(3 Suppl): S8-22.

[14] GAUCHARD GC, LASCOMBES P, KUHNAST M, et al. Influence of different types of progressive idiopathic scoliosis on static and dynamic postural control [J]. *Spine*, 2001, 26(9): 1052-1058.

[15] 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.

[16] SENKOYLU A, ILHAN MN, ALTUN N, et al. A simple method for assessing rotational flexibility in adolescent idiopathic scoliosis: Modified Adam's forward bending test [J]. *Spine Deform*, 2021, 9(2): 333-339.

[17] CHARALAMPIDIS A, DIARBAKERLI E, DUFVENBERG M, et al. Nighttime bracing or exercise in moderate-grade adolescent idiopathic scoliosis: A randomized clinical trial [J]. *JAMA Netw Open*, 2024, 7(1): e2352492.

[18] 周璇,杜青,赵黎,等. 青少年特发性脊柱侧凸患者的静态平衡功能研究 [J]. *中国康复医学杂志*, 2010, 25(10): 953-956.

[19] SOLOMONOW-AVNON D, LEVIN D, ELBOIM-GABYZON M, et al. Neuromuscular response of hip-spanning and low back muscles to medio-lateral foot center of pressure

- manipulation during gait [J]. J Electromyogr Kinesiol, 2016(28): 53-60.
- [20] LIU Y, LI X, DOU X, *et al.* Correlational analysis of three-dimensional spinopelvic parameters with standing balance and gait characteristics in adolescent idiopathic scoliosis: A preliminary research on Lenke V [J]. Front Bioeng Biotechnol, 2022(10): 1022376.
- [21] SZULC P, BARTKOWIAK P, LEWANDOWSKI J, *et al.* The influence of idiopathic scoliosis on load distribution in the foot [J]. Chir Narzadow Ruchu Ortop Pol, 2008, 73(3): 187-191.
- [22] HORNG J, LIU XC, THOMETZ J, *et al.* Evaluation of plantar pressures and center of pressure trajectories in adolescent idiopathic scoliosis [J]. Stud Health Technol Inform, 2021(280): 131-135.
- [23] 成西侠, 徐超, 白建萍. 青少年脊柱侧弯患者足底压力分析 [J]. 当代临床医刊, 2018, 31(4): 3925-3926.
- [24] 刘鑫玥, 霍洪峰. 双重任务介入对人体静态平衡和动态稳定性的影响 [J]. 中国康复医学杂志, 2024, 39(4): 581-584.
- [25] 杨倩倩, 孟宪中, 颜雯婷, 等. 慢性非特异性腰痛患者足底压力特征分析和平衡研究 [J]. 医用生物力学, 2023, 38(1): 176-181.
- YANG QQ, MENG XZ, YAN WT, *et al.* Analysis on characteristics of plantar pressure and balance in patients with chronic nonspecific low back pain [J]. J Med Biomech, 2023, 38(1): 176-181.