

临床论著

退变性脊柱侧凸患者的步态特征及其与脊柱 X 线片上影像学参数的相关性分析

易红蕾^{1,2}, 陈 虎^{1,2}, 王昕辉³, 朱昌荣^{1,2}, 练沛荣^{1,2}, 夏 虹^{1,2}

(1 中国人民解放军南部战区总医院骨科 510010 广州市; 2 南方医科大学研究生院 510010 广州市;

3 中国人民解放军南部战区总医院麻醉科 510010 广州市)

【摘要】目的:分析退变性脊柱侧凸(degenerative scoliosis,DS)患者的步态特征,探讨其与脊柱 X 线片影像学参数的相关性。**方法:**纳入 9 例 DS 患者,年龄 63~73(67.7±3.1)岁。使用红外运动捕捉系统(SMART-D 400)对患者进行三维步态运动分析,主要包括时空参数(跨步时长、支撑时长、摆动时长、支撑周期、摆动周期、单足支撑周期、双足支撑周期、绝对速度、相对速度、步频、步长、步宽)、步态偏差指数(gait deviation index,GDI)和脊柱平衡参数[步态分析过程中第一个 5m 和最后一个 5m 的冠状面的偏斜角(thoracic-whole spine coronal angle,TS-CA)、矢状面偏斜角(thoracic-whole spine sagittal angle,TS-SA)、运动周期骨盆倾斜角(pelvic tilt in motion cycle,PTM)]。在脊柱全长 X 线片上测量患者胸椎后凸角(T5/T12 Cobb)、腰椎前凸角(L1/L5 Cobb)、骶骨倾斜角(sacral slope,SS)、骨盆入射角(pelvic incidence,PI)、骨盆倾斜角(pelvic tilt,PT)、骨盆入射角与腰椎前凸角之差 PI-LL、矢状垂直轴(sagittal vertical axis,SVA)和退变性侧凸节段和角度(Cobb)。统计患者 GDI 值是否在正常范围(>100),使用配对 T 检验比较第一个 5m 和最后一个 5m 的脊柱平衡参数,归纳 DS 患者步态特征。使用 Spearman 相关分析时空参数与脊柱 X 线片影像学参数的相关关系。**结果:**患者的时空参数具体如下:跨步时长为 1.16±0.21s、支撑时长为 0.79±0.15s、摆动时长为 0.37±0.07s、支撑周期为(67.98±2.14)%、摆动周期为(32.02±2.41)%、单足支撑周期为(54.32±5.12)%、双足支撑周期为(45.68±5.12)%、绝对速度为 0.73±0.17m/s、相对速度为 45.33±11.20(%height/s)、步长为 0.41±0.09m、步宽为 0.09±0.03m、步频为 106.66±17.59 次/min。患者均存在异常步态(右下肢 GDI 为 82.3±7.4,左下肢 GDI 为 85.1±7.3)。步态最后一个 5m 的 TS-CA、TS-SA、PTM 均大于第一个 5m($P<0.05$)。相关分析显示,绝对速度和相对速度与腰椎前凸呈强正相关,相关系数分别为 0.707($P=0.033$)、0.795($P=0.010$);PI-LL 与 TS-SA 呈强正相关,相关系数 0.703($P=0.035$)。而摆动时长与腰椎前凸呈强负相关,相关系数为-0.703($P=0.035$),骶骨倾斜角与步宽呈强负相关,相关系数为-0.868($P=0.002$);与其余参数无明显相关。**结论:**DS 患者存在明显步态异常,且在行走过程中,脊柱失衡明显加重,患者的步态异常情况与脊柱失衡(腰椎前凸变小、PI-LL 减少、骶骨倾斜角变大)存在明显相关。

【关键词】退变性脊柱侧凸;步态分析;动态评估

doi:10.3969/j.issn.1004-406X.2023.08.03

中图分类号:R681.5 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2023)-08-0691-06

Correlation analysis of gait characteristics and X-ray parameters in patients with degenerative scoliosis/YI Honglei, CHEN Hu, WANG Xinhui, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2023, 33(8): 691-696

【Abstract】 Objectives: To analyze the gait characteristics of patients with degenerative scoliosis (DS) and explore the relationship between the gait characteristics and image parameters on X-ray. **Methods:** 9 DS patients of 67.7±3.1 years old(63-73 years) were included in the study. The three-dimensional gait motion of the patients was analyzed with a SMART-D 400 infrared motion capture system, including spatiotemporal parameters(stride length, stance time, swing time, stance cycle, swing cycle, single limb support cycle, double

基金项目:广东省自然科学基金项目(编号:2015A030312004)

第一作者简介:男(1981-),医学博士,副主任医师,研究方向:脊柱外科、脊柱畸形

电话:(020)88686332 E-mail:hongleiyimd@qq.com

通讯作者:夏虹 E-mail:gzxiahong2@126.com

limb support cycle, absolute velocity, relative velocity, step frequency, step length, and step width), gait deviation index(GDI), and spinal balance parameters[thoracic-whole spine coronal angles(TS-CA) of the first 5m and the last 5m, the dynamic pelvic tilt in motion cycle(PTM)]. The thoracic kyphosis angle(T5/T12 Cobb), lumbar lordosis(LL) angle(L1/L5 Cobb), sacral slope(SS), pelvic incidence(PI), pelvic tilt(PT), difference between PI angle and LL angle(PI-LL), sagittal vertical axis(SVA), degenerative scoliosis segments and angles were measured on the full-length X-ray. The patient's GDI values were counted whether within the normal range(>100), and then paired T-test was used to compare the spinal balance parameters of the first 5m with those of the last 5m. The gait characteristics of DS patients were summarized. Spearman correlation analysis was used to examine the relationship between spatiotemporal parameters and radiographic parameters. **Results:** The spatiotemporal parameters of the patients were: the stride duration 1.16 ± 0.21 s, the support duration 0.79 ± 0.15 s, the swing duration 0.37 ± 0.07 s, the support period (67.98 ± 2.14)%, the swing period (32.02 ± 2.41)%, the single foot support period (54.32 ± 5.12)%, and the double foot support period (45.68 ± 5.12)%, the absolute velocity 0.73 ± 0.17 m/s, the relative velocity 45.33 ± 11.20 (%height/s), the step length is 0.41 ± 0.09 m, the step width 0.09 ± 0.03 m, the step frequency 106.66 ± 17.59 times/min. Abnormal gait existed in all the patients(GDI of the right and left lower extremities were 82.3 ± 7.4 and 85.1 ± 7.3 , respectively). The TS-CA, TS-SA, and PTM of the last 5m were all greater than those of the first 5m($P<0.05$). The correlation analysis showed that absolute velocity and relative velocity were positively correlated with LL, with correlation coefficients of 0.707 ($P=0.033$) and 0.795($P=0.010$), respectively. And PI-LL was strongly positively correlated with TS-SA, with a coefficient of 0.703($P=0.035$). The swing time was strongly negatively correlated with LL with a correlation coefficient of -0.703 ($P=0.035$). SS was strongly negatively correlated with step width, with a correlation coefficient of -0.868 ($P=0.002$), but no significant correlation with other parameters. **Conclusions:** DS patients have significant gait abnormalities, and spinal imbalance increases significantly during walking. The abnormal gait of patients is significantly related to spinal imbalance (reduced LL and PI-LL, and increased SS).

【Key words】 Degenerative scoliosis; Gait motion analysis; Dynamic evaluation

【Author's address】 1. Department of Orthopedic Surgery, General Hospital of Southern Theatre Command; 2. Graduate School of Southern Medical University, Guangzhou, 510010, China

退变性脊柱侧凸 (degenerative scoliosis, DS) 是指骨骼成熟后,由于椎间盘退变、关节突不对称增生,导致脊柱侧方弯曲、旋转以及滑移的三维畸形,侧凸 Cobb $\geq 10^\circ$,常存在躯干冠状面或/和矢状面失平衡,导致骨盆及下肢髋、膝、踝关节等代偿变化^[1]。常见合并腰椎管狭窄、腰椎间盘突出等,通常开始于 50 岁左右,平均发病年龄为 70.5 岁,60 岁以上人群中发病率约为 6%^[2-3]。随着年龄的增长,椎间盘和小关节进行性退变可导致椎间隙塌陷、腰椎滑脱和腰椎前凸度丧失。临床表现主要表现为严重的腰背痛、下肢神经功能障碍、间歇性跛行等,严重影响生活质量^[4-5]。

目前临床上主要通过静态的影像学参数(X 线、CT、MRI 等)对患者 DS 严重程度进行评估及制定治疗方案^[6,7]。其中,脊柱全长 X 线片上测量 Cobb 角和矢状面失衡情况是制定手术方案的重要依据。然而,DS 的病理过程是动态变化的,大部分患者在行走时会出现 Cobb 角和矢状面失衡的改变,部分患者会出现 Cobb 增大和矢状面失衡

加重,从而进一步导致临床症状的恶化。单纯依靠静态的影像学参数制定手术方案存在一定局限性,部分患者术后症状改善不明显。

近年来,步态分析在临床应用越来越广泛,它运用运动学、动力学、生理心电图等对躯干及各关节的三维运动进行分析,可以更客观地研究患者在行走过程中的动态变化以及颈、胸、腰、骨盆、髋、膝、踝关节之间的交互影响^[8]。目前步态分析主要应用在偏瘫、脑瘫、退变性膝髌关节炎等疾病患者的评价上^[9,10],对于 DS 的研究较少,本研究拟观察 DS 患者的步态特点,并与静态影像学进行相关性分析,为临床诊断、治疗、康复提供指导。

1 资料和方法

1.1 纳入及排除标准

目标人群为 DS 患者。纳入标准:①脊柱侧凸 Cobb 角 $>10^\circ$,骨盆入射角(pelvic incidence, PI)与腰椎前凸角(lumbar lordosis, LL)差值(PI-LL) $>10^\circ$,骨盆倾斜角(pelvic tilt, PT) $>10^\circ$;②不依靠轮

椅、助步器等可自主直立行走;③步行过程中无因贴上标记物而产生的不适感;④无严重认知障碍,可配合及理解相关指令;⑤既往无双下肢手术史及外伤等影响步行的因素;⑥影像学资料齐全,包括脊柱全长 X 线片、脊柱 CT 及脊柱 MRI;⑦检查前签署知情同意书。排除标准:①既往有脊柱手术、外伤史;②双下肢长度差超过 2cm;③既往有髌膝关节手术史。

共纳入 9 例 DS 患者,男性 3 例,女性 6 例,年龄为 67.7 ± 3.1 岁 (63~73 岁),身高为 158.2 ± 8.8 cm (151~178cm),体重为 62.9 ± 6.9 kg (56~78kg)。

1.2 三维步态运动分析

1.2.1 基本方法 步态分析采用红外运动捕捉系统 (SMART-D 400, BTS 公司, 意大利)。该系统由两个同步相机 (BTS eVixta, 采集频率 40Hz)、6 个红外摄像头 (采集频率 100Hz) 及两个测试平台 (BTS P6000D) 组成。在室温下 (约 20~25℃) 进行, 采集步行区域长度为 5m。根据 Davis heel 模块在测试者双侧肩峰、C7 棘突、骶骨棘突、双侧髂前上棘与髂后上棘连线中点、双侧大转子、双侧股骨外侧髁、双侧腓骨小头、双侧外踝、双侧足跟、双侧第五跖骨外侧缘相应体表位置粘贴标记点 (荧光球), 在双侧大转子与股骨外侧髁中点、双侧腓骨小头与外踝连线中点绑上带有标记点的小棍, 共 22 个标记点 (图 1)^[14]。

录入患者的一般情况资料, 随后粘贴标记物

后让被测试者裸足站在测试平台中央 5~7s, 得到其静止站立时各标记关节的角度。随后患者在自由状态下在实验室随意行走数分钟以适应环境, 直至诱导出现下肢 (单侧或双侧) 不适, 而后开始采集步态。让被测试者在测试道上以自然行走, 往返 6 次 (共 30m), 提取其中稳定的 4 个步态周期数据, 使用系统自带软件分析各参数。

1.2.2 测量指标 测量指标主要包括时空参数 (spatiotemporal parameters)、步态偏差指数 (gait deviation index, GDI) 和脊柱平衡参数, 具体如下。(1) 时空参数, 绝对速度、相对速度、步长、步宽、步频、支撑周期、摆动周期、单足支撑周期、双足支撑周期、跨步时长、支撑时长、摆动时长。(2) GDI, 通过对 9 个步态参数进行奇异值分解, 然后使用最大方差处理, 转置后可得出 15 个步态特征量, 再采用欧式距离的标准进行对数转换和 Z 分数处理后即为 GDI 值。GDI ≥ 100 , 表明受试者的步态为正常健康步态; GDI < 100 , 表明受试者步态存在病理异常^[12,13]。(3) 脊柱平衡参数, 分别测量步行过程中第一个 5m 和最后一个 5m 中的动态参数 (图 2): (1) 冠状面偏斜角 (thoracic-whole spine coronal angle, TS-CA), C7 棘突和骶骨棘突连线与冠状面垂直轴的夹角; (2) 矢状面偏斜角 (thoracic-whole spine sagittal angle, TS-SA), C7 棘突和骶骨棘突连线与矢状面垂直轴的夹角; (3) 动态骨盆倾斜角 (pelvic tilt in motion cycle, PTM), 双侧股骨头连线中点和骶骨棘突连线与矢状面垂直

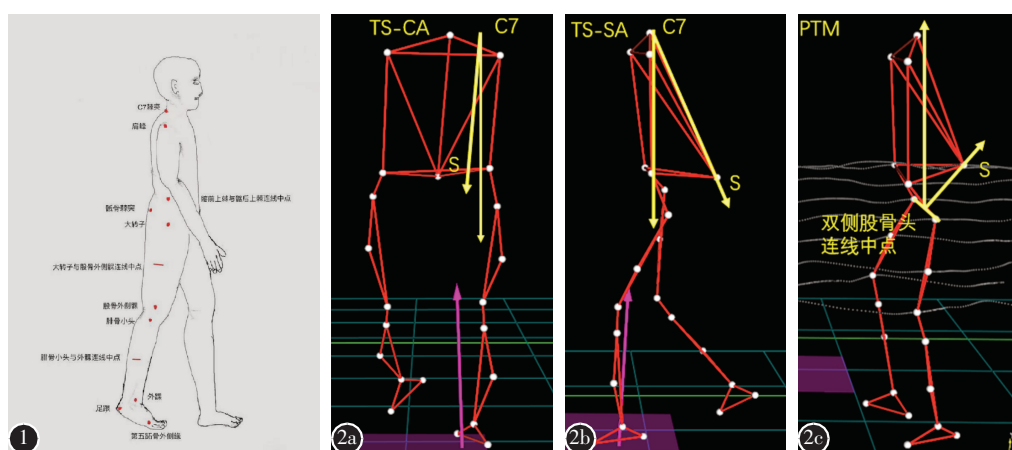


图 1 步态分析标记点。图 2 动态脊柱平衡参数示意图 a 冠状面偏斜角 TS-CA b 矢状面偏斜角 TS-SA c 骨盆倾斜角 PTM(C)。

Figure 1 The marker point during gait analysis. **Figure 2** Schematic diagram of dynamic spinal balance parameters a Thoracic-whole spine coronal angle, TS-CA b Thoracic-whole spine sagittal angle, TS-SA c Pelvic tilt in motion cycle, PTM(C).

轴的夹角。

1.3 影像学参数测量

在脊柱全长正侧位 X 线片上测量患者胸椎后凸角 (T5/T12 Cobb)、腰椎前凸角 (L1/L5 Cobb)、骶骨倾斜角 (sacral slope, SS)、PI、PT、骨盆投射角与腰椎前凸角之差 PI-LL、矢状垂直轴 (sagittal vertical axis, SVA) 和退变性侧凸节段和角度 (Cobb)。

1.4 统计学分析

计量数据以平均值 $\pm$ 标准差($\bar{x}\pm s$)表示,计数数据以 n 表示,采用 SPSS 21.0 软件对数据进行处理及统计分析。步态特征中,统计患者 GDI 值是否在正常范围(>100),其次使用配对 T 检验比较第一个 5m 和最后一个 5m 的脊柱平衡参数,归纳 DS 患者步态特征。最后使用 Spearman 相关分析时空参数与脊柱 X 线片上影像学参数的相关关系。 $P<0.05$ 为有统计学差异,相关系数用 R 表示。

2 结果

2.1 三维步态运动分析

9 例 DS 患者的跨步时长为 1.16 ± 0.21 s、支撑时长为 0.79 ± 0.15 s、摆动时长为 0.37 ± 0.07 s,支撑周期为 $(67.98\pm 2.14)\%$ 、摆动周期为 $(32.02\pm 2.41)\%$ 、单足支撑周期为 $(54.32\pm 5.12)\%$ 、双足支撑周期为 $(45.68\pm 5.12)\%$ 、绝对速度为 0.73 ± 0.17 m/s、相对速度为 45.33 ± 11.20 (%height/s)、步长为 0.41 ± 0.09 m、步宽为 0.09 ± 0.03 m、步频为 106.66 ± 17.59 次/min。

根据系统自带的软件 (Smart Analyzer) 计算可得,右下肢 GDI 为 82.3 ± 7.4 ,左下肢 GDI 为 85.1 ± 7.3 ,均低于正常值(>100),提示患者存在异常步态。长时间步行后,TS-CA、TS-SA 和 PTM 均明显增大,表明患者出现冠状面和矢状面失衡加重(表 1)。

2.2 影像学数据

胸椎后凸角为 $24.67^\circ\pm 13.06^\circ$,LL 为 $24.11^\circ\pm 12.46^\circ$,PI 为 $48.56^\circ\pm 9.31^\circ$,PT 为 $28.56^\circ\pm 11.32^\circ$,SS 为 $20.00^\circ\pm 14.26^\circ$,SVA 为 62.67 ± 40.98 mm,PI-LL 为 $27.11^\circ\pm 9.87^\circ$ 。侧凸在胸腰段的为 5 例,在腰段的为 4 例,冠状面 Cobb 角为 $21.11^\circ\pm 11.11^\circ$ 。

2.3 三维步态运动数据与影像学参数的相关性

使用 Spearman 相关分析时空参数和 X 线影

表 1 动态脊柱平衡参数比较

Table 1 Comparison of dynamic spinal balance parameters

	第一个 5m First 5m	最后一个 5m Last 5m	t 值 t value	P 值 P value
冠状面偏斜角 TS-CA($^\circ$)	2.88 ± 2.32	4.34 ± 2.71	-3.125	0.014
矢状面偏斜角 TS-SA($^\circ$)	13.66 ± 7.34	17.08 ± 8.63	-2.783	0.024
动态骨盆倾斜角 PTM($^\circ$)	47.64 ± 5.91	51.66 ± 7.21	-4.685	0.002

像学参数的相关关系,结果如表 2 所示。其中绝对速度和相对速度与 LL 呈强正相关,相关系数分别为 $0.707(P=0.033)$ 、 $0.795(P=0.010)$ 。而摆动时长与腰椎前凸呈强负相关,相关系数为 $-0.703(P=0.035)$,SS 与步宽呈强负相关,相关系数为 $-0.868(P=0.002)$ 与其余参数无明显相关。

3 讨论

目前我们常用的成人脊柱畸形相关分型包括 SRS 分型^[1]、Schwab 分型^[14]、Roussouly 分型^[15]、SRS-Schwab 分型^[16]等,都是建立在静态影像学参数基础上,不能准确评估患者行进过程中的动态情况。本研究通过三维步态分析可以有效评估患者动态行进过程中的步态变化,对比行进过程中的矢状面平衡情况和静态下平衡情况的变化以及相关性因素分析,同时对行进过程中初始状态和最终状态的变化,从而全面评估患者 DS 的严重程度,有利于更好地提出个性化的手术治疗方案。

既往研究发现,DS 患者存在明显的步态异常,可以表现为步伐减慢、步速降低等,与正常人群存在明显差异。本研究中,DS 患者出现步速、步长都相对降低,双下肢的 GPS 均存在异常,与既往文献相似。我们认为,与正常人相比较,DS 患者普遍存在躯干前倾,在保持平衡和行走时需要较大的肌肉力量,还可能需骨盆及下肢髋、膝、踝关节的代偿性改变。因此,DS 患者容易出现步态异常。步态异常的程度静态影像学参数密切相关。Engsberg 等^[17]发现 DS 患者步速减慢,躯干矢状面失平衡更严重,冠状面及轴状面活动范围减少,步行持续性比正常人群更差。Arima 等^[18]纳入 93 例 ASD 患者术前数据进行分析,发现 DS 患者步速明显降低,且 PI-LL 与躯干变化角度密切相关,PI-LL 差值大于 40° 代表更大的躯干变化角度。本

表 2 步态数据与影像学参数的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between gait parameters and imaging parameters

	胸椎后凸角 Thoracic kyphosis	腰椎前凸角 Lumbar lordosis	骶骨倾斜角 Sacral slope	骨盆入射角 Pelvic incidence	骨盆倾斜角 Pelvic tilt	PI-LL	矢状垂直轴 Sagittal vertical axis	脊柱侧凸角 Scoliosis cobb angle
跨步时长 Stride length	0.083	-0.603	-0.383	-0.335	0.085	0.41	-0.25	0.117
支撑时长 Stance time	0.008	-0.618	-0.176	-0.294	-0.124	0.42	-0.318	0.193
摆动时长 Swing time	0.133	0.703*	-0.567	-0.611	0.085	0.268	-0.267	0.109
支撑周期 Stance cycle	0.133	0.05	0.317	0.201	0.102	-0.159	-0.317	-0.017
摆动周期 Swing cycle	0.133	0.05	0.317	0.201	0.102	-0.159	-0.317	-0.017
单足支撑周期 Single limb support cycle	0.133	0.05	0.317	0.201	0.102	-0.159	-0.317	-0.017
双足支撑周期 Double limb support cycle	0.15	0.025	0.3	0.134	0.187	0.142	-0.417	-0.134
绝对速度 Absolute velocity	0.184	0.707*	0.324	0.391	-0.013	-0.351	0.009	-0.32
相对速度 Relative velocity	0.133	0.795*	0.3	0.51	0.17	-0.308	-0.83	-0.326
步频 Step frequency	0.083	0.603	0.383	0.335	-0.085	-0.41	0.25	-0.117
步长 Step length	-0.067	0.134	0	0.008	-0.017	-0.1	0.317	-0.184
步宽 Step width	0.557	-0.462	-0.869*	-0.547	0.651	0.161	-0.152	0.004

注: * $P < 0.05$ 。Note: * $P < 0.05$ 。

研究相关分析表明,患者畸形越严重(LL减少、SS增大),步行时速度越慢、步宽越小。该类患者存在步态异常主要考虑为肌肉骨骼影响,老年患者腰背部肌肉力量下降且椎间盘的退变逐渐加重,脊柱的畸形会进一步加重。

DS患者在步行过程中,脊柱平衡发生着动态变化,可以视为脊柱的代偿机制。既往对于骨盆代偿机制的研究,一般基于静态条件下骨盆、胸椎、下肢代偿机制^[19],而动态条件下其代偿机制与静态站立位存在差异。Sasaki等^[20]纳入32例患者,一组为骨盆后旋患者($PT \geq 20^\circ$),一组为正常患者($PT < 20^\circ$),站立位时,PT及T1骨盆角(T1 pelvic angle, TPA)(T1中心至股骨头的连线与经过骶骨上终板上中点的夹角)在骨盆后旋患者中明显增大。当行走时,SVA、TPA较静态站立时明显增加,PT值反而减小,这可能是骨盆后旋患者行走时的代偿机制:髋臼尽可能覆盖股骨头,骨盆后旋反而减轻,减少髋关节过伸,是一种骨盆失代偿的表现。本研究结果提示第一个5m的PTM为 $47.64^\circ \pm 5.91^\circ$,最后一个5m为 $51.66^\circ \pm 7.21^\circ$,两者存在统计学差异,表明随着步行时间的延长,骨盆后旋加

重,与文献不一致。可能与选择病例不一致有关,本研究中纳入的病例PTM均值较大,患者骨盆后旋的代偿能力尚可,仍然能起到良好的代偿作用。本研究脊柱动态分析的数据表明患者的矢状面力线随着运动的开始或持续,躯干前倾状态越来越严重,而且PI-LL匹配程度愈差,运动后躯干失平衡更严重。这就需要我们制定手术方案的时候充分考虑患者运动状态的矢状面失平衡的严重程度,必要时加长固定节段。

但是,本研究存在一些不足,如未与正常人群进行对比,尚未总结出不同的病理变化对DS患者相对应的步态特征性改变。亦未对DS患者的步态影响以及与主观功能评分的相关性进行分析。然而,通过本研究初步证实了利用红外运动捕捉系统分析DS患者步态特征的可行性,并发现步态特征与其脊柱影像学参数之间存在相互关系,为进一步开展相关研究提供了数据参考和理论基础。

4 参考文献

1. Lowe T, Berven SH, Schwab FJ, et al. The SRS classification

- for adult spinal deformity[J]. *Spine*, 2006, 31(Suppl): S119–S125.
2. Kotwal S, Pumberger M, Hughes A, et al. Degenerative Scoliosis: a review[J]. *HSS J*, 2011, 7(3): 257–264.
3. Silva FE, Lenke LG. Adult degenerative scoliosis: evaluation and management[J]. *Neurosurg Focus*, 2010, 28(3): E1.
4. Kretzer RM. Adult degenerative spinal deformity: overview and open approaches for treatment[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2017, 42(Suppl 7): S16.
5. York PJ, Kim HJ. Degenerative scoliosis[J]. *Curr Rev Musculoskelet Med*, 2017, 10(4): 547–558.
6. Garcia-Ramos CL, Obil-Chavarria CA, Zarate-Kalfopulos B, et al. Degenerative adult scoliosis[J]. *Acta Ortop Mex*, 2015, 29(2): 127–138.
7. Hasegawa K, Okamoto M, Hatsushikano S, et al. Normative values of spino-pelvic sagittal alignment, balance, age, and health-related quality of life in a cohort of healthy adult subjects[J]. *Eur Spine J*, 2016, 25(11): 3675–3686.
8. Chester VL, Biden EN, Tingley M. Gait analysis[J]. *Biomed Instrum Technol*, 2005, 39(1): 64–74.
9. 郭永亮, 卢健军, 冯重睿, 等. 帕金森病患者慌张步态的三维步态分析[J]. *中国康复理论与实践*, 2019, 25(7): 832–835.
10. 赵军, 张通, 芦海涛, 等. 脑卒中偏瘫步态表面肌电图和动态关节角度分析及康复策略研究 [J]. *中国实用内科杂志*, 2013, 33(12): 948–952.
11. 郭永亮, 冯重睿, 张新斐. BTS 三维运动捕捉系统在步态分析中的信度[J]. *中国组织工程研究*, 2018, 22(23): 3665–3669.
12. Ito T, Noritake K, Sugiura H, et al. Correction: association between gait deviation index and physical function in children with bilateral spastic cerebral palsy: a cross-sectional study[J]. *J Clin Med*, 2020, 9(2): 569.
13. 张子华, 庞博, 赵盼超, 等. 步态测量评价研究进展: 步态指数的应用[J]. *中国康复理论与实践*, 2020, 26(2): 210–214.
14. Schwab F, Farcy J, Bridwell K, et al. A clinical impact classification of scoliosis in the adult [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2006, 31(18): 2109–2114.
15. Weisz G, Houang M. Classification of the normal variation in the sagittal alignment of the human lumbar spine and pelvis in the standing position [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2005, 30(13): 1558–1559.
16. Schwab F, Ungar B, Blondel B, et al. Scoliosis research society-schwab adult spinal deformity classification [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2012, 37(12): 1077–1082.
17. Engsborg JR, Bridwell KH, Reitenbach AK, et al. Preoperative gait comparisons between adults undergoing long spinal deformity fusion surgery(Thoracic to L4, L5, or Sacrum) and controls[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2001, 26(18): 2020–2028.
18. Arima H, Yamato Y, Hasegawa T, et al. Discrepancy between standing posture and sagittal balance during walking in adult spinal deformity patients[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2017, 42(1): E25–E30.
19. Shimizu T, Lehman RA, Sielatycki JA, et al. Reciprocal change of sagittal profile in unfused spinal segments and lower extremities after complex adult spinal deformity surgery including spinopelvic fixation: a full-body X-ray analysis[J]. *Spine J*, 2020, 20(3): 380–390.
20. Sasaki K, Hongo M, Miyakoshi N, et al. Evaluation of sagittal spine-pelvis-lower limb alignment in elderly women with pelvic retroversion while standing and walking using a three-dimensional musculoskeletal model [J]. *Asian Spine J*, 2017, 11(4): 562–569.

(收稿日期:2022-07-21 末次修回日期:2023-04-03)

(英文编审 谭 啸)

(本文编辑 姜雅浩)