

综述

脊柱矢状位动态平衡的研究和应用进展

A review on the application of dynamic sagittal balance of the spine

越 雷, 陈 浩, 李淳德, 孙浩林

(北京大学第一医院脊柱外科 100034 北京市)

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2021.11.10

中图分类号: R682.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-406X(2021)-11-1034-05

脊柱平衡是指在各种因素调节下, 作用于脊柱的外力和躯体自身肌力之间, 保持机体在静态和动态稳定的直立姿势的力学平衡^[1]。Dubousset^[2]认为躯体纵轴的活动范围在一个平衡的圆锥体内, 以最小的能量消耗维持直立状态平衡, 这种生理现象称为“经济椎”, 其主要目的是用尽可能少的能量消耗来维持以头颅、脊柱、骨盆和下肢为中轴的矢状位和冠状位上的力学平衡。而对于治疗脊柱疾患而言, 脊柱矢状位平衡对于治疗效果和减少并发症而言都是必不可少的考量因素^[3]。

脊柱矢状位平衡参数是指脊柱全长侧位 X 线片上的与头颅-脊柱-骨盆-下肢平衡相关的影像学参数, 按照功能区域其可分为脊柱-骨盆矢状位参数、颈椎矢状位参数、脊柱整体矢状位参数和脊柱外测量参数等。尽管基于矢状位参数的 Roussouly 分型、Schwab-SRS 分型、北京大学第一医院(Peking University First Hospital, PUFH)分型等的治疗方案有效地减少了近端交界性后凸(proximal junctional kyphosis, PJK)、远端交界性后凸(distal junctional kyphosis, DJK)和内固定失败等并发症的发生^[4-7]。然而目前临床常用的矢状位参数的评估是基于直立状态下的静态、瞬时的影像学检查, 无法反映人在运动状态中的脊柱矢状位真实排列情况和平衡的维持和代偿机制。近年来, 越来越多的研究通过多种方式对脊柱矢状位动态平衡(dynamic sagittal balance, DSB)展开研究。DSB 主要是指针对脊柱矢状位的静态参数的动态变化和实时动态参数进行的分析。笔者通过文献检索对 DSB 的研究和应用进展进行系统综述, 旨在为 DSB 的临床应用和研究方向提供参考。

1 DSB 参数的测量方法和分类

1.1 DSB 参数的测量方法

(1)按照测量设备分为 X 线对比分析、三维动作捕捉系统和体表成像分析系统。X 线对比分析是指通过直接数

字化 X 线摄影系统(direct radiography, DR)或三维立体全身骨骼 X 线成像系统等设备获取的不同时间或者不同动作的矢状位参数进行对比分析;三维动作捕捉系统是指佩戴体表标记物或感应器捕捉分析人体动作系统, 以三维步态分析(3D gait analysis, 3DGA)为主, 可获取的参数也最为丰富, 包括运动学参数、动力学参数和时空参数等;体表成像分析系统是指通过四维光栅测量设备用无辐射、无标记点的表面形貌学扫描进行脊柱-骨盆三维动态重建进行的躯体运动功能评价, 目前设备以 DIERS 4D(diers international GmbH, Schlangenbad, Germany)为主。(2)按照动作的时效性分为实时动态监测和静态参数动态变化对比, 前者包括三维动作捕捉系统和体表成像分析系统等通过实施监测采集运动数据的评估方法;后者是指通过不同时间节点的脊柱矢状位参数的对比分析。(3)按照动态方式分为: 站立位对比分析、体位姿势变换对比分析和步态分析。

1.2 DSB 参数的分类

目前 DSB 参数分为:(1)脊柱整体矢状位参数, 包括脊柱骶骨角(spino-sacral angle, SSA)、矢状位垂直轴(sagittal vertical axis, SVA)、躯干倾斜角(trunk-tilt angle, TA)、躯干后凸角(trunk kyphosis, TK)、躯干倾角(trunk inclination, TI)、骨盆-脊柱匹配度(pelvic incidence-lumbar lordosis, PI-LL)、T1 脊柱骨盆倾斜角(T1 spino-pelvic inclination, T1SPA)等;(2)脊柱局部矢状位参数, 包括颈椎前凸角(cervical lordosis, CL)、胸椎后凸角(thoracic kyphosis, TK)、腰椎前凸角(lumbar lordosis, LL)、脊柱前凸角(lordotic angle, LA)、脊柱后凸角(kyphotic angle, KA)、前凸倾斜角(lordosis tilt, LT)、节段脊柱角(spinal angle, SA)、胸腰椎节段角(thoracolumbar angle, TLA);(3)骨盆矢状位参数, 包括骨盆倾斜角(pelvic tilt, PT)、骨盆投射角(pelvic incidence, PI)、骶骨倾斜角(sacral slope, SS)、骨盆前倾角(anterior pelvic tilt, Ant-PT)、骶骨-股骨头角(sacro-femoral angle, SFA)、骨盆活动距离(distance of pelvis movement, DP)、骨盆重心质心垂直距等;(4)下肢运动学参数, 包括髋关节、膝关节和踝关节的活动范围(range of motion, ROM)及运动学与动力学参数(图 1)。

第一作者简介: 男(1993-), 博士研究生在读, 研究方向: 脊柱外科
电话: (010)83572655 E-mail: yueleimail@foxmail.com
通讯作者: 孙浩林 E-mail: sunhaolin@vip.163.com

2 不同动态方式下的脊柱矢状位参数分析

2.1 不同时间下的站立位脊柱矢状位参数对比分析

同一个体在不同时间的直立位脊柱正侧位 X 线片上, 由于姿势和/或动态的影响可能存在矢状位参数的差异。Hey 等^[8]通过对比慢性下腰痛患者间隔 6 个月前后拍摄的直立位脊柱全长 X 线片, 发现 CL 增大, 而 PT 和 SVA 减小。Kato 等^[9]通过三维动作捕捉系统分析健康受试者静态持续站立 130s 的矢状位参数变化, 发现持续站立期间 SVA 平均变化 $20.2 \pm 4.1\text{mm}$ 。因此, 如果根据脊柱全长正侧位参数对矢状位平衡评估时, 应该考虑到测量可能存在的差异, 必要时应该考虑多次重复测量。

2.2 运动前后和运动过程中的脊柱矢状位参数分析

研究发现人体在直立静态拍摄 X 线片时, 可能通过代偿机制而掩盖的动态过程中可能出现的躯体的矢状位失衡, 因此近年来研究者们不断通过监测动态矢状位参数对机体可能的动态矢状位失衡(dynamic sagittal imbalance, DSI)及可能的代偿机制进行探索^[10]。Bae 等^[11]发现矢状位失衡患者行走 10min 后 PT 和 LL 减小而 SVA 值和 PI-LL 增大; 尹佳等^[12,13]的研究证明成人脊柱畸形(adult spinal deformity, ASD)患者行走后矢状位失衡和脊柱-骨盆不匹配加重与骨盆参数的变化具有明显的相关性。Kim 等^[14]的研究发现在行走过程中, 骨盆前倾逐渐增加, 同时该研究结果表明高龄和高体质指数 (body mass index, BMI) 是 DSI 的危险因素。Severijns 等^[15]发现机体在运动过

程中 SVA 明显增加, 骨盆明显前倾而 LL 减小。Shiba 等^[16]的研究表明运动下 SVA、骨盆前倾角和躯干前倾角增加, 且增加程度与行走时间正相关。Michalik 等^[17]发现行走过程中躯干明显前倾, 脊柱后凸角度在动态状态均较静态明显改变。Pesenti 等^[18]发现青少年特发性脊柱侧凸(adolescent idiopathic scoliosis, AIS)患者行走过程中 LL 减小、TK 和 SVA 增加, 值得提出的是 AIS 患者步态过程中骨盆明显向后倾, 这有别于 ASD 患者的骨盆前倾, 这可能与 AIS 与 ASD 患者不同的骨盆代偿机制有关。Ould-Slimane 等^[19]发现佩戴胸腰椎支具的健康志愿者行走过程中躯干前倾增加, SVA 增加, C7-T10-S1 角减小。总体而言, 行走过程中人体表现出矢状位失衡加重而骨盆代偿作用明显减弱, 相较于静止状态, 动态过程中 SVA 增加了 $53 \sim 152.3\text{mm}$, 骨盆向前倾斜增加了 $1.6^\circ \sim 6.8^\circ$ ^[11,12,16,18,19]。这可能是由于行走过程中由于骨盆肌和脊柱核心肌群的疲劳导致矢状位代偿机制明显减弱所致。

2.3 不同体位姿势下的脊柱矢状位参数对比分析

不同姿势下, 躯体通过不同机制进行矢状位平衡的维持, DSB 能够体现姿势对于矢状位参数的影响。Hayden 等^[20]通过对比健康志愿者骨盆前后旋运动前后的脊柱全长 X 线片与直立位脊柱全长 X 线片对比, 发现骨盆前旋、后旋时 SVA 均减小, 提示骨盆旋转是矢状位平衡的重要调节方式。Yoshioka 等^[21]通过对比过伸过屈位的脊柱全长 X 线片发现个体之间髋关节的活动度的差异远大于腰椎活动度的差异, 提示不同个体之间髋关节对脊柱的代偿作用的不同。王伟等^[22]发现站立位到坐位 X 线片矢状位形态表现为骨盆后倾, 脊柱生理曲度变浅、矢状轴前移。Albertsen 等^[23]通过体表成像动态分析发现相比于静止站立, 抬臂动作增加 TK、LL 和躯干后倾角度数, 且在体能不佳者中这些角度变化更明显, 提示机体通过调节脊柱矢状位平衡来维持前臂抬举动作, 身体条件越差则需要调动更多的“经济椎”外的脊柱矢状位代偿机制。

3 脊柱矢状位失衡患者的 DSB 分析

3.1 代偿性与失代偿性脊柱矢状位失衡的 DSB 分析

目前受到广泛应用的静态矢状位平衡分型是 Roussouly 分型和 SRS-Schwab 分型。Roussouly 矢状位分型是基于静态直立相的 PI 和 SS, 而 SRS-Schwab 矢状位分型是基于静态直立相的 PI-LL、SVA 和 PT。然而有学者认为根据上述分型的阈值进行划分会漏诊部分“静态参数正常”的矢状位失衡患者^[24]。脊柱本质上属于运动系统, 因此在经典的静态矢状位平衡理论之上, DSB 能够进一步识别静态参数正常的矢状位失衡患者, 同时可以评估躯体的矢状位躯体平衡代偿机制^[10]。Bae 等^[11]的研究发现矢状位失代偿组动态过程中的 SVA 增加仅和 PT 和 LL 减小相关, 而失代偿组的 SVA 增加是和多种矢状位参数变化均相关。Ham 等^[25]对 90 例 ASD 患者术后随访发现, 术前行走过程中动态骨盆前倾增加是术后 PJK 发生的独立危险

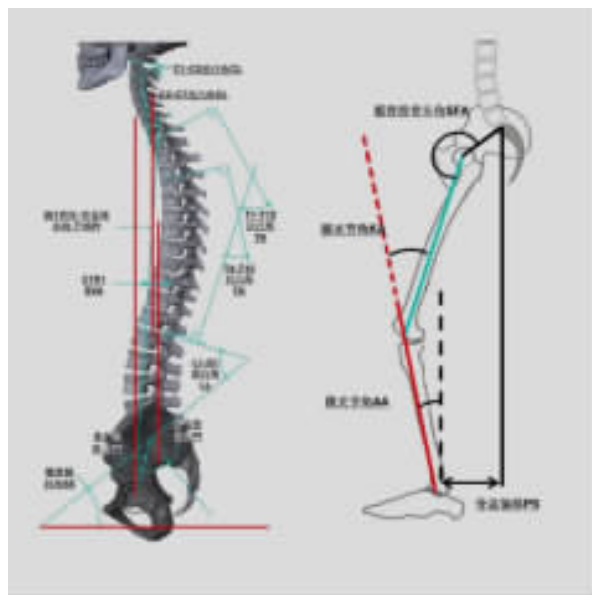


图 1 脊柱-骨盆矢状位参数: 腰椎前凸角(lumbar lordosis, LL)、躯干后凸角(trunk kyphosis, TK)、骨盆倾斜角(pelvic tilt, PT)、骨盆投射角(pelvic incidence, PI)、骶骨倾斜角(sacral slope, SS); 颈椎矢状位参数: 颈椎前凸角(cervical lordosis, CL); 脊柱整体矢状位参数: 矢状位垂直轴(sagittal vertical axis, SVA)、胸 1 脊柱骨盆倾斜角(T1 spino-pelvic inclination, T1 SPA); 脊柱外测量参数: 踝关节角(ankle angle, AA)、膝关节角(knee angle, KA)、骶骨-股骨头角(sacro-femoral angle, SFA)、骨盆偏移(pelvic shift, PS)

因素;Yin 等^[13]的研究发现 ASD 患者在步行 10min 后,LL、PI-LL 和 SVA 均明显增大,且在失代偿组中这些参数变化更明显。上述结果提示矢状位失平衡代偿患者相较于失代偿患者可能具有更强的动态代偿能力,而矢状位的动态代偿能力可能与手术治疗效果相关。

骨盆后倾、髋关节过伸、膝/踝关节角度增加等是矢状位失平衡患者下肢代偿的主要方式,运动状态能够暴露出矢状位失平衡患者可能存在的下肢代偿能力的不足^[26,27]。Yoshioda 等^[21]对腰椎滑脱症患者和健康志愿者做过伸过屈位动作对比后发现,健康志愿者的髋关节活动度明显大于滑脱组。Severijns 等^[28]发现 ASD 患者在静态下膝关节角度和踝关节角度都明显大于健康对照组,但是两组受试者在运动过程中下肢关节角度无明显差异,提示 ASD 患者动态过程中下肢关节的代偿能力低于正常人群。Yagi 等^[29]的研究也发现 ASD 患者步态过程中髋关节活动度明显小于健康对照组。

3.2 脊柱手术对于 DSB 的影响

恰当纠正矢状位失平衡的脊柱手术能有效改善患者症状和降低远期并发症风险,经过术前矢状位失平衡分型规划的手术治疗 ASD 患者减少了 52%~79% 的机械相关并发症^[7,30,31],因此理论上重新优化的脊柱-骨盆排列能够实现机体在动态过程中的相对稳定。Yin 等^[13]发现脊柱严重失平衡患者动态 SVA 和静态 SVA 差值超过 100mm 的患者对于保守治疗效果不佳,但是手术可以明显改善此类患者的矢状位失平衡和临床症状。Severijns 等^[15]发现 ASD 患者术后动态 SVA、TK、LL 减小,而膝关节活动度明显增加。Yagi 等^[29]通过分析 PSO 截骨矫形手术的 ASD 患者,发现术后患者的行走过程中 PT、髋关节过伸角和髋关节活动度均得到明显改善。Bailey 等^[32]通过 3D 步态分析发现,ASD 患者在术后完成坐-站动作时候 SVA 峰值下降 28%,腰椎扭矩明显下降,躯干对骶骨的剪切力和压力明显下降,完成站立所需竖脊肌力量明显下降,髋、膝关节完成动作的扭矩和能量均下降。因此,设计合理的矢状位矫正手术后 DSI 患者可能通过恢复脊柱正常排列和骨盆/下肢关节的代偿功能而改善运动状态下的矢状位平衡。

4 DSB 分析的意义

近年来随着学界对脊柱矢状位平衡的认知不断加深,脊柱矢状位平衡参数也逐渐成为脊柱外科手术的重要考量参数。纠正矢状位失平衡能降低内固定相关机械并发症和远期的医源性畸形。因此,即使对于相对简单的单节段腰椎间盘突出症患者,对于矢状位平衡的评估也是必要的。Diebo 等^[33]认为脊柱矢状位平衡研究未来的发展方向是动态的、能够与临床表现和治疗效果相关联的矢状位参数。

DSB 的生理作用是 minimized 机体维持直立的能量消耗和防止摔倒^[34]。当躯体范围偏出经济椎后,机体就会启动“耗能”的平衡代偿功能,而当核心肌群过度疲劳导致的平

衡功能失代偿后脊柱就会产生结构性的变化,甚至最终发展为 ASD 或行走障碍^[35]。多数研究者选用三维动作捕捉系统对受试者动作进行实时捕捉分析从而获取 DSB 参数,也有研究者用 X 线片对比和体表成像分析获取对 DSB 参数评估;动作而言,大部分的研究采用平地步行,也有研究对久站体位变化、坐-站体位变换、骨盆体位变化或者改良 Matthiass 动作进行分析;参数而言,主要以 SVA、PT、LL、SS 和骨盆前倾角的动态对比为主,也有部分研究通过对于下肢的动力学和运动学参数进行代偿机制的分析;研究结论而言,大部分的研究发现相较于静态直立相,运动过程中或者运动后脊柱矢状位失平衡更容易凸显出来,动态矢状位失平衡加重与运动状态下的代偿能力明显下降有关。考量充分、规划合理的脊柱矫形手术可以明显改善患者的 DSB 参数。

脊柱平衡不单纯是影像学上的形态排列,而应是运动过程中的神经系统、肌肉系统和骨骼系统的共同作用下的躯体综合平衡维持^[36]。静态直立位的矢状位参数能提供的信息是机体在某一时刻为了维持矢状位平衡的脊柱-骨盆-下肢角度和匹配情况。相比之下动态情况躯体直立的维持本身相对于静止状态需要更高的肌肉能量消耗,动态下可能会耗竭“静态代偿”。因此 DSB 的监测分析可以帮助医生识别出静态矢状位影像学表现正常而实际在运动条件下才表现出矢状位失平衡的患者。临床上对于存在“静态代偿”的患者,若忽略此类患者的动态情况下的矢状位失平衡情况可能会导致治疗效果无法达到手术的预期效果,甚至造成新的力学不匹配进而造成 PJK、DJK 和内固定相关并发症^[24]。DSB 的深入研究结果逐渐阐明了脊柱矢状位平衡的代偿机制,从而对精准诊断和个体化治疗提供了依据。Schwab 等^[37]认为矢状位参数的手术纠正目标是:SVA<50mm,PT<20°和 PI-LL<10°,然而实际情况中 ASD 经过手术治疗后约 68% 的患者出现矫形不足或过度矫形,仅 32% 的脊柱排列能得到满意的矫正;同时 ASD 手术相关并发症率也高达 8.4%~42%,翻修率高达 17.6%^[38-42]。我们认为部分原因在于目前的矢状位平衡仅参考静态脊柱-骨盆参数,而未考虑个体之间矢状位平衡代偿能力的不同。矢状位平衡的代偿机制包括:增加颈椎前凸、减小胸椎后凸、腰椎节段过度伸展、骨盆后倾、膝关节屈曲和踝关节背伸^[27]。但是大部分研究证实,在运动过程中 ASD 患者的骨盆和下肢关节的矢状位代偿机制均减弱,这说明一味纠正脊柱矢状位参数而不考虑个体脊柱外代偿情况而进行手术规划是不合理的。Yin 等^[13]根据步行 10min 前后的 SVA 差值将 DSI 分为 3 度:轻度(20~60mm),中度(60~100mm)和重度(>100mm),轻中度 DSI 对核心肌群训练反应良好,而重度患者需要手术。虽然这是一项富有启发性的研究,但是作者也指出他们研究的缺陷在于没有将肌肉因素和下肢代偿功能纳入考量。

5 DSB 的研究局限性和应用展望

总体而言, 目前的研究证据已经初步展示出 DSB 研究结果的一致性, 但其研究仍然存在一些问题: (1) 对于 DSB/DSI 的研究和应用仍处于起始阶段, 评估方法、研究参数都缺乏统一标准; (2) 目前的研究人群主要局限于 ASD 患者和健康人群中, 研究的动作也比较单一, 因此其结论的外推存在一定的限制; (3) 尽管目前单纯使用 X 线评估的 DSB 研究具有较好的可重复性, 但是单纯的 X 线动态对比不足以充分评估矢状位的代偿机制, 而三维动作捕捉系统和体表成像分析系统设备和技术要求高且操作烦琐; (4) 对于实施动态监测设备而言, 目前部分设备的信噪比和精确性无法满足临床需求^[43,44]; (5) 动态表面肌电图能够反映运动过程中肌肉的情况, 对于矢状位平衡的肌肉维持和代偿的理解和研究具有重要的意义, 然而目前鲜有关于 DSB/DSI 的动态肌电图的报道。尽管有上述限制和不足, 但是我们仍然相信 DSB/DSI 具有较好的发展前景, 特别是在未来与数字化医学、人工智能等相结合的发展潜能。DSB 未来将对于健康人和各种脊柱疾病患者, 使用更精确而全面的设备, 对更多的动作进行更一致化的评价, 所产出的 DSB 参数由外科医师、康复师、生物工程专家等专业人员组成的多学科团队共同分析和使用。

6 参考文献

- Abelin-Genevois K. Sagittal balance of the spine[J]. Orthop Traumatol Surg Res, 2021, 107(1s): 102769.
- Dubousset J. Three-dimensional analysis of the scoliotic deformity[C]. The pediatric spine: principles and practice. 1994.
- Glassman SD, Bridwell K, Dimar JR, et al. The impact of positive sagittal balance in adult spinal deformity [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2005, 30(18): 2024–2029.
- Smith JS, Klineberg E, Schwab F, et al. Change in classification grade by the SRS-Schwab adult spinal deformity classification predicts impact on health-related quality of life measures: prospective analysis of operative and nonoperative treatment[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2013, 38(19): 1663–1671.
- Roussouly P, Gollogly S, Berthonnaud E, et al. 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(3): 346–353.
- 赵耀, 李淳德, 孙浩林. 脊柱矢状位平衡的影像学参数及分型的研究进展[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2012, 22(7): 81–85.
- Sebaaly A, Gehrchen M, Silvestre C, et al. Mechanical complications in adult spinal deformity and the effect of restoring the spinal shapes according to the Roussouly classification: a multicentric study[J]. Eur Spine J, 2020, 29(4): 904–913.
- Hey HWD, Tan KLM, Moorthy V, et al. Normal variation in sagittal spinal alignment parameters in adult patients: an EOS study using serial imaging[J]. Eur Spine J, 2018, 27(3): 578–584.
- Kato S, Fok KL, Lee JW, et al. Dynamic fluctuation of truncal shift parameters during quiet standing in healthy young individuals[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2018, 43(13): E746–E751.
- Lee CS, Lee CK, Kim YT, et al. Dynamic sagittal imbalance of the spine in degenerative flat back: significance of pelvic tilt in surgical treatment[J]. Spine, 2001, 26(18): 2029–2035.
- Bae J, Theologis AA, Jang JS, et al. Impact of fatigue on maintenance of upright posture: dynamic assessment of sagittal spinal deformity parameters after walking 10 minutes [J]. Spine(Phila Pa 1976), 2017, 42(10): 733–739.
- 尹佳, 张珂, 马骁, 等. 成人脊柱侧凸患者长时间行走后矢状面失平衡的动态评估[J]. 第二军医大学学报, 2020, 41(3): 248–253.
- Yin J, Ma X, Lin T, et al. Characteristics and treatment of dynamic sagittal imbalance in adult spinal deformity[J]. Eur Spine J, 2020, 29(9): 2340–2353.
- Kim HJ, Chun HJ, Shen F, et al. Analysis of pelvic compensation for dynamic sagittal imbalance using motion analysis[J]. Eur Spine J, 2020, 29(3): 428–437.
- Severijns P, Moke L, Overbergh T, et al. Dynamic sagittal alignment and compensation strategies in adult spinal deformity during walking[J]. Spine J, 2021, 21(7): 1059–1071.
- Shiba Y, Taneichi H, Inami S, et al. Dynamic global sagittal alignment evaluated by three-dimensional gait analysis in patients with degenerative lumbar kyphoscoliosis [J]. Eur Spine J, 2016, 25(8): 2572–2579.
- Michalik R, Hamm J, Quack V, et al. Dynamic spinal posture and pelvic position analysis using a rasterstereographic device[J]. J Orthop Surg Res, 2020, 15(1): 1–7.
- Pesenti S, Prost S, Pomero V, et al. Does static trunk motion analysis reflect its true position during daily activities in adolescent with idiopathic scoliosis [J]. Orthop Traumatol Surg Res, 2020, 106(7): 1251–1256.
- Ould-Slimane M, Latrobe C, Michelin P, et al. Noninvasive optoelectronic assessment of induced sagittal imbalance using the vicon system[J]. World Neurosurg, 2017, 102: 425–433.
- Hayden AM, Hayes AM, Brechbuhler JL, et al. The effect of pelvic motion on spinopelvic parameters[J]. Spine J, 2018, 18(1): 173–178.
- Yoshioka K, Murakami H, Demura S, et al. The large individual differences in the range of hip joint motion rather than lumbar spine motion affect dynamic spinopelvic rhythm [J]. Spine Surg Relat Res, 2019, 3(3): 255–260.
- 王伟, 周思宇, 孙卓然, 等. 中老年人从站立位到坐位的脊柱矢状位序列变化[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2019, 29(7): 621–626.
- Albertsen IM, Dettmann K, Babin K, et al. Spinal postural changes during the modified Matthiass test in healthy children: interday and interrater reliability of dynamic rasterstereographic measurements[J]. Orthopade, 2018, 47(7): 567–573.
- Bess S, Schwab F, Lafage V, et al. Classifications for adult

- spinal deformity and use of the scoliosis research society-schwab adult spinal deformity classification [J]. *Neurosurg Clin N Am*, 2013, 24(2): 185-193.
25. Ham DW, Han H, Kim HJ, et al. Risk factors for acute proximal junctional kyphosis after adult spinal deformity surgery in preoperative motion analysis [J]. *Eur Spine J*, 2021, 30(5): 1215-1225.
 26. Gangnet N, Pomero V, Dumas R, et al. Variability of the spine and pelvis location with respect to the gravity line: a three-dimensional stereoradiographic study using a force platform[J]. *Surg Radiol Anat*, 2003, 25(5-6): 424-433.
 27. Le Huec JC, Thompson W, Mohsinaly Y, et al. Sagittal balance of the spine[J]. *Eur Spine J*, 2019, 28(9): 1889-1905.
 28. Severijns P, Moke L, Overbergh T, et al. Are static sagittal compensation strategies preserved during walking in adult spinal deformity[J]. *Gait and Posture*, 2017, 57: 153-154.
 29. Yagi M, Kaneko S, Yato Y, et al. Walking sagittal balance correction by pedicle subtraction osteotomy in adults with fixed sagittal imbalance[J]. *Eur Spine J*, 2016, 25(8): 2488-2496.
 30. Lenke LG. Sagittal balance[J]. *J Neurosurg Spine*, 2014, 20(5): 512-514.
 31. Pizones J, Moreno-Manzanaro L, Sánchez Pérez-Grueso FJ, et al. Restoring the ideal rousouly sagittal profile in adult scoliosis surgery decreases the risk of mechanical complications[J]. *Eur Spine J*, 2020, 29(1): 54-62.
 32. Bailey JF, Matthew RP, Seko S, et al. Issls prize in bio-engineering science 2019: biomechanical changes in dynamic sagittal balance and lower limb compensatory strategies following realignment surgery in adult spinal deformity patients [J]. *Eur Spine J*, 2019, 28(5): 905-913.
 33. Diebo BG, Shah NV, Boachie-Adjei O, et al. Adult spinal deformity[J]. *The Lancet*, 2019, 394(10193): 160-172.
 34. Winter DA. Human balance and posture control during standing and walking[J]. *Gait & posture*, 1995, 3(4): 193-214.
 35. Mekhael M, Labaki C, Bizdikian AJ, et al. How do skeletal and postural parameters contribute to maintain balance during walking[J]. *Hum Mov Sci*, 2020, 72: 102658.
 36. Redaelli A, Berjano P, Aebi M. Focal disorders of the spine with compensatory deformities: how to define them [J]. *Eur Spine J*, 2018, 27(Suppl 1): 59-69.
 37. Schwab F, Patel A, Ungar B, et al. Adult spinal deformity-postoperative standing imbalance: how much can you tolerate: an overview of key parameters in assessing alignment and planning corrective surgery [J]. *Spine*, 2010, 35(25): 2224-2231.
 38. Bianco K, Norton R, Schwab F, et al. Complications and intercenter variability of three-column osteotomies for spinal deformity surgery: a retrospective review of 423 patients [J]. *Neurosurg Focus*. 2014, 36(5): E18.
 39. Schwab FJ, Hawkinson N, Lafage V, et al. Risk factors for major peri-operative complications in adult spinal deformity surgery: a multi-center review of 953 consecutive patients[J]. *Eur Spine J*, 2012, 21(12): 2603-2610.
 40. Pichelmann MA, Lenke LG, Bridwell KH, et al. Revision rates following primary adult spinal deformity surgery: six hundred forty-three consecutive patients followed-up to twenty-two years postoperative[J]. *Spine*, 2010, 35(2): 219-226.
 41. Maier S, Smith J, Schwab F, et al. Revision surgery after three-column osteotomy in 335 adult spinal deformity patients: inter-center variability and risk factors [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2014, 39: 881-885.
 42. Blondel B, Schwab F, Bess S, et al. Posterior global malalignment after osteotomy for sagittal plane deformity: it happens and here is why[J]. *Spine*, 2013, 38(7): E394-E401.
 43. Takeda R, Lisco G, Fujisawa T, et al. Drift removal for improving the accuracy of gait parameters using wearable sensor systems[J]. *Sensors(Basel)*, 2014, 14(12): 23230-23247.
 44. Zhou Q, Zhang H, Lari Z, et al. Design and implementation of foot-mounted inertial sensor based wearable electronic device for game play application[J]. *Sensors(Basel)*, 2016, 16(10): 1752.

(收稿日期:2021-07-23 修回日期:2021-10-20)

(本文编辑 姜雅浩)