

# 人体重力线研究及其在脊柱领域中的应用

施益锋<sup>1,2</sup>, 梁海波<sup>1,2</sup>, 王向阳<sup>1,2</sup>

(1. 温州医科大学附属第二医院育英儿童医院 骨科, 浙江 温州 325700;

2. 温州医科大学 第二临床医学院, 浙江 温州 325035)

**摘要:** 人体重力线 (gravity Line, GL) 是穿过人体重心 (centre of gravity, COG) 的一条虚拟垂线, 对于评估人体生物力学具有重要意义。由于 GL 无法直接通过影像学方法确定, 其在过去的研究和临床应用中受到了一定限制。然而, 随着科技进步, GL 的测量和应用已经取得了显著进展, 成为传统放射学测量的重要补充, 并在脊柱领域展现出日益广泛的应用前景。本文综述了 GL 解剖基础、测量方法以及其与其他常用垂线的关系, 进一步总结了 GL 在脊柱领域中的临床应用现状, 并对其在脊柱疾病诊断和治疗中的潜在作用进行了深入讨论。期望研究结果能够为脊柱疾病的诊断和治疗提供新的视角, 并推动 GL 在脊柱领域的进一步研究和应用。

**关键词:** 重心; 重力线; 脊柱生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2025.02.030

## Human Gravity Line Research and its Application in the Field of Spinal Medicine

SHI Yifeng<sup>1,2</sup>, LIANG Haibo<sup>1,2</sup>, WANG Xiangyang<sup>1,2</sup>

(1. Department of Orthopedics, the Second Affiliated Hospital and Yuying Children's Hospital of Wenzhou Medical University, Wenzhou 325700, Zhejiang, China; 2. The Second School of Medicine, Wenzhou Medical University, Wenzhou 325035, Zhejiang, China)

**Abstract:** The human gravity line (GL) is a virtual vertical line that passes through the centre of gravity (COG) of the human body and holds significant importance in assessing human biomechanics. Due to the inability to directly determine GL through imaging method, its application in past research and clinical practice has been somewhat limited. However, with the advancement of technology, the measurement and application of GL have made remarkable progress, becoming an essential supplement to traditional radiographic measurements and demonstrating an increasingly broad application prospect in the field of spinal health. This review summarizes the GL's anatomical basis, measurement method, and its relationship with other commonly used vertical lines. Furthermore, the current status of GL's clinical application in the field of spinal health is also summarized, and its potential role in the diagnosis and treatment of spinal diseases is discussed. It is hoped that the findings will offer new perspectives for the diagnosis and treatment of spinal diseases, and promote further research and application of GL in the field of spinal medicine.

**Key words:** center of gravity; gravity line; spinal biomechanics

引力是一种试图将两个物体相互拉向对方的力,任何有质量的东西都有引力。一个物体质量越大,它的引力就越强。地球的引力,即重力使人体保持在地面上,并使物体下落。人体重心是一个假设的点,重力围绕着它起作用,人体重力线可以通过人体重心来确定。由于人体重心与重力线无法直接通过 X 线片确认,故其在过去的应用中受到一定限制。目前,随着医疗技术的发展,重力线作为评估人体生物力学的核心参数逐渐受到重视,其独特之处在于能够直接反映重力作用下的人体平衡状态,是理解脊柱、骨盆乃至全身力学特性的关键。本文从重力线解剖基础、测量方法,与其他常用垂线的关系等方面进行综述,并就近年来国内外关于重力线在脊柱领域中的临床应用进行总结与展望。

## 1 人体重心与重力线的解剖位置

### 1.1 人体重心

人体重心是指身体的质量中心或平衡点。重心是概念性的,它不是解剖学的一部分,会随着身体的每个动作不断变化<sup>[1]</sup>。重心会改变关节的反应和肌肉的表现,许多运动与姿势也会使重心位于身体之外(见图 1)。Vaz 等<sup>[2]</sup>使用力板确定重心的位置,在矢状面上,80% 正常人群的重心位于髋关节上方,并总是处于一个相对于骶骨末端中间向前的位置。

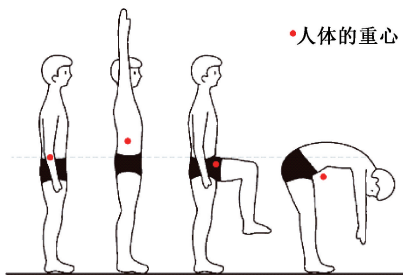


图 1 重心在不同姿势中的变化

Fig. 1 Changes of center of gravity in different postures

### 1.2 人体重力线

人体重力线与重心直接相关,因为重力线是指通过重心的垂直线,代表了地球引力对身体的作用,重力线也称为人体的重心线、力线、中垂线等。在水平面上,重力线的位置与双股轴、骶骨中心相关<sup>[2]</sup>。重力线在冠状位的投影正好在两个股骨头

之间,但在矢状位的投影会由于骨盆的原因变得相对复杂(见图 2)。

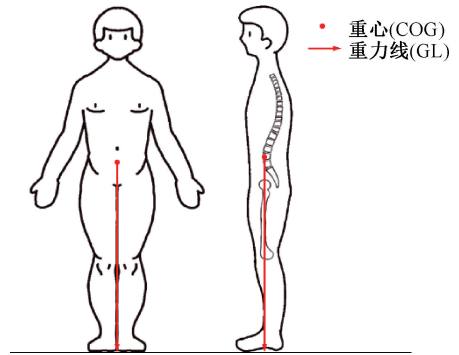


图 2 人体的重心与重力线

Fig. 2 Center of gravity and gravity line in human body

Schwab 等<sup>[3]</sup>通过分析成人志愿者重力线发现,重力线在矢状面位于脊柱的前方,且随着年龄的增长,重力线与足跟的位置相对固定,髌骨和股骨头的位置相对它们向后方移动,并认为股骨头的位置是重力线的一个可靠的影像学指标,可通过参考其位置来确定重力线的位置。重心越靠近支撑基础(如双脚)的中心,一个人在这个位置上就越平衡。如果重力线落在支撑基础之外,人必须提供肌肉动作,否则就会摔倒。当一个人的重心较低、重力线较短时,意味着其身体质量分布更靠近支撑基础,从而提高了整体的稳定性。

## 2 测量重力线的方法

在之前研究中有很多确定重力线的方法,主要包括:① 姿势确定重力线;② X 线+测力板;③ 立体放射成像+测力台;④ 双向站立负重全长成像系统(EOS)+力板 3D 重建。

### 2.1 姿势确定重力线

Zatsiorsky 等<sup>[4]</sup>在计算重力线位置时提出了“从零点到零点的积分”,并采用光学方法验证了该算法,以确定单腿站立时的重力线位置。结果表明,零点到零点的积分能够从姿势记录中计算出重力线位置。随着运动捕捉系统的出现,Tanaka 等<sup>[5]</sup>通过无标记的运动捕捉系统,在健康人从坐到站的运动中计算出了重心。该方法可不通过影像学来确定重心和重力线的位置,对教练和运动员具有重要意义。

## 2.2 X线+测力板

单一的X线由于无力学相关的数据,无法直接确定重力线的位置。Vaz等<sup>[2]</sup>通过结合X线与测力板研究了正常志愿者的脊柱参数。重力测量结果与X线片同时进行,通过同源投影与软件计算,确定了重力线在X线片上的位置。

## 2.3 立体放射成像+测力台

Gangnet等<sup>[6]</sup>采用正交轴拍摄两张X线片,从左到右的站立侧视图和前后视图,再结合测力台与软件,生成可以从空间中的任何一个点来观察三维模型。该方法进一步优化了确定重力线的方法,使重力线更好地用于评估头部、脊柱和骨盆的三维位置与脊柱盆腔的解剖和位置参数之间的相关性。

## 2.4 EOS成像系统+力板3D重建

EOS成像系统由Dubouset等<sup>[7]</sup>于2005年首次提出,是一种低剂量辐射装置,三维重建精度与CT相当,患者以站立(或坐姿)的姿势接受检查,并同时从头部到足部(包括正面和侧面)进行扫描,全长X片非常适合重力线的测量。Steffen等<sup>[8]</sup>首次利用EOS结合力板对重力线进行3D重建,并提出了临床常规可用的参数。Moke等<sup>[9]</sup>也使用EOS采集了手指置于锁骨上的自由站立姿势下的图像,在图像采集过程中,通过EOS系统底部集成的力板连续记录受试者的压力中心,随后在扫描时间内取平均值,获得平均压力中心,最后对EOS成像空间中的力板读数进行空间校准,使重力线在EOS图像上精确投影。在最新的一项研究中,EOS系统也被单独用来虚拟测量重心与重力线,通过与力板结果的比较,表现出较高的准确性,该方法的出现可以使临床医生更便捷地使用重力线<sup>[10]</sup>。

随着影像设备(包括测力板)和计算机技术的不断进步,这些方法使得重力线的测量变得更加精确和标准化。在临床实践中,规范且准确的重力线测量对于其广泛应用至关重要。因此,本文推荐采用第4种方法,即结合EOS成像系统、力板测量以及统一标准化姿势的三维重建技术,作为测量重力线的首选方法。这种方法不仅提高了测量的准确性,还有助于实现数据的标准化,从而为临床应用提供了可靠的基础。

## 3 重力线与其他常用垂线的关系

### 3.1 颈7铅垂线

颈7铅垂线(C7 plumb line, C7PL)是评估脊柱平衡的一个简单而常用的参数,取自全长站立的X线片,并从C7椎体中心绘制一个垂直的铅垂线(见图3)。冠状面平衡由C7PL到骶椎S1中心的水平距离来测量。矢状面平衡通过从C7PL到骶椎S1终板后上角的水平距离来测量<sup>[11-12]</sup>。C7PL因可通过X线片直接得出,其在临床中应用广泛。根据C7PL定义,其未考虑人体的姿势和其他力学因素,其与重力线是不同的,但C7PL与重力线经常被同时应用于衡量脊柱与身体的平衡。

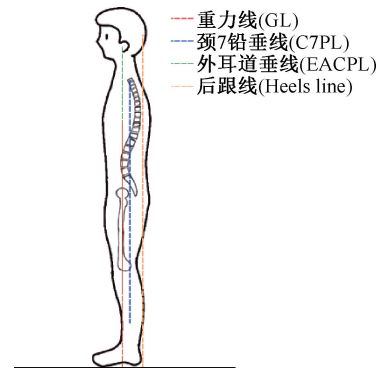


图3 重力线与其他常用垂线

Fig. 3 Gravity line and other common vertical lines

Roussouly等<sup>[13]</sup>研究发现,C7PL和稳定站立位置的重力线不位于同一位置。重心位于脊柱的前面,重力线穿过股骨头,在一个平衡的脊柱中,C7PL总是在重力线的后面。El Fegoun等<sup>[14]</sup>发现志愿者受试者和脊柱侧凸患者的重力线在冠状面相对于C7PL向右偏移。在矢状面,脊柱侧凸患者的重力线与C7PL之间缺乏相关性。Mac-Thiong等<sup>[15]</sup>为了确认使用C7PL和重力线评估的冠状面和/或矢状面平衡是否与Oswestry残疾指数(Oswestry disability index, ODI)相关进行了研究,发现矢状面脊柱(C7PL)和整体(重力线)平衡及其相对位置与ODI显著相关,冠状面脊柱和整体平衡并不影响ODI。重力线与C7PL同时应用于评估脊柱平衡,在成人脊柱侧凸的管理中很重要。另外,Zheng等<sup>[16]</sup>采用光学方法评价C7PL和重力线在不同站立位置的重复性,发现重力线测量在后前位和侧向视图上

均具有比 C7PL 更好的可重复性,由此可以推测重力线在不同时间也更具有可重复性,这是 C7PL 不具备的。但在评价手术治疗对成人脊柱侧凸患者健康相关生活质量 (health-related quality of life, HRQOL) 和影像学变量的影响时,只有 C7PL 测量的矢状面平衡与术前和术后 ODI 评分显著相关,用重力线测量的脊柱平衡并不比 C7PL 与健康状况提供更好的相关性<sup>[17]</sup>。

### 3.2 外耳道垂线

外耳道在解剖学上位于颈椎的顶部,其矢状面位置可以很容易地定义一个相关的全局矢状面平衡标志。外耳道垂线 (external auditory canal plumb line, EACPL) 从外耳道口垂直向下延伸 (见图 3), 用于定位脊柱的全长侧位 X 线片, 确保身体位于正确的位置, 同时与重力线的位置相联系。

Vidal 等<sup>[18]</sup> 评估了青少年特发性脊柱侧凸 (adolescent idiopathic scoliosis, AIS) 整体矢状面平衡参数和矢状面脊柱曲线的影像学测量在观察者内和观察者间的可靠性, 外耳道被证明是整体矢状面脊柱对齐的可靠标志。Yagi 等<sup>[19]</sup> 研究认为, 重力线与 EACPL 在影像学上一致, 并根据力平台分析和 X 线结果, 比较了 20 例成人脊柱畸形 (adult spinal deformity, ASD) 患者地面反作用力、C7PL 和影像学重力线 (即 EACPL), 发现 EACPL 和 C7PL 之间存在显著差异, 20 例患者中有 17 例地面反作用力与 EACPL 一致。张子方等<sup>[20]</sup> 在探讨 ASD 矫形术后早期躯体重心线 (W-line) 与近端交界区失败的相关性时也将经外耳道口垂线定义为 W-line, 发现 ASD 患者矫形术后早期 W-line 位置可有效预测近端交界区失败发生。Hasegawa 等<sup>[21]</sup> 将耳道中心 (center of the acoustic meati, CAM) 与重力线的距离 (CAM-重力线) 作为评估健康人群站立时全身矢状面对齐和平衡的参数, 发现 CAM-重力线在年龄增长时保持恒定。

### 3.3 后跟线

后跟线指的是从脚后跟到地面的垂直线 (见图 3), 用于衡量脚部和身体的关系, 对于站立姿势和平衡评估非常有用。Schwab 等<sup>[3]</sup> 通过重力线和后跟线位置评估年龄相关的脊柱平衡变化, 发现在成年志愿者人群中, 尽管躯干倾斜和 C7PL 随着年龄的增长而改变, 但骨盆似乎起着调节作用, 以维持

固定的重力线-后跟线关联, 为 Dubouset 等<sup>[22]</sup> 提出的“经济圆锥 (cone of economy)”概念提供了支持。Lafage 等<sup>[23]</sup> 确定了不同矢状位上重力线、后跟线和脊柱盆标志之间的关系, 证明在不同矢状纵轴偏移量的组中, 重力线-后跟线偏移量没有显著差异, 盆骨移位是保持一个相对固定的重力线-后跟线偏移量的关键因素。尽管脊柱骨盆参数的规范值变化很大, 但重力线总是位于与后跟线相对固定的偏移量处<sup>[3,23-25]</sup>。

## 4 重力线在脊柱领域中的临床应用

脊柱健康是指脊柱的结构和功能处于良好状态, 能够正常支撑身体、保护脊髓和神经根, 以及与其他身体系统协同工作以维持整体健康。脊柱作为人体的中轴和支柱, 对人体健康至关重要。脊柱生物力学在脊柱健康中扮演着极其重要的角色, 它涉及脊柱如何承受和分配力量、如何适应运动和负荷, 以及如何维持结构和功能的完整性<sup>[26-27]</sup>。

重力线作为人体重要的与力学相关的参数, 参与脊柱生物力学, 在脊柱领域中的临床应用广泛, 对于临床诊断、治疗规划、疗效评估以及疾病管理都具有重要意义。通过与脊柱骨盆参数的综合应用, 重力线能够为脊柱相关疾病的诊断、治疗和康复提供更为全面和深入的评估, 优化临床决策过程, 提高治疗效果。

### 4.1 脊柱平衡评估

重力线是地面与躯干、骨盆和下肢之间的理想动态链之间的反应的结果<sup>[3,13]</sup>, 代表与地面的相互作用, 非常适合用来评估人体脊柱的平衡。对于处于平衡位置的人, 这条线必须落在由两脚着地位置所定义的支撑基础。当重力线落在支撑基础之外时, 需要通过各种机制来进行补偿, 纠正任何矢状面不平衡的趋势<sup>[28-29]</sup>。

目前重力线已被用于评估各种情况下的脊柱平衡, 包括无症状志愿者<sup>[3,8,13]</sup>、青春期生长高峰前后的脊柱平衡<sup>[30]</sup>、AIS<sup>[14,18]</sup>、ASD<sup>[19]</sup>、成人下颌偏曲合并脊柱侧凸<sup>[31]</sup>、运动状态时的脊柱平衡<sup>[24]</sup>。其中, 脊柱畸形的生物力学特性极为复杂, 涉及多维度的空间结构和力的作用, 重力线的作用因此尤为显著。重力线与脊柱骨盆参数的结合使用, 能够提供更为全面的脊柱平衡评估, 提高脊柱畸形的诊

断,帮助检测畸形的进展情况,并能指导康复训练和非手术治疗方法。

## 4.2 预后预测

重力线对于脊柱畸形疾病的预后预测十分重要。重力线可预测颈椎畸形患者预后。Mizutani等<sup>[32]</sup>提出重力线可用于评估颈椎重建手术的首要目标,即实现枕干的一致性(重力线与C7PL之间的距离小于30 mm),并用于预测胸腰椎序列的变化。因为一旦达到这一目标,随后的胸腰椎序列改变会根据需要来协调整体脊柱序列。Lee等<sup>[33]</sup>为了预测颈椎畸形患者功能改善提出了新的齿状突参数,其中包括重力线-C2(重力线与C2中心之间的距离),发现头部前移与重力线前移相关。颈部视觉模拟评分与重力线-C2之间的相关性分析表明,随着头部前移,颈部疼痛会随之增加。

重力线还可用于预测ASD术后相关并发症。Xi等<sup>[34]</sup>确定了相对于重力线的L1位置与近端关节后凸(proximal junctional kyphosis, PJK)相关联,L1相对于重力线背侧移位与ASD术后PJK风险增加相关,术后L1-重力线距离可能是ASD手术中需要考虑的因素。An等<sup>[35]</sup>将重力线-髋轴偏移作为评估ASD术后机械并发症的关键危险因素,其中EACPL在影像学中代替重力线,当重力线-髋轴偏移>5 cm时,ASD的手术矫正与机械并发症显著相关,推荐ASD术后重力线应位于髋轴附近。该团队进一步研究发现,术后重力线-髋轴偏移是ASD患者翻修术后复发性近端交界性后凸/失败的重要危险因素<sup>[36]</sup>。该团队在最近还综述了ASD术后头-髋偏移的临床影响,将重力线-髋轴偏移作为头-髋偏移,总结头-髋偏移策略,为脊柱外科医生提供了一个更精确的视角,有助于制定ASD手术的最佳矫正基准<sup>[37]</sup>。

Moke等<sup>[9]</sup>为了分析ASD患者的平衡控制能力与HRQOL的关系,提出了一个与重力线相关的三维脊柱序列参数——横向重力偏差指数(transverse gravitational deviation index, TGDI),定义为任意椎体相对于重力线的横断面位置。结果发现,ASD合并L3椎体冠状位和矢状位畸形患者的平衡控制水平和HRQOL均与L3椎体中心与横断面重力线的偏移量有关,即ASD合并L3椎体冠状位和矢状位畸形患者更容易出现平衡障碍。重力线与TGDI在此

方面的应用,可推动ASD患者在针对性康复计划和手术适应证等方面的发展。

潘广松等<sup>[38]</sup>探讨了腰椎重力线在腰椎间盘突出患者中的变化分析及腰腿痛影像的相关性,将L3椎体对角线相交点引垂线作为腰椎重力线,结果发现,腰椎重力线改变能参与腰椎间盘突出病变的发生发展,且与腰腿痛存在相关性。加强腰椎重力线测定能指导临床诊疗,减轻患者疼痛与不适。本文中的重力线非人体的重力线,为作者根据研究目的定义的躯体局部重力线,也具有相应的临床价值。

## 5 总结与展望

重力线作为评估人体生物力学的关键参数,在脊柱领域的应用日益广泛。随着影像学和计算机技术的进步,重力线的测量变得更加简便、精确,且具有良好的重复性。这使得重力线非常适合作为衡量人体平衡的常规参数,为临床实践和研究提供了重要工具。

尽管重力线的测量技术已取得显著进展,然而,重力线测量方法的标准化问题仍然存在。在以往研究中,重力线的测量并非总是严格遵循影像学 and 力板测量的标准。即便如此,这些研究对于理解重力线的应用价值仍具有重要意义。值得注意的是,尽管EACPL与重力线在某些方面相似,但EACPL并不能取代重力线。因此,为了确保研究的准确性和可比性,重力线的测量应遵循统一的标准,即结合EOS成像系统、力板测量以及统一标准化姿势的三维重建技术,作为测量重力线的首选方法。

重力线在脊柱领域的应用前景广阔。随着影像学技术、计算机技术以及人工智能和机器学习技术的不断进步,重力线的测量和分析将变得更加精确和高效。未来的研究应致力于进一步标准化重力线的测量方法,确保在不同临床和研究环境中的一致性和可比性。此外,探索重力线在各种脊柱疾病中的具体应用,了解其在疾病诊断、治疗和预后评估中的作用,将是未来的重要方向。通过将重力线分析与其他生物力学参数结合,有望构建更加全面的脊柱平衡评估体系,从而为临床决策提供更科学的依据。随着技术的进步,期待重力线在个性化医疗中的应用,为患者提供更精准、更有效的治疗方案。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:施益锋、梁海波负责文献检索、整理和撰写论文;王向阳、梁海波负责文献整理和论文修改。

## 参考文献:

- [ 1 ] VERNAZZA S, ALEXANDROV A, MASSION J. Is the center of gravity controlled during upper trunk movements? [J]. *Neurosci Lett*, 1996, 206(2-3): 77-80.
- [ 2 ] VAZ G, ROUSSOULY P, BERTHONNAUD E, et al. Sagittal morphology and equilibrium of pelvis and spine [J]. *Eur Spine J*, 2002, 11(1): 80-87.
- [ 3 ] SCHWAB F, LAFAGE V, BOYCE R, et al. Gravity line analysis in adult volunteers: Age-related correlation with spinal parameters, pelvic parameters, and foot position [J]. *Spine*, 2006, 31(25): E959-967.
- [ 4 ] ZATSORSKY VM, KING DL. An algorithm for determining gravity line location from posturographic recordings[J]. *J Biomech*, 1998, 31(2): 161-164.
- [ 5 ] TANAKA R, ISHII Y, YAMASAKI T, et al. Measurement of the total body center of gravity during sit-to-stand motion using a markerless motion capture system[J]. *Med Eng Phys*, 2019(66): 91-95.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] DUBOUSSET J, CHARPAK G, DORION I, et al. A new 2D and 3D imaging approach to musculoskeletal physiology and pathology with low-dose radiation and the standing position: The EOS system[J]. *Bull Acad Natl Med*, 2005, 189(2): 287-297.
- [ 8 ] STEFFEN J S, OBEID I, AUROUER N, et al. 3D postural balance with regard to gravity line: An evaluation in the transversal plane on 93 patients and 23 asymptomatic volunteers[J]. *Eur Spine J*, 2010, 19(5): 760-767.
- [ 9 ] MOKE L, OVERBERGH T, SEVERIJNS P, et al. The Transverse gravitational deviation index, a novel gravity line-related spinal parameter, relates to balance control and health-related quality of life in adults with spinal deformity[J]. *Spine*, 2020, 45(1): E25-E36.
- [10] HASEGAWA K, AMABILE C, NESME M, et al. Gravity center estimation for evaluation of standing whole body compensation using virtual barycentrometry based on biplanar slot-scanning stereoradiography—Validation by simultaneous force plate measurement [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2022, 23(1): 22.
- [11] GELB DE, LENKE LG, BRIDWELL KH, et al. An analysis of sagittal spinal alignment in 100 asymptomatic middle and older aged volunteers [J]. *Spine*, 1995, 20(12): 1351-1358.
- [12] JACKSON RP, MCMANUS AC. Radiographic analysis of sagittal plane alignment and balance in standing volunteers and patients with low back pain matched for age, sex, and size. A prospective controlled clinical study [J]. *Spine*, 1994, 19(14): 1611-1618.
- [13] ROUSSOULY P, GOLLOGLY S, NOSEDA O, et al. The vertical projection of the sum of the ground reactive forces of a standing patient is not the same as the C7 plumb line: A radiographic study of the sagittal alignment of 153 asymptomatic volunteers [J]. *Spine*, 2006, 31(11): E320-325.
- [14] EL FEGOUN A B, SCHWAB F, GAMEZ L, et al. Center of gravity and radiographic posture analysis: A preliminary review of adult volunteers and adult patients affected by scoliosis[J]. *Spine*, 2005, 30(13): 1535-1540.
- [15] MAC-THIONG JM, TRANSFELDT EE, MEHBOD AA, et al. Can C7 plumbline and gravity line predict health related quality of life in adult scoliosis? [J]. *Spine*, 2009, 34(15): E519-527.
- [16] ZHENG X, CHAUDHARI R, WU C, et al. Repeatability test of C7 plumb line and gravity line on asymptomatic volunteers using an optical measurement technique [J]. *Spine*, 2010, 35(18): E889-894.
- [17] ZOU HB, WU CH, MEHBOD AA, et al. Prediction of health status based on postoperative radiographic variables in adult scoliosis [J]. *Orthop Surg*, 2014, 6(3): 196-202.
- [18] VIDAL C, ILHARREBORDE B, AZOULAY R, et al. Reliability of cervical lordosis and global sagittal spinal balance measurements in adolescent idiopathic scoliosis [J]. *Eur Spine J*, 2013, 22(6): 1362-1367.
- [19] YAGI M, TAKEDA K, MACHIDA M, et al. Discordance of gravity line and C7PL in patient with adult spinal deformity—Factors affecting the occiput-trunk sagittal discordance [J]. *Spine J*, 2015, 15(2): 213-221.
- [20] 张子方, 郑国权, 薛超, 等. 成人脊柱畸形矫形术后早期躯体重心线(W-line)与近端交界区失败的相关性分析[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2022, 32(3): 221-229.
- [21] 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.
- [22] DUBOUSSET J. Three-dimensional analysis of the scoliotic deformity [J]. *Pediatr Spine*, 1994: 479-496.

- [23] LAFAGE V, SCHWAB F, SKALLI W, *et al.* Standing balance and sagittal plane spinal deformity: Analysis of spinopelvic and gravity line parameters[J]. *Spine*, 2008, 33(14): 1572-1578.
- [24] SIEH KM, CHAN YY, HO PY, *et al.* What is the best lateral radiograph positioning technique for assessment of sagittal balance: A biomechanical study on influence of different arm positions[J]. *J Orthop Surg*, 2018, 26(2): 2309499018770932.
- [25] CHO W, WANG W, BUCKLEN B. The role of sagittal alignment in predicting major failure of lumbopelvic instrumentation: A biomechanical validation of lumbopelvic failure classification[J]. *Spine Deform*, 2020, 8(4): 561-568.
- [26] 吴爱悯, 郭振宇, 王向阳. 脊柱生物力学2023年度研究进展[J]. *医用生物力学*, 2024, 39(2): 187-196.  
WU AM, GUO ZY, WANG XY. Research progress of spinal biomechanics in 2023 [J]. *J Med Biomech*, 2024, 39(2): 187-196.
- [27] 赵杰. 脊柱生物力学专栏论著评述[J]. *医用生物力学*, 2023, 38(1): 1-3.  
ZHAO J. Comment on special column of spine biomechanics [J]. *J Med Biomech*, 2023, 38(1): 1-3.
- [28] LE HUEC JC, SADDIKI R, FRANKE J, *et al.* Equilibrium of the human body and the gravity line: The basics[J]. *Eur Spine J*, 2011, 20(Suppl 5): 558-563.
- [29] CHENG X, ZHANG K, SUN X, *et al.* Femoral head retroposition as a potential compensatory mechanism in patients with a severe mismatch between pelvic incidence and lumbar lordosis[J]. *Skeletal Radiol*, 2017, 46(12): 1679-1685.
- [30] SCHLOSSER TP, VINCKEN KL, ROGERS K, *et al.* Natural sagittal spino-pelvic alignment in boys and girls before, at and after the adolescent growth spurt[J]. *Eur Spine J*, 2015, 24(6): 1158-1167.
- [31] ZHOU S, YAN J, DA H, *et al.* A correlational study of scoliosis and trunk balance in adult patients with mandibular deviation [J]. *PLoS One*, 2013, 8(3): e59929.
- [32] MIZUTANI J, STROM R, ABUMI K, *et al.* How cervical reconstruction surgery affects global spinal alignment[J]. *Neurosurgery*, 2019, 84(4): 898-907.
- [33] LEE JK, HYUN SJ, YANG SH, *et al.* Clinical impact and correlations of odontoid parameters following multilevel posterior cervical fusion surgery [J]. *Neurospine*, 2022, 19(4): 912-920.
- [34] XI Z, DUAN PG, MUMMANENI PV, *et al.* Posterior displacement of L1 may be a risk factor for proximal junctional kyphosis after adult spinal deformity correction [J]. *Global Spine J*, 2023, 13(4): 1042-1048.
- [35] AN S, HYUN SJ, LEE JK, *et al.* Postoperative gravity line-hip axis offset as a substantial risk factor for mechanical failure after adult spinal deformity correction surgery [J]. *Neurosurgery*, 2023, 92(5): 998-1005.
- [36] HYUN SJ, AN S, PARK BJ, *et al.* Gravity line-hip axis offset as a guide for global alignment to prevent recurrent proximal junctional kyphosis/failure [J]. *Oper Neurosurg*, 2024, 26(3): 268-278.
- [37] KIM S, HYUN SJ, LEE JK, *et al.* Narrative review of clinical impact of head-hip offset following adult spinal deformity surgery[J]. *J Korean Neurosurg Soc*, 2024, 67(2): 137-145.
- [38] 潘广松, 谢承佳, 覃振党, 等. 腰椎重力线在腰椎间盘突出患者中的变化分析及腰痛影像的相关性研究[J]. *影像技术*, 2021, 33(1): 46-49.