

# 全身骨骼三维建模成像系统检测脊柱矢状位失衡与膝关节参数的相关性

周峰<sup>1</sup>, 符鹏飞<sup>1</sup>, 钱宇帆<sup>1</sup>, 许平成<sup>2</sup>, 郭炯炯<sup>1</sup>, 张磊<sup>1</sup>

<https://doi.org/10.12307/2025.983>

投稿日期: 2024-07-18

采用日期: 2024-11-26

修回日期: 2025-01-21

在线日期: 2025-01-26

中图分类号:

R459.9; R318; R681

文章编号:

2095-4344(2026)03-00596-08

文献标识码: A

## 文章快速阅读: 脊柱矢状位失衡与膝关节参数的相关性

### 研究起点:

- 脊柱矢状位失衡
- 膝关节参数
- 慢性下腰痛
- 髌股关节痛
- 代偿机制
- 骨盆倾斜角

### 研究来源:

- 全身骨骼三维建模成像系统
- 放射学测量
- 美国膝关节协会评分
- Oswestry 功能障碍指数
- 骨盆入射角和腰椎前凸角差值
- 影像学参数

全身骨骼三维建模成像系统

脊柱矢状位失衡

研究中心问题

膝关节参数

慢性疼痛

### 研究分支:

- 脊柱矢状位失衡
- 骨盆入射角和腰椎前凸角差值
- 膝关节参数
- 骨盆倾斜角
- 骨关节生物力学
- 临床症状与影像学参数关联

### 研究去脉:

- 脊柱矢状位失衡与膝关节参数的相关性
- 脊柱-骨盆-下肢排列
- 年龄、性别差异
- 代偿机制
- 脊柱与膝关节功能

## 文题释义:

**全身骨骼三维建模成像系统:** 是一种先进的医学成像系统,用于全身骨骼的三维建模,可以获取全身图像,能够精确评估脊柱、骨盆和下肢的骨骼结构和排列。全身骨骼三维建模成像系统特别适合诊断和评估脊柱侧弯、关节疾病等问题,还能生成三维模型,辅助医生进行术前规划和功能分析。

**脊柱矢状位失衡:** 是指脊柱在侧面上发生异常弯曲或倾斜,导致身体的重心偏移。这种失衡会影响站立和行走的姿势,可能引起背痛或下腰痛,并导致其他部位如骨盆或膝关节出现代偿性问题。

## 摘要

**背景:** 随着人们生活方式的变化和年龄增长,脊柱矢状位失衡成为一种常见的骨科问题,对膝关节和骨盆的功能产生显著影响。了解脊柱矢状位失衡的影响及其代偿机制,对于改善慢性疼痛的临床管理至关重要。

**目的:** 使用全身骨骼三维建模成像系统评估脊柱-骨盆-下肢矢状位排列模式,分析脊柱矢状位失衡与膝关节参数的相关性,并探讨其代偿机制。

**方法:** 纳入2021-01-01/2023-12-31就诊于苏州大学附属第一医院骨科门诊的71例慢性下腰痛或髌股关节痛患者,采用全身骨骼三维建模成像系统进行放射学测量,确定骨盆倾斜角、骨盆入射角、腰椎前凸角、脊柱矢状轴、整体倾斜角、髌-膝-踝角、屈膝角股骨远端外侧角、胫骨近端内侧角。根据SRS-Schwab脊柱畸形分类按骨盆入射角与腰椎前凸角差值(PI-LL)将患者分为正常组(PI-LL < 10°)、代偿组(PI-LL为10°-20°)和失代偿组(PI-LL > 20°),检测各组间放射学参数的差异。对比各组患者美国膝关节协会评分和Oswestry功能障碍指数的差异。根据临床症状将患者分为慢性下腰痛组和无慢性下腰痛组、髌股关节痛组和无髌股关节痛组,分析放射学参数差异与临床症状的关系。

**结果与结论:** ①PI-LL < 20°时,股骨远端外侧角和胫骨近端内侧角趋于稳定;当PI-LL > 20°时,其与股骨远端外侧角和胫骨近端内侧角呈线性相关,随着PI-LL增大,股骨远端外侧角值增大、胫骨近端内侧角值减小;②与正常组相比,代偿组骨盆倾斜角明显增大( $P < 0.01$ ),髌-膝-踝角和屈膝角无明显差异,失代偿组的骨盆倾斜角显著增大( $P < 0.01$ ),髌-膝-踝角和屈膝角显著减小( $P < 0.01$ );与代偿组相比,失代偿组髌-膝-踝角显著减小( $P < 0.05$ ),而骨盆倾斜角和屈膝角无明显差异;③与无髌股关节痛组相比,髌股关节痛患者腰椎前凸角、股骨远端外侧角、胫骨近端内侧角显著减小( $P < 0.05$ ),PI-LL显著增大( $P < 0.05$ );④慢性下腰痛患者放射学参数与无慢性下腰痛患者均有显著差异( $P < 0.05$ );⑤与正常组相比,代偿组和失代偿组的美国膝关节协会评分显著下降、Oswestry功能障碍指数显著升高( $P < 0.05$ );与代偿组相比,失代偿组美国膝关节协会评分显著下降、Oswestry功能障碍指数显著升高( $P < 0.05$ );⑥PI-LL随着年龄增加而变大,女性PI-LL相比男性较高;⑦提示脊柱与下肢在疾病进展和临床症状中具有重要作用;髌股关节痛和慢性下腰痛与脊柱-骨盆-下肢排列稳定有关;此外,高龄和女性患者的脊柱矢状位失衡较为严重。

**关键词:** 全身骨骼三维建模成像系统; 膝关节参数; 脊柱矢状位失衡; 慢性下腰痛; 髌股关节痛

## Correlation between spinal sagittal imbalance and knee joint parameters detected by whole-body EOS imaging

Zhou Feng<sup>1</sup>, Fu Pengfei<sup>1</sup>, Qian Yufan<sup>1</sup>, Xu Pingcheng<sup>2</sup>, Guo Jiongjiang<sup>1</sup>, Zhang Lei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Orthopedics, First Affiliated Hospital of Soochow University, Suzhou 215026, Jiangsu Province, China; <sup>2</sup>Department of Orthopedics, Wujiang Fourth People's Hospital, Suzhou 215200, Jiangsu Province, China

<sup>1</sup>苏州大学附属第一医院骨科, 江苏省苏州市 215026; <sup>2</sup>苏州市吴江区第四人民医院骨科, 江苏省苏州市 215200

**第一作者:** 周峰, 男, 1991年生, 江苏省盱眙县人, 汉族, 2020年上海交通大学毕业, 博士, 主治医师, 主要从事骨与关节退行性疾病方面的研究。

**通讯作者:** 张磊, 苏州大学附属第一医院骨科, 江苏省苏州市 215026

<https://orcid.org/0009-0002-2010-1450> (周峰)

**基金资助:** 苏州市姑苏卫生人才计划(GSWS2022004), 项目负责人: 周峰; 苏州大学苏州医学院临床医学高峰项目(ML12201323),

项目负责人: 周峰

**引用本文:** 周峰, 符鹏飞, 钱宇帆, 许平成, 郭炯炯, 张磊. 全身骨骼三维建模成像系统检测脊柱矢状位失衡与膝关节参数的相关性[J]. 中国组织工程研究, 2026, 30(3):596-603.



Zhou Feng, MD, Attending physician, Department of Orthopedics, First Affiliated Hospital of Soochow University, Suzhou 215026, Jiangsu Province, China  
**Corresponding author:** Zhang Lei, Department of Orthopedics, First Affiliated Hospital of Soochow University, Suzhou 215026, Jiangsu Province, China

## Abstract

**BACKGROUND:** With changing lifestyles and aging, sagittal spinal imbalance has become a common orthopedic issue significantly affecting knee and pelvic function. Understanding the impact of sagittal spinal imbalance and its compensatory mechanisms is crucial for improving the clinical management of chronic pain.

**OBJECTIVE:** To evaluate the alignment of the spine-pelvis-lower extremities using whole-body EOS imaging, analyze the correlation between spinal sagittal imbalance and knee joint parameters, and explore their compensatory mechanisms.

**METHODS:** A total of 71 patients with chronic low back pain or patellofemoral pain who visited Department of Orthopedics, First Affiliated Hospital of Soochow University between January 1, 2021 and December 31, 2023 were included. Radiographic measurements were performed using whole-body EOS to determine pelvic tilt, pelvic incidence, lumbar lordosis, sagittal vertical axis, global tilt, hip-knee-angle, knee flexion angle, lateral distal femoral angle, and medial proximal tibial angle. Patients were classified into normal group (pelvic incidence – lumbar lordosis < 10°), compensated group (10° ≤ pelvic incidence – lumbar lordosis ≤ 20°), and decompensated group (pelvic incidence – lumbar lordosis > 20°) based on the SRS-Schwab spinal deformity classification according to pelvic incidence – lumbar lordosis difference. The differences in radiographic parameters among the groups were analyzed. The differences in American Knee Society Knee Score and Oswestry Disability Index scores were compared among each group. Patients were divided into chronic low back pain group and non-chronic low back pain group, patellofemoral pain group and non-patellofemoral pain group based on clinical symptoms, and the relationship between radiographic parameter differences and clinical symptoms was analyzed.

**RESULTS AND CONCLUSION:** (1) When pelvic incidence – lumbar lordosis was less than 20°, lateral distal femoral angle and medial proximal tibial angle tended to stabilize. When pelvic incidence – lumbar lordosis was greater than 20°, it showed a linear correlation with lateral distal femoral angle and medial proximal tibial angle, with lateral distal femoral angle increasing and medial proximal tibial angle decreasing with increasing pelvic incidence – lumbar lordosis values. (2) Compared with the normal group, the compensated group had significantly increased pelvic tilt ( $P < 0.01$ ), while knee joint parameters hip-knee-angle and knee flexion angle showed no significant differences; the decompensated group showed significant increases in pelvic tilt ( $P < 0.01$ ), and decreases in hip-knee-angle, and knee flexion angle ( $P < 0.01$ ). Compared with the compensated group, the decompensated group showed a significant decrease in hip-knee-angle ( $P < 0.05$ ), but had no significant differences in pelvic tilt and knee flexion angle. (3) Compared with the non-patellofemoral pain group, patients with patellofemoral pain had significant decreases in spinal lumbar lordosis, lateral distal femoral angle, and medial proximal tibial angle ( $P < 0.05$ ) and a significant increase in pelvic incidence – lumbar lordosis ( $P < 0.05$ ). (4) Patients with low back pain had significant differences in radiographic parameters compared with the non-chronic low back pain group ( $P < 0.05$ ). (5) Compared with the normal group, both the compensated and decompensated groups showed a significant decrease in American Knee Society Knee Score scores and a significant increase in Oswestry Disability Index scores ( $P < 0.05$ ). Compared with the compensated group, the decompensated group showed a significant decrease in American Knee Society Knee Score scores and a significant increase in Oswestry Disability Index scores ( $P < 0.05$ ). (6) Pelvic incidence – lumbar lordosis values increased with age and were higher in females compared with males. (7) This study systematically reveals the spine and lower limbs play an important role in disease progression and clinical symptoms. Associated symptoms low back pain and patellofemoral pain are related to the stability of the spine-pelvis-lower extremity alignment. Furthermore, spinal sagittal imbalance is more severe in elderly and female patients.

**Key words:** whole-body EOS imaging; knee joint parameter; spinal sagittal imbalance; chronic low back pain; patellofemoral pain

**Funding:** Suzhou Gusu Health Talent Program, No. GSWS2022004 (to ZF); Clinical Medicine Peak Project of Suzhou Medical College of Soochow University, No. ML12201323 (to ZF)

**How to cite this article:** ZHOU F, FU PF, QIAN YF, XU PC, GUO JJ, ZHANG L. Correlation between spinal sagittal imbalance and knee joint parameters detected by whole-body EOS imaging. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu.* 2026;30(3):596-603.

## 0 引言 Introduction

站立姿势的人体骨骼被认为形成一个“反向钟摆”，平衡链从支撑双脚开始，经过下肢骨骼（脚踝、膝盖、髌关节、骨盆）、脊柱节段，一直延伸到头部，如同钟摆一样，以实现水平视觉和平衡姿势<sup>[1]</sup>。人体工学直立姿势，特别是在矢状面上是通过协调脊柱、骨盆和四肢来保持的<sup>[2-3]</sup>。人类之所以能够站立不动和直立行走，是因为腰椎向前弯曲，伴随上脊柱、前凸颈椎、后凸胸椎以及连接到下肢的正确骨盆位置。然而，脊柱 – 骨盆 – 下肢的对齐失衡、错位可能导致肢体姿势的改变、降低生活质量<sup>[4]</sup>。ITO<sup>[5]</sup>研究了骨质疏松患者脊柱矢状姿势与下肢的关系，发现胸椎后凸是一种原发性畸形，可以通过腰椎、髌关节、髌关节和膝关节来进行补偿，这项研究表明，脊柱和下肢的对齐对于站立平衡至关重要，躯干或小腿的任何病理变化都可能扰乱整体姿势平衡，引起其他部分的代偿性变化。

放射学的新发展，如全身骨骼三维建模成像系统 (whole-body EOS imaging, EOS)，正在推动对无症状人群以及患有脊柱疾病、髌关节和膝关节骨关节炎患者的研究和诊断

取得显著进步<sup>[6-7]</sup>。以往多次曝光的射线已成为一个令人担忧的问题，一些研究表明，有害影响可能与电离辐射有关，特别是对较年轻的患者来说<sup>[8-9]</sup>。全身骨骼三维建模成像系统能够提供全身图像，从而为医生提供关于患者矢状位骨盆排列的详细信息<sup>[10]</sup>，这种技术不仅有助于更好地理解脊柱整体和下肢对齐的情况，还能够提高对患者功能姿势的理解，为制定更精准的治疗方案提供重要依据<sup>[11]</sup>。全身骨骼三维建模成像系统的广泛应用使得医生能够更全面地评估患者的骨骼结构，为个性化治疗和康复提供更加精准的指导<sup>[12-13]</sup>。

脊柱和骨盆的相对位置及其角度变化对下肢力学参数具有显著影响，这种结构的不协调可能导致步态异常，从而增加膝关节的负荷和损伤风险<sup>[14]</sup>，影响这些结构协调性的因素包括年龄、腹围增加和脚部异常（如扁平足），这些因素对下肢力学有显著影响<sup>[15-16]</sup>。此外，放射学参数在评估脊柱、骨盆和下肢结构协调性中扮演着关键角色，这些参数有助于识别潜在的结构问题，并为骨关节炎的早期诊断和治疗提供重要信息。

膝关节疾病会导致关节代偿性屈曲、下肢肌肉疲劳和

疼痛, 从而降低人类健康相关的生活质量<sup>[17]</sup>。此外, 腰痛也严重影响着人们的日常生活。在过去的几十年里, 有研究已经证明了脊柱失衡与包括膝关节和髌关节在内的全身性骨关节炎之间的关联<sup>[18-21]</sup>, 也有研究证实了脊柱失衡与全身性骨关节炎之间的联系<sup>[22-23]</sup>。研究表明, 正常脊柱骨盆参数的改变会导致大腿肌肉疲劳和膝关节屈曲增加, 进而引发慢性下腰痛和髌股关节痛等问题<sup>[24]</sup>。此外, 一些研究还指出, 腰部肌肉疲劳和腰背痛等脊椎症状可能是由退化性膝部疾病引起的。MURATA 等<sup>[22-23]</sup>通过对站立位腰椎进行放射学检查, 评估了腰椎前凸与膝关节退化性变化之间的关系, 他们认为, 膝关节的退化性变化可能与腰椎发生类似变化有关, 这种情况伴随着腰椎前凸的减少, 可能被称为“膝-椎综合征”。

然而, 脊柱畸形所导致的骨盆平移、后倾和屈膝的代偿机制还没有得到充分的评估。鉴于慢性下腰痛和髌股关节痛患者中发现了异常的脊柱-骨盆矢状排列, 并被认为与其发病机制有关<sup>[25-27]</sup>, 作者推测脊柱-骨盆-下肢矢状位的改变可能与膝关节参数改变有关, 并且导致慢性下腰痛, 进而引起下肢肌肉疲劳和膝关节痛。因而, 此次研究调查了有或没有慢性下腰痛、髌股关节痛受试者的静态矢状面排列, 并分组进行比较; 通过分析各组脊柱-骨盆-下肢矢状位的排列模式, 探究脊柱矢状位失衡与膝关节参数的关系, 并探讨其代偿机制。

## 1 对象和方法 Subjects and methods

1.1 设计 成组设计。正态分布变量使用两独立样本 *t* 检验或单因素方差分析, 非正态分布变量使用非参数检验 Mann-Whitney *U* 检验; 使用散点图描述放射学测量之间的关系。

1.2 时间及地点 试验于 2021 年 1 月至 2023 年 12 月在苏州大学附属第一医院骨科完成。

1.3 对象 纳入 2021-01-01/2023-12-31 于苏州大学附属第一医院骨科门诊就诊的 71 例慢性下腰痛或髌股关节痛患者, 男 30 例, 女 41 例; 平均年龄 58.4 岁; 其中慢性下腰痛患者 33 例、无慢性下腰痛患者 38 例; 髌股关节痛患者 37 例、无髌股关节痛患者 34 例。

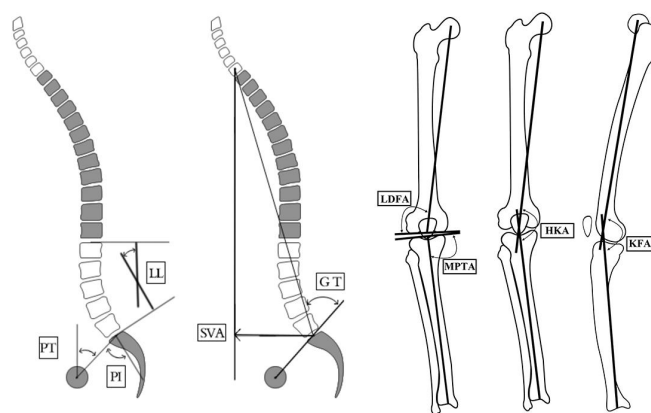
纳入标准: ①年龄 20 岁以上; ②患者均接受了低剂量、站立位全身骨骼三维建模成像系统成像; ③患者对治疗方案知情同意。

排除标准: ①患者存在第一趾外翻、扁平足等下肢畸形; ②存在畸形病理(如肿瘤、感染); ③接受过下肢(如髌关节、膝关节)的关节置换术; ④接受过脊柱手术; ⑤腰椎骶化或骶椎腰化; ⑥腹型肥胖体质量指数  $\geq 25 \text{ kg/m}^2$ ; ⑦有髌股关节或脊柱病史; ⑧半月板损伤及手术史。

此次研究获得苏州大学附属第一医院伦理委员会批准(项目编号: 2023-134), 所有患者均知情同意并签署知情同意书。

### 1.4 方法

1.4.1 放射学图像和数据测量 患者接受全身骨骼三维建模成像系统检测, 测量经典的脊柱骨盆参数包括骨盆倾斜角、骨盆入射角、腰椎前凸角、脊柱矢状轴、整体倾斜角; 测量肢体位置参数包括髌-膝-踝角、屈膝角、股骨远端外侧角、胫骨近端内侧角。3 名经验丰富的骨外科医生进行参数测量, 并计算平均值。脊柱、骨盆和膝关节角度的测量方法如图 1 所示。



图注: PT 为骨盆倾斜角; PI: 骨盆入射角; LL: 腰椎前凸角; SVA: 脊柱矢状轴; GT: 整体倾斜角; LDFA: 股骨远端外侧角; MPTA: 胫骨近端内侧角; HKA: 髌-膝-踝角; KFA: 屈膝角。

图 1 | 全身骨骼三维建模成像系统脊柱、骨盆和膝关节参数测量  
Figure 1 | Measurement of spinal, pelvic, and knee joint parameters using the whole-body EOS imaging

1.4.2 试验分组 根据 SRS-Schwab 经典分型按骨盆入射角和腰椎前凸角差值 (PI-LL) 将受试者分为 3 组: A 组 (正常组,  $PI-LL < 10^\circ$ )、B 组 (代偿组,  $PI-LL$  为  $10^\circ-20^\circ$ ) 和 C 组 (失代偿组,  $PI-LL > 20^\circ$ )<sup>[28-29]</sup>。根据患者年龄将选定的 PI-LL 值细分为 4 个组:  $< 50$  岁、51-60 岁、61-70 岁、 $> 70$  岁。同时根据临床症状将受试者分为髌股关节痛组和无髌股关节痛组、慢性下腰痛组和无慢性下腰痛组。

1.4.3 临床结果统计 对髌股关节痛和慢性下腰痛患者进行问卷调查, 收集美国膝关节协会评分 (American knee society knee score, KSS) 和 Oswestry 功能障碍指数 (Oswestry disability index, ODI) 数据。KSS 评分总分 100 分, 其中疼痛 50 分、稳定性 25 分、活动范围 25 分。ODI 包括疼痛的程度、生活自理能力、提物、行走、坐位、站立、睡眠、性生活、社会生活、旅行状况等几个方面, 计算实际得分和总分的百分比。

1.5 主要观察指标 使用全身骨骼三维建模成像系统评估脊柱-骨盆-下肢排列模式，分析脊柱矢状位失衡与膝关节参数的关联。按 PI-LL 分组比较放射学参数的差异；记录患者 KSS 评分和 ODI 并进行比较；根据临床症状分组，分析放射学参数与临床表现的关系。

1.6 统计学分析 此次研究采用双侧检验，显著性水平设定为  $P < 0.05$ 。统计分析使用 SPSS 26.0 软件 (IBM 公司，美国)，为评估数据的正态性，采用 Kolmogorov-Smirnov 检验，正态分布变量采用  $\bar{x} \pm s$  表示，进行两独立样本  $t$  检验或单因素方差分析。非正态分布数据采用中位数 (四分位差) 表述，进行非参数 Mann-Whitney  $U$  检验。使用散点图描述放射学测量之间的相关性。文章统计学方法已经苏州大学生物统计学专家审核。

## 2 结果 Results

2.1 参与者数量分析 门诊纳入 100 例慢性下腰痛或髌股关节痛患者，10 例患者因髌、膝或脊柱手术被排除，12 例因体质量指数  $\geq 25.0 \text{ kg/m}^2$  被排除，4 例腰椎滑脱患者、2 例退行性腰椎侧弯患者、1 例骨质疏松性椎体骨折患者也被排除。最终纳入 71 例患者。

2.2 试验流程图 见图 2。

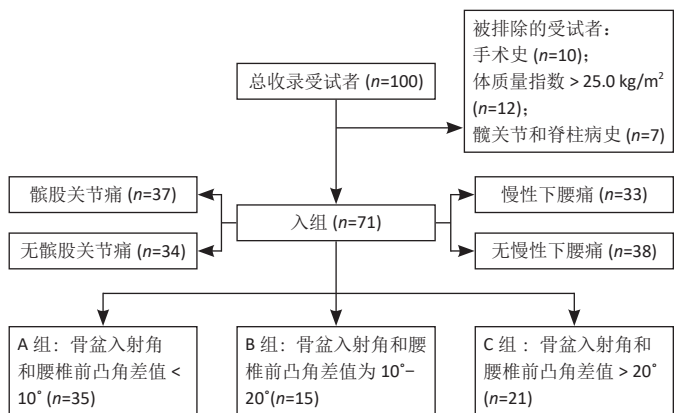


图 2 | 试验流程图

Figure 2 | Flow chart of the trial procedure

2.3 人口统计学和临床特征 各组患者的年龄、性别组成比例见表 1。

2.4 脊柱骨盆参数 表 2 显示了整体和不同性别患者的脊柱-骨盆-下肢参数，结果表明骨盆倾斜角、骨盆入射角、整体倾斜角、髌-膝-踝角、PI-LL 在不同性别组中差异有显著性意义 ( $P < 0.05$ )。

2.5 脊柱矢状位排列的 SRS-Schwab 分级评价 表 3 显示了男性和女性受试者的 SRS-Schwab 分类分布，在整个研究组中，A 组 35 例，B 组 15 例，C 组 21 例。

表 1 | 各组患者人口统计学和临床特征

Table 1 | Demographic and clinical characteristics of patients from each group

组别	n	年龄 (岁)	性别 (男 / 女, n)
按 PI-LL 分组			
A 组 PI-LL < 10°	35	54.7	16/19
B 组 PI-LL 为 10°-20°	15	60.0	8/7
C 组 PI-LL > 20°	21	63.3	5/16
是否有髌股关节痛			
髌股关节痛组	37	61.6	16/21
无髌股关节痛组	34	51.6	14/20
是否有慢性下腰痛			
慢性下腰痛组	33	61.0	13/20
无慢性下腰痛组	38	58.7	17/21

表注: PI-LL 为骨盆入射角和腰椎前凸角差值。

表 2 | 不同性别人群的全身骨骼三维建模成像系统脊柱骨盆参数  
Table 2 | EOS imaging parameters for different gender populations

变量	整体	男性	女性	P 值
脊柱矢状轴 (cm)	2.7(3.4)	2.0(4.6)	3.0(2.7)	0.196
整体倾斜角 (°)	25.0(14.0)	21.5(15.3)	28.0(14.0)	< 0.05
骨盆倾斜角 (°)	25.0(14.0)	20.0(15.3)	28.0(13.5)	< 0.05
骨盆入射角 (°)	54.0(12)	52.5(11.8)	57.0(14.0)	< 0.05
腰椎前凸角 (°)	43.0(18)	45.0(11.8)	41.0(15.5)	0.188
骨盆入射角与腰椎前凸角差值 (°)	10.0(26)	3.0(27.3)	12.0(20.5)	< 0.05
髌-膝-踝角 (°)	177.0(2.0)	178.0(2.3)	177.0(3.0)	< 0.05
屈膝角 (°)	176.0(4.0)	177.0(3.0)	175.0(3.0)	0.080
股骨远端外侧角 (°)	88.0(4.0)	87.5(3.3)	88.0(4.0)	0.107
胫骨近端内侧角 (°)	87.0(6.0)	86.5(3.3)	87.0(7.0)	0.865

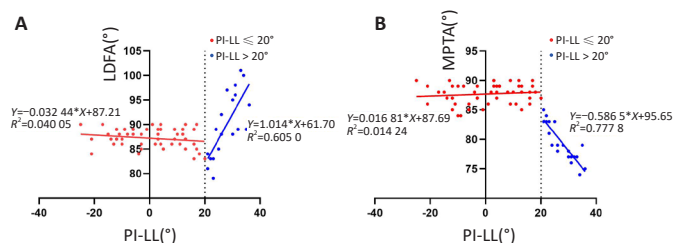
表注: 数据以中位数 (四分位差) 表示。

表 3 | 脊柱矢状位 SRS-Schwab 分级评价的性别分布 [n(%)]  
Table 3 | Distribution of SRS-Schwab classification evaluation in sagittal spine position

组别	整体	男性	女性
A 组	35(49)	16(55)	19(45)
B 组	15(21)	8(28)	7(17)
C 组	21(30)	5(17)	16(38)
整体	71(100)	29(100)	42(100)

表注: 按骨盆入射角和腰椎前凸角差值 (PI-LL) 将受试者分为 3 组: A 组 PI-LL < 10°, B 组 PI-LL 为 10°-20°, C 组 PI-LL > 20°。

2.6 全身骨骼三维建模成像系统放射学参数之间的关系 当 PI-LL < 20° 时，股骨远端外侧角趋于稳定，平均值为 87°；当 PI-LL > 20° 时，与股骨远端外侧角呈线性相关，表现为随着 PI-LL 的增大，股骨远端外侧角也随之增大。当 PI-LL < 20° 时，胫骨近端内侧角趋于稳定；而当 PI-LL > 20° 时，与胫骨近端内侧角呈线性相关，表现为胫骨近端内侧角随着 PI-LL 的增大而减小 (图 3)。



图注: 图 A 为骨盆入射角和腰椎前凸角差值 (PI-LL) 与股骨远端外侧角 (L DFA) 相关性的散点图; B 为 PI-LL 与胫骨近端内侧角 (MPTA) 相关性的散点图。

图 3 | 放射学参数之间的关系

Figure 3 | Relationships between radiological parameters

与 A 组 (正常组) 相比, B 组 (代偿组) 骨盆倾斜角明显增大 ( $P < 0.01$ ), 膝关节参数髌-膝-踝角和屈膝角无明显差异; 而 C 组 (失代偿组) 与 A 组相比骨盆倾斜角显著增大 ( $P < 0.01$ ), 髌-膝-踝角和屈膝角显著减小 ( $P < 0.01$ )。与 B 组相比, C 组骨盆倾斜角和屈膝角无明显变化, 而髌-膝-踝角显著减小 ( $P < 0.05$ )。见图 4。

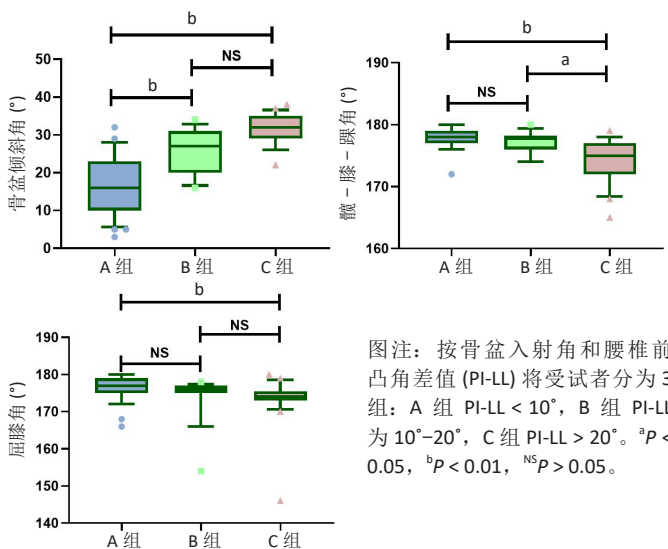


图 4 | 各组患者骨盆倾斜角、髌-膝-踝角和屈膝角的差异性分析  
Figure 4 | Analysis of differences in pelvic tilt, hip-knee-angle, and knee flexion angle among the groups

2.7 有无髌股关节痛或慢性下腰痛患者脊柱矢状位参数和膝关节参数的差异 与无髌股关节痛组相比, 髌股关节痛患者腰椎前凸角、股骨远端外侧角、胫骨近端内侧角显著减小 ( $P < 0.05$ ), PI-LL 显著增大 ( $P < 0.05$ ), 见表 4。慢性下腰痛患者的脊柱矢状位参数和膝关节参数与无慢性下腰痛组相比差异均有显著性意义 ( $P < 0.05$ ), 见表 5。

表 4 | 有无髌股关节痛患者脊柱-骨盆-下肢矢状位排列参数的比较  
Table 4 | Comparison of sagittal alignment parameters of the spine-pelvis-lower extremity in patients with and without patellofemoral pain

参数	髌股关节痛组 (n=37)	无髌股关节痛组 (n=34)	P 值
脊柱矢状轴 (cm)	2.0(4.5)	2.9(2.5)	0.095
整体倾斜角 ( $^\circ$ )	29.0(16.5)	23.0(12.2)	0.348
盆倾斜角 ( $^\circ$ )	27.0(18.5)	21.0(11.3)	0.073
骨盆入射角 ( $^\circ$ )	56.0(19.5)	54.0(9.0)	0.051
腰椎前凸角 ( $^\circ$ )	38.0(15.0)	47.0(15.3)	$< 0.05$
骨盆入射角与腰椎前凸角差值 ( $^\circ$ )	20.0(37.5)	4.0(16.0)	$< 0.05$
髌-膝-踝角 ( $^\circ$ )	177.0(4.0)	177.0(2.0)	0.402
屈膝角 ( $^\circ$ )	176.0(4.0)	176.0(4.0)	0.578
股骨远端外侧角 ( $^\circ$ )	84.0(9.5)	87.0(4.0)	$< 0.05$
胫骨近端内侧角 ( $^\circ$ )	85.0(9.0)	88.0(3.0)	$< 0.05$

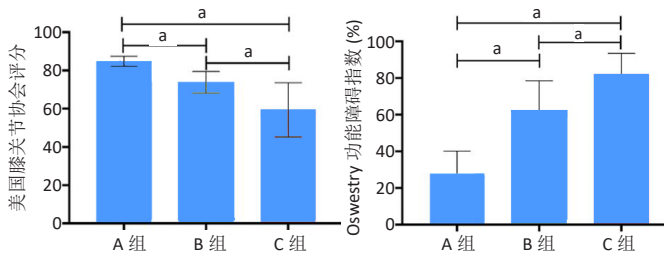
表注: 数据以中位数 (四分位差) 表示。

表 5 | 有无慢性下腰痛患者脊柱-骨盆-下肢矢状位排列参数的比较  
Table 5 | Comparison of sagittal alignment parameters of the spine-pelvis-lower extremity in patients with and without chronic low back pain

参数	慢性下腰痛组 (n=33)	无慢性下腰痛组 (n=38)	P 值
脊柱矢状轴 (cm)	3.2(4.2)	2.0(3.8)	$< 0.05$
整体倾斜角 ( $^\circ$ )	29.0(9.0)	17.0(16.0)	$< 0.05$
盆倾斜角 ( $^\circ$ )	27.0(10.0)	17.5(17.2)	$< 0.05$
骨盆入射角 ( $^\circ$ )	58.0(12.0)	51.5(17.3)	$< 0.05$
腰椎前凸角 ( $^\circ$ )	39.0(11.5)	48.5(21.8)	$< 0.05$
骨盆入射角与腰椎前凸角差值 ( $^\circ$ )	18.0(21.0)	-3.0(25.8)	$< 0.05$
髌-膝-踝角 ( $^\circ$ )	176.0(4.5)	178.0(2.0)	$< 0.05$
屈膝角 ( $^\circ$ )	175.0(4.0)	177.0(3.3)	$< 0.05$
股骨远端外侧角 ( $^\circ$ )	84.0(6.0)	87.0(4.2)	$< 0.05$
胫骨近端内侧角 ( $^\circ$ )	85.0(9.0)	87.0(4.0)	$< 0.05$

表注: 数据以中位数 (四分位差) 表示。

2.8 脊柱矢状位参数对患者 KSS 评分和 ODI 的影响 与 A 组相比, B、C 组的患者 KSS 评分显著下降、ODI 显著升高 ( $P < 0.05$ ); 与 B 组相比, C 组患者 KSS 评分显著下降、ODI 显著升高 ( $P < 0.05$ )。见图 5。



图注: 按骨盆入射角和腰椎前凸角差值 (PI-LL) 将受试者分为 3 组: A 组 PI-LL  $< 10^\circ$ , B 组 PI-LL 为  $10^\circ-20^\circ$ , C 组 PI-LL  $> 20^\circ$ 。<sup>a</sup> $P < 0.05$ 。

图 5 | 各组患者美国膝关节协会评分、Oswestry 功能障碍指数的比较  
Figure 5 | Comparison between American Knee Society Knee Score and Oswestry Disability Index scores among the three groups

2.9 性别和年龄与脊柱矢状面排列的关系 将患者按照性别、年龄大小分成 4 组, 结果发现各组女性患者的 PI-LL 值都高于男性, 提示女性患者脊柱失衡风险更高。此外, 患者年龄越高, PI-LL 值越大, 提示年龄也是脊柱矢状位失衡的可能因素 (图 6)。

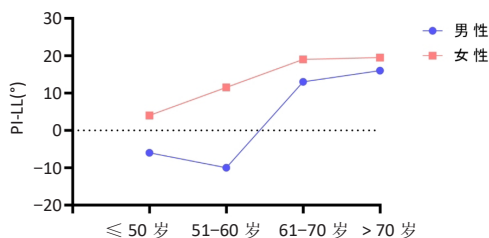


图 6 | 不同年龄段的男、女性患者骨盆入射角和腰椎前凸角差值 (PI-LL) 分布情况

Figure 6 | Distribution of pelvic incidence-lumbar lordosis difference in male and female patients across different age groups

2.10 不良事件 在此次研究过程中,会出现少数不良事件:首先,使用全身骨骼三维建模成像系统进行测量时,尽管辐射剂量较低,但仍有可能引发部分患者短暂不适感;其次,患者在长时间保持特定姿势进行影像测量时,可能会感到肌肉疲劳或不适;在随访过程中,部分患者可能会因反复检查和问诊而产生焦虑、情绪波动或不适,需要及时的心理疏导。研究过程中,团队密切监测这些不良事件,并采取措施及时应对。

### 3 讨论 Discussion

脊柱-骨盆-下肢的矢状位排列会受到脊柱疾病、髋关节骨和膝关节不稳的影响。脊柱矢状失衡常被认为是慢性下腰痛和髋股关节痛的致病因素<sup>[30-31]</sup>,在严重的脊柱畸形中,膝关节屈曲被研究证明是腰椎前凸角减小后的代偿机制<sup>[32]</sup>。在此次研究中,脊柱矢状位失衡与膝关节角度之间存在相关性,相较于正常组,失代偿组表现出更大的骨盆后倾和膝关节屈曲代偿。

从病理学角度对骨盆脊柱的组织与适应性进行生物力学分析,骨盆与脊柱在形态与位置、形态与功能上有很强的相关性,在病理性脊柱后凸的情况下,可以激活不同的机械代偿机制<sup>[26]</sup>。当脊柱保持灵活时,脊柱下方或上方的适当伸展会代偿脊柱后凸;而当脊柱僵硬时,唯一的方法是向后旋转骨盆(后倾)。此机制受骨盆入射角的限制,髋关节伸展是骨盆入射角增高时的限制因素<sup>[33]</sup>。当髋关节伸展超过最大代偿能力时,可能会发生膝关节屈曲。最近,在一项对脊柱畸形患者和全身骨骼三维建模成像系统图像的回顾性研究中,FERRERO等<sup>[34]</sup>研究发现,根据不同的T1脊柱骨盆倾斜度分类的患者在骨盆移位和下肢的代偿机制上有显著的不同,并且强调了奥斯威斯特里残疾指数评分、代偿机制和骨盆移位之间的相关性。

此次研究表明,脊柱矢状位不佳的受试者存在严重的膝关节退行性变,当骨盆向后倾斜时,髋关节伸展到最大限度时,膝关节开始屈曲代偿,这主要是因为矢状不平衡超过骨盆的代偿能力,导致大腿肌肉张力增加。根据ERGÜN等<sup>[35]</sup>提出的理论,腰椎会在腰椎灵活时首先做出反应,而在腰椎僵硬时,骨盆会先做出反应。这有助于解释此次研究中的发现:轻微不稳定的脊柱矢状面排列时,患者可能会通过腰椎来补偿平衡状态,随着骨盆入射角和腰椎前凸角差值增大,老年患者腰椎的有限灵活性可能无法代偿,髋关节将负责这种反应。

慢性下腰痛在成年人中的患病率高达60%-90%,考虑

到椎间盘源性疼痛是慢性下腰痛的主要症状之一,腰椎前凸角降低可能是慢性下腰痛的主要代偿机制<sup>[36]</sup>。总体而言,腰椎前凸的程度随着年龄的增长而降低<sup>[37]</sup>,脊柱矢状面排列的变化可能导致腰椎运动学的变化,进而影响承重、椎间盘退行性变和慢性下腰痛的形成<sup>[38]</sup>。在此次研究中,发现慢性下腰痛症状与脊柱-骨盆矢状位排列和膝关节参数相关。另一方面,作者还证实患有髋股关节痛的受试者脊柱可能会有相应的矢状面变化,表现为脊柱和骨盆前倾、髋关节屈曲。

作者还评估了脊柱放射学参数PI-LL与患者ODI、KSS评分之间的关系,发现ODI随着腰椎畸形程度的增加而增大,进而导致人类健康相关生活质量的下降。另一方面,患者KSS评分随着腰椎畸形程度的增加而降低,其意义为脊柱骨盆畸形程度越大,膝功能越差。

男性和女性在激素水平、生理和生活习惯方面的差异导致脊柱不稳定的患病率不同。在此次研究中,发现女性腰椎畸形的发生率高于男性<sup>[39]</sup>。与同龄男性相比,女性的脊椎和骨盆畸形似乎更为严重。之前的研究表明,亚洲患者的骨盆入角在44.6°-48.2°之间,而美国患者为48°-60.5°,这可能归因于不同的生理结构<sup>[38]</sup>。AMES等<sup>[38]</sup>的研究发现,北美和日本患者在健康相关生活质量测量和放射学参数上存在明显差异,进一步支持了作者的观点。

此次研究结果与其他相关研究存在一些相似点和差异。作者发现脊柱矢状位失衡与膝关节参数之间存在显著关联,特别是在慢性下腰痛和髋股关节痛患者中。然而,作者观察到的代偿机制与一些前人研究有所不同。具体而言,此次研究中的部分患者表现出骨盆后倾和膝关节屈曲的代偿机制,而这种代偿模式与已有文献中的描述存在差异。作者认为,这一差异可能与研究对象的年龄和脊柱活动度有关。此次研究对象中老年患者比例较高,患者的腰椎活动度较差,导致膝关节屈曲代偿能力受限。这一发现不仅强调了此次研究的独特性,也揭示了在不同研究人群特征下脊柱与下肢力学关系的复杂性。这种对比分析有助于深入理解脊柱-下肢相互作用的机制,并为以后的研究提供参考。

DESCHÊNES等<sup>[13]</sup>发现腰椎前凸的丧失与膝关节的退行性改变有关,在他们的研究中,腰椎前凸丧失表现为腰椎前凸角在30°以下患者的膝关节伸展受限较大,这表明严重的脊柱畸形往往影响膝关节伸展。严重膝骨关节炎患者显示更前倾的脊柱和更大的髋关节、膝关节屈曲。腰椎似乎是轻度膝关节屈曲患者矢状位排列障碍的主要补偿来源,而严重屈膝患者则涉及脊柱、骨盆和髋关节代偿,表现为脊柱和骨盆前倾、髋关节屈曲<sup>[40]</sup>,DESCHÊNES等<sup>[13]</sup>将这种现象称为“膝

关节-脊柱综合征”。然而，在此次研究中严重脊柱畸形的受试者表现为骨盆后倾和膝关节屈曲，另外在矢状位脊柱失衡程度不同的受试者间，骨盆倾斜角没有显著差异，不同于以往报道的代偿机制，作者认为这种不一致可能与研究对象的灵活性有关，特别是考虑到老年人群可能存在腰椎灵活性差和膝关节屈曲代偿能力受限的问题；同时，缺乏高级成像评估脊柱、骨盆和膝盖的微小变化可能因为X射线平片或CT会漏掉这些变化，全身骨骼三维建模成像系统提供了关于整体脊柱和下肢对齐的额外信息，有助于更好地理解患者的功能姿势<sup>[11]</sup>。

此次研究存在一些不足之处，包括样本量较少以及分组情况较复杂，这可能导致选择性偏倚的风险；较小的样本量可能影响结果的统计显著性和泛化性，而3组以上的分组增加了比较的复杂性。因此，未来研究应考虑扩大样本量，并优化分组方法，以提高结果的可靠性和应用性。

此次研究通过全身骨骼三维建模成像系统的图像分析，系统揭示了脊柱矢状位失衡与膝关节参数之间的相关性，表明脊柱、骨盆及下肢之间的相互作用在疾病进展和临床症状中具有重要意义。研究结果显示，脊柱矢状位失衡程度与膝关节参数的改变密切相关，尤其在髌股关节痛和慢性下腰痛患者中表现得尤为明显。此外，研究还发现，随着年龄的增长及在女性患者中，脊柱矢状位失衡的问题更加突出。这些发现不仅有助于深入理解脊柱与下肢在骨科疾病中的代偿机制，也为临床治疗提供了新的视角，尤其在针对高龄和女性患者的个体化诊疗中具有重要意义。

**作者贡献：**周峰、符鹏飞负责试验设计、收集数据及撰写论文；钱宇帆、许平成负责结果整理及数据分析；郭炯炯、张磊负责影像学评估及论文修改。

**利益冲突：**文章的全部作者声明，在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

**开放获取声明：**这是一篇开放获取文章，根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享4.0”条款，在合理引用的情况下，允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展，同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献，并为之建立索引，用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

**版权转让：**文章出版前全体作者与编辑组签署了文章版权转让协议。

**出版规范：**该文章撰写遵守了《观察性临床研究报告指南》(STROBE指南)。文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行3次查重。文章经小同行外审专家双盲外审，同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

## 4 参考文献 References

[1] HASEGAWA K, OKAMOTO M, HATSUSHIKANO S, et al. Standing sagittal alignment of the whole axial skeleton with reference to the gravity line in humans. *J Anat.* 2017;230(5):619-630.

[2] LE HUEC JC, SADDIKI R, FRANKE J, et al. Equilibrium of the human body and the gravity line: the basics. *Eur Spine J.* 2011;20 Suppl 5(Suppl 5): 558-563.

[3] IYER S, SHEHA E, FU MC, et al. Sagittal Spinal Alignment in Adult Spinal Deformity: An Overview of Current Concepts and a Critical Analysis Review. *JBJS Rev.* 2018;6(5):e2.

[4] GLASSMAN SD, BRIDWELL K, DIMAR JR, et al. The impact of positive sagittal balance in adult spinal deformity. *Spine (Phila Pa 1976).* 2005; 30(18):2024-2029.

[5] ITOI E. Roentgenographic analysis of posture in spinal osteoporotics. *Spine (Phila Pa 1976).* 1991;16(7):750-756.

[6] CHA E, PARK JH. Spinopelvic Alignment as a Risk Factor for Poor Balance Function in Low Back Pain Patients. *Global Spine J.* 2023;13(8): 2193-2200.

[7] JANG HJ, PARK JY, KUH SU, et al. Comparison of Whole Spine Sagittal Alignment in Patients with Spinal Disease between EOS Imaging System versus Conventional Whole Spine X-ray. *Yonsei Med J.* 2022;63(11): 1027-1034.

[8] The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. *Ann ICRP.* 2007;37(2-4): 1-332.

[9] BRENNER DJ. Estimating cancer risks from pediatric CT: going from the qualitative to the quantitative. *Pediatr Radiol.* 2002;32(4):228-221; discussion 242-224.

[10] PEETERS CMM, BOS G, KEMPEN DHR, et al. Assessment of spine length in scoliosis patients using EOS imaging: a validity and reliability study. *Eur Spine J.* 2022;31(12):3527-3535.

[11] MELHEM E, ASSI A, EL RACHKIDI R, et al. EOS(®) biplanar X-ray imaging: concept, developments, benefits, and limitations. *J Child Orthop.* 2016; 10(1):1-14.

[12] ILLES T, SOMOSKEOY S. The EOS imaging system and its uses in daily orthopaedic practice. *Int Orthop.* 2012;36(7):1325-1331.

[13] DESCHÊNES S, CHARRON G, BEAUDOIN G, et al. Diagnostic imaging of spinal deformities: reducing patients radiation dose with a new slot-scanning X-ray imager. *Spine (Phila Pa 1976).* 2010;35(9):989-994.

[14] SMITH JA, STABBERT H, BAGWELL JJ, et al. Do people with low back pain walk differently? A systematic review and meta-analysis. *J Sport Health Sci.* 2022;11(4):450-465.

[15] HARAGUCHI N. Analysis of Whole Limb Alignment in Ankle Arthritis. *Foot Ankle Clin.* 2022;27(1):1-12.

[16] CHANG JS, KWON YH, KIM CS, et al. Differences of ground reaction forces and kinematics of lower extremity according to landing height between flat and normal feet. *J Back Musculoskeletal Rehabil.* 2012;25(1):21-26.

[17] CROSS M, SMITH E, HOY D, et al. The global burden of hip and knee osteoarthritis: estimates from the global burden of disease 2010 study. *Ann Rheum Dis.* 2014;73(7):1323-1330.

[18] TAUCHI R, IMAGAMA S, MURAMOTO A, et al. Influence of spinal imbalance on knee osteoarthritis in community-living elderly adults. *Nagoya J Med Sci.* 2015;77(3):329-337.

- [19] LEE CS, PARK SJ, CHUNG SS, et al. The effect of simulated knee flexion on sagittal spinal alignment: novel interpretation of spinopelvic alignment. *Eur Spine J.* 2013;22(5):1059-1065.
- [20] BARREY C, ROUSSOULY P, PERRIN G, et al. Sagittal balance disorders in severe degenerative spine. Can we identify the compensatory mechanisms? *Eur Spine J.* 2011;20 Suppl 5(Suppl 5):626-633.
- [21] OBEID I, HAUGER O, AUNOBLE S, et al. Global analysis of sagittal spinal alignment in major deformities: correlation between lack of lumbar lordosis and flexion of the knee. *Eur Spine J.* 2011;20 Suppl 5(Suppl 5): 681-685.
- [22] MURATA Y, TAKAHASHI K, YAMAGATA M, et al. The knee-spine syndrome. Association between lumbar lordosis and extension of the knee. *J Bone Joint Surg Br.* 2003;85(1):95-99.
- [23] WANG WJ, LIU F, ZHU YW, et al. Sagittal alignment of the spine-pelvis-lower extremity axis in patients with severe knee osteoarthritis: A radiographic study. *Bone Joint Res.* 2016;5(5):198-205.
- [24] TSUJII T, MATSUYAMA Y, GOTO M, et al. Knee-spine syndrome: correlation between sacral inclination and patellofemoral joint pain. *J Orthop Sci.* 2002;7(5):519-523.
- [25] CHALÉAT-VALAYER E, MAC-THIONG JM, PAQUET J, et al. Sagittal spinopelvic alignment in chronic low back pain. *Eur Spine J.* 2011;20 Suppl 5(Suppl 5):634-640.
- [26] ROUSSOULY P, PINHEIRO-FRANCO JL. Biomechanical analysis of the spino-pelvic organization and adaptation in pathology. *Eur Spine J.* 2011;20 Suppl 5(Suppl 5):609-618.
- [27] 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. *Spine (Phila Pa 1976).* 1994;19(14): 1611-1618.
- [28] 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. *Spine (Phila Pa 1976).* 2013; 38(19):1663-1671.
- [29] SCHWAB F, UNGAR B, BLONDEL B, et al. Scoliosis Research Society-Schwab adult spinal deformity classification: a validation study. *Spine (Phila Pa 1976).* 2012;37(12):1077-1082.
- [30] KITAGAWA A, YAMAMOTO J, TODA M, et al. Spinopelvic Alignment and Low Back Pain before and after Total Knee Arthroplasty. *Asian Spine J.* 2021;15(1):9-16.
- [31] HIYAMA A, KATOH H, SAKAI D, et al. Effects of preoperative sagittal spinal imbalance on pain after lateral lumbar interbody fusion. *Sci Rep.* 2022;12(1):3001.
- [32] ARAB AM, TALIMKHANI A, KARIMI N, et al. Change in lumbar lordosis during prone lying knee flexion test in subjects with and without low back pain. *Chiropr Man Therap.* 2015;23:18.
- [33] LERCH TD, BOSCHUNG A, SCHMARANZER F, et al. Lower pelvic tilt, lower pelvic incidence, and increased external rotation of the iliac wing in patients with femoroacetabular impingement due to acetabular retroversion compared to hip dysplasia. *Bone Jt Open.* 2021;2(10): 813-824.
- [34] FERRERO E, LIABAUD B, CHALLIER V, et al. Role of pelvic translation and lower-extremity compensation to maintain gravity line position in spinal deformity. *J Neurosurg Spine.* 2016;24(3):436-446.
- [35] ERGÜN T, LAKADAMYALI H, SAHIN MS. The relation between sagittal morphology of the lumbosacral spine and the degree of lumbar intervertebral disc degeneration. *Acta Orthop Traumatol Turc.* 2010; 44(4):293-299.
- [36] GELB DE, LENKE LG, BRIDWELL KH, et al. An analysis of sagittal spinal alignment in 100 asymptomatic middle and older aged volunteers. *Spine (Phila Pa 1976).* 1995;20(12):1351-1358.
- [37] KEOROCHANA G, TAGHAVI CE, LEE KB, et al. Effect of sagittal alignment on kinematic changes and degree of disc degeneration in the lumbar spine: an analysis using positional MRI. *Spine (Phila Pa 1976).* 2011; 36(11):893-898.
- [38] AMES C, GAMMAL I, MATSUMOTO M, et al. Geographic and Ethnic Variations in Radiographic Disability Thresholds: Analysis of North American and Japanese Operative Adult Spinal Deformity Populations. *Neurosurgery.* 2016;78(6):793-801.
- [39] DIEBO BG, SHAH NV, BOACHIE-ADJEI O, et al. Adult spinal deformity. *Lancet.* 2019;394(10193):160-172.
- [40] BREKKE AF, HOLSGAARD-LARSEN A, TORFING T, et al. Increased anterior pelvic tilt in patients with acetabular retroversion compared to the general population: A radiographic and prevalence study. *Radiography (Lond).* 2022;28(2):400-406.

(责任编辑: 关丹, 邱杨, 张楠)