

## 两种类型滑脱的脊柱骨盆矢状位参数与骶骨参数差异及相关性分析

蔡一博<sup>1,2</sup>, 宋凯<sup>1</sup>, 吴兵<sup>1</sup>, 李博<sup>1</sup>, 王兆瀚<sup>1</sup>, 林峰<sup>2</sup>, 韩涛<sup>2</sup>, 刘春妍<sup>2</sup>, 王征<sup>1</sup>

<sup>1</sup>解放军总医院第一医学中心骨科, 北京 100853; <sup>2</sup>解放军总医院海南医院骨科, 海南三亚 572013

**摘要:** **背景** 既往研究发现骶骨参数与脊柱骨盆矢状位参数存在相关性, 而对不同类型滑脱患者骶骨形态参数研究较少。**目的** 分析不同类型滑脱患者脊柱骨盆矢状位参数及骶骨形态参数的特征及其相关性, 探讨其在不同类型滑脱发生机制中的作用。**方法** 回顾性分析2019年1月—2023年12月就诊于解放军总医院第一医学中心的腰椎滑脱患者的脊柱站立位全长片, 选取同期因体格检查就诊的健康成年人作为对照。测量脊柱骨盆矢状位参数, 包括胸椎后凸角(thoracic kyphosis, TK), 腰椎前凸角(lumbar lordosis, LL), 骨盆入射角(pelvic incidence, PI), 骨盆倾斜角(pelvic tilt, PT), 骶骨倾斜角(sacral slope, SS), 矢状面轴向距离(sagittal vertical axis, SVA), 滑脱角(slip angle, SA)。测量骶骨形态参数, 包括骶1-2倾斜角(s1-2 tilt, S1-2T), 骶骨后凸(sacral kyphosis, SK), S5Co1倾斜线水平角(the horizontal angle of S5Co1, S5Co1HA), 比较两组间参数有无差异。组内脊柱骨盆矢状位参数与骶骨参数进行相关性分析, 并建立线性回归方程。**结果** 滑脱组91例, 年龄(61.45±11.56)岁。其中退行性滑脱57例, 男26例, 女31例, 年龄(65.49±8.29)岁; 峡部裂型滑脱34例, 男18例, 女16例, 年龄(54.68±13.13)岁; 对照组35例, 男16例, 女19例, 年龄(64.77±10.47)岁。3组间性别分布差异无统计学意义( $P>0.05$ ), 年龄分布差异有统计学意义( $P<0.01$ )。退行性滑脱组、峡部裂型滑脱组 TK(29.78°±13.71°和30.56°±13.61° vs 38.94°±10.51°)、低于对照组, PI(54.06°±10.99°和56.10°±10.76° vs 49.33°±8.92°)、PT(22.84°±8.68°和21.45°±9.31° vs 12.32°±5.86°)均高于对照组( $P<0.05$ )。退行性滑脱组的LL(40.42°±20.44° vs 49.25°±11.17°)、SS(31.42°±10.59° vs 37.01°±8.11°)低于对照组( $P<0.05$ ), SA显著低于峡部裂型滑脱组( $P<0.05$ )。退行性滑脱组及峡部裂型滑脱组的SK(57.23°±13.29°和56.01°±11.69° vs 50.35°±9.77°)高于对照组( $P<0.05$ ), S5Co1HA(80.70°±9.68°和81.45°±11.56° vs 94.45°±12.02°)低于对照组( $P<0.05$ )。退行性滑脱组的S1-2T(17.09°±7.08° vs 13.15°±9.08°)高于峡部裂型滑脱组( $P<0.05$ )。多元线性回归方程: 退行性滑脱组  $PI=0.383SK-0.753(S1-2T)+44.989(R=0.727)$ , 峡部裂型滑脱组  $PI=0.529SK-0.876(S1-2T)+38.001(R=0.815)$ 。**结论** 退变性与峡部裂型腰椎滑脱患者表现出相似的骶骨形态学改变特征, 包括骶骨后凸角显著增大和S5Co1倾斜线水平角明显减小。这些特征性改变与脊柱-骨盆矢状位失衡存在显著关联, 其中骶骨后凸角与骶1-2倾斜角的组合可有效预测骨盆入射角。研究结果提示, 骶骨形态参数可作为评估腰椎滑脱患者脊柱-骨盆平衡状态的重要补充指标, 这为临床制定个性化治疗方案提供了新的解剖学参考。

**关键词:** 腰椎滑脱; 骶骨形态参数; 脊柱-骨盆矢状位参数; 影像学测量; 骨盆入射角; 成年人

**中图分类号:** R687.3; R681.5; R322.71

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-5227(2025)10-0934-07

**DOI:** 10.12435/j.issn.2095-5227.24110703

**引用本文:** 蔡一博, 宋凯, 吴兵, 等. 两种类型滑脱的脊柱骨盆矢状位参数与骶骨参数差异及相关性分析 [J]. 解放军医学院学报, 2025, 46 (10): 934-940.

## Difference and correlation analysis of spinal pelvic sagittal parameters and sacral parameters between two types of spondylolisthesis

CAI Yibo<sup>1,2</sup>, SONG Kai<sup>1</sup>, WU Bing<sup>1</sup>, LI Bo<sup>1</sup>, WANG Zhaohan<sup>1</sup>, LIN Feng<sup>2</sup>, HAN Tao<sup>2</sup>, LIU Chunyan<sup>2</sup>, WANG Zheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Orthopedic, the First Medical Center, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China; <sup>2</sup>Department of Orthopedics, Hainan Hospital of Chinese PLA General Hospital, Sanya 572013, Hainan Province, China

Corresponding author: WANG Zheng. Email: wangzheng301@163.com

**Abstract: Background** Previous studies have found correlations between sacral parameters and spinal-pelvic sagittal parameters, but there is limited research on the sacral morphology parameters in patients with different types of spondylolistheses. **Objective** To analyze the characteristics and correlations of spinal pelvic sagittal parameters and sacral morphology parameters in patients with different types of spondylolistheses, and explore their roles in the mechanisms of different types of spondylolistheses. **Methods** A retrospective analysis was conducted on the full-length standing spine radiographs of the patients with lumbar spondylolisthesis treated in the Department of Orthopedics of the First Medical Center of PLA General Hospital from January 2019

**收稿日期:** 2024-11-07

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(82372499)

**第一作者:** 蔡一博, 在读硕士, 主治医师。Email: caiyibo301@163.com

**通信作者:** 王征, 博士, 主任医师, 教授, 博士生导师。Email: wangzheng301@163.com

to December 2023, the healthy adults who visited for physical examination during the same period were selected as controls. Spinal-pelvic sagittal parameters were measured, including thoracic kyphosis (TK), lumbar lordosis (LL), pelvic incidence (PI), pelvic tilt (PT), sacral slope (SS), sagittal vertical axis (SVA), and slip angle (SA). Sacral morphological parameters were measured, including S1-2 tilt (S1-2T), sacral kyphosis (SK), and the horizontal angle of S5Co1 (S5Co1HA). Independent sample t-tests were used to compare parameters between groups. Correlation analysis was performed between spinal pelvic sagittal parameters and sacral parameters within groups, and linear regression equations were obtained. **Results** A total of 91 patients with spondylolisthesis were included in the study group, with a mean age of  $(61.45 \pm 11.56)$  years. Among them, 57 patients had degenerative spondylolisthesis (26 males and 31 females, mean age of  $65.49 \pm 8.29$  years), and 34 patients had isthmic spondylolisthesis (18 males and 16 females, mean age of  $54.68 \pm 13.13$  years). The control group included 35 healthy adults (16 males and 19 females, mean age of  $64.77 \pm 10.47$  years). There was no statistical difference in gender distribution among the three groups ( $P > 0.05$ ), while the difference in age distribution was significant ( $P < 0.01$ ). In the degenerative spondylolisthesis group and the isthmic spondylolisthesis group, the TK ( $29.78^\circ \pm 13.71^\circ$  and  $30.56^\circ \pm 13.61^\circ$  vs  $38.94^\circ \pm 10.51^\circ$ ) was lower than those in the healthy control group, PI ( $54.06^\circ \pm 10.99^\circ$  and  $56.10^\circ \pm 10.76^\circ$  vs  $49.33^\circ \pm 8.92^\circ$ ) and PT ( $22.84^\circ \pm 8.68^\circ$  and  $21.45^\circ \pm 9.31^\circ$  vs  $12.32^\circ \pm 5.86^\circ$ ) were all higher than those in the healthy control group ( $P < 0.05$ ). In the degenerative spondylolisthesis group, the LL ( $40.42^\circ \pm 20.44^\circ$  vs  $49.25^\circ \pm 11.17^\circ$ ) and SS ( $31.42^\circ \pm 10.59^\circ$  vs  $37.01^\circ \pm 8.11^\circ$ ) were lower than those in the healthy control group ( $P < 0.05$ ). The SA in the degenerative spondylolisthesis group was significantly lower than that in the isthmic spondylolisthesis group ( $P < 0.05$ ). The SK ( $57.23^\circ \pm 13.29^\circ$  and  $56.01^\circ \pm 11.69^\circ$  vs  $50.35^\circ \pm 9.77^\circ$ ) in both the degenerative spondylolisthesis group and the isthmic spondylolisthesis group was higher than that in the healthy control group ( $P < 0.05$ ), while the S5Co1HA ( $80.70^\circ \pm 9.68^\circ$  and  $81.45^\circ \pm 11.56^\circ$  vs  $94.45^\circ \pm 12.02^\circ$ ) was lower than that in the healthy control group ( $P < 0.05$ ). The S1-2T ( $17.09^\circ \pm 7.08^\circ$  vs  $13.15^\circ \pm 9.08^\circ$ ) in the degenerative spondylolisthesis group was higher than that in the isthmic spondylolisthesis group ( $P < 0.05$ ). The multiple linear regression equation for the degenerative spondylolisthesis group was  $PI = 0.383SK - 0.753(S1-2T) + 44.989$  ( $R = 0.727$ ), and the multiple linear regression equation for the isthmic spondylolisthesis group was  $PI = 0.529SK - 0.876(S1-2T) + 38.001$  ( $R = 0.815$ ). **Conclusion** This study demonstrates that patients with both degenerative and isthmic lumbar spondylolisthesis exhibit similar characteristic changes in sacral morphology, including a significantly increased sacral kyphosis angle and a markedly reduced S5Co1 inclination line horizontal angle. These characteristic alterations show significant correlations with spino-pelvic sagittal imbalance, with the combination of sacral kyphosis angle and S1-2 inclination angle effectively predicting pelvic incidence. The findings suggest that sacral morphological parameters can serve as important complementary indicators for assessing spino-pelvic balance in patients with lumbar spondylolisthesis, providing new anatomical basis for developing personalized treatment strategies in clinical practice.

**Keywords:** sacrum morphology parameters; lumbar spondylolisthesis; spinal-pelvic sagittal parameters; radiographic measurements; pelvic incidence; adult

**Cited as:** Cai YB, Song K, Wu B, et al. Difference and correlation analysis of spinal pelvic sagittal parameters and sacral parameters between two types of spondylolisthesis[J]. Acad J Chin PLA Med Sch, 2025, 46(10): 934-940.

腰椎滑脱在人群中的患病率约为6%，由此带来的下腰痛及神经根压迫症状严重影响生活质量。1976年，Wiltse等<sup>[1]</sup>根据病因将腰椎滑脱分为5个主要类别：发育不良型、峡部裂型、退行性、创伤性和病理性。其中以峡部裂型和退行性滑脱最为常见。随着外科技术的不断发展，对腰椎滑脱研究的关注点从局部解剖逐渐发展到整体矢状位平衡<sup>[1-5]</sup>。滑脱的发生使得脊柱和骨盆的整体对位情况发生变化，一旦超过骨盆代偿时则会出现矢状位的失平衡。既往研究发现在正常人群中骶骨形态参数与脊柱矢状位参数存在相关性，然而对不同滑脱类型的骶骨形态参数了解较少。本研究旨在通过对比分析退行性与峡部裂型腰椎滑脱患者及健康人群的影像学参数，探讨两类滑脱患者的骶骨形态与脊柱-骨盆矢状位参数的特征性改变，并深入探究其内在相关性，以期揭示不同滑脱类型的内在机制及临床精准诊疗提供影像学依据。

## 1 对象和方法

### 1.1 研究对象

收集解放军总医院第一医学中心2019年1月—2023年12月就诊的腰椎滑脱患者为研究对象。纳入标准：(1)明确诊断为退行性腰椎滑脱或峡部裂型滑脱并伴有腰腿痛症状；(2)具有完整的影像学资料并且清晰可辨认。排除标准：(1)伴有脊柱肿瘤、脊柱骨折、脊柱畸形等其他疾病；(2)既往因脊柱相关疾病行手术治疗；(3)发育不良型、创伤性、病理性腰椎滑脱；(4)多节段腰椎滑脱。

选取同期在解放军总医院第一医学中心健康体检的35例健康成人作为对照组。纳入标准：(1)脊柱站立位全长片影像无异常；(2)无脊柱肿瘤、脊柱骨折、脊柱畸形等其他疾病；(3)年龄为45~80岁。排除标准：(1)脊柱手术史；(2)下肢关节手术史。

本研究经解放军总医院第一医学中心医学伦理委员会批准(批号：2023-446-02)。

## 1.2 影像学参数测量

所有患者均拍摄脊柱站立位全长片，测量软件采用 Surgimap Spine(Nemaris Inc., New York)。测量工作由一名脊柱外科医师完成，测量2次，间隔1周后再次测量，取平均值。测量的参数包括两类。

**1.2.1 脊柱-骨盆参数** (1)胸椎后凸角(thoracic kyphosis, TK): 胸5椎体上终板切线与胸12椎体下终板切线的夹角；(2)腰椎前凸角(lumbar lordosis, LL): 腰1椎体上终板的切线与骶1椎体上终板的切线的夹角；(3)骨盆入射角(pelvic incidence, PI): 髋轴中点与骶骨平台中点连线与骶骨平台中垂线的夹角；(4)骨盆倾斜角(pelvic tilt, PT): 髋轴中点与骶骨平台中点连线和铅垂线的夹角；(5)骶骨倾斜角(sacral slope, SS): 骶骨平台与水平线的夹角；(6)矢状面轴向距离(sagittal vertical axis, SVA): C7铅垂线与S1后上角垂线之间的水平距离；(7)滑脱角(slip angle, SA): 滑脱椎体下缘与尾端椎体上缘的夹角。

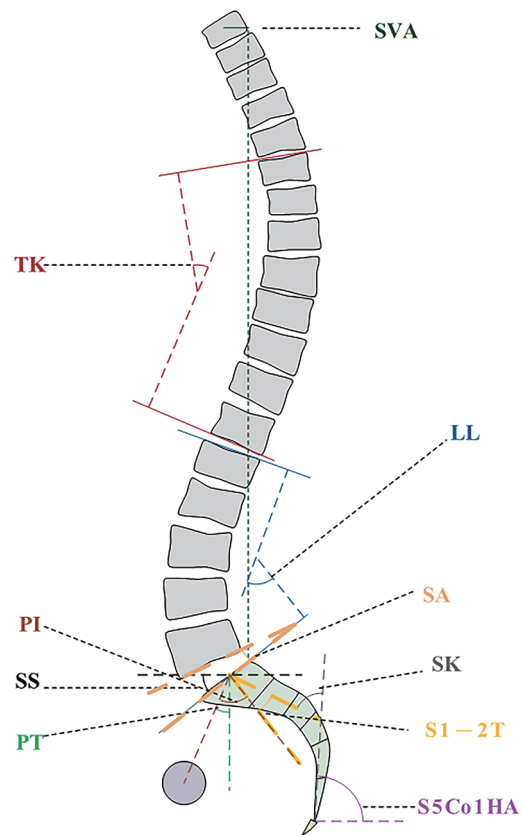
**1.2.2 骶骨参数** (1)骶1-2倾斜角(S1-2 tilt, S1-2T): Ferguson法标记S1-2的倾斜线，测量其于与S1终板垂线的夹角；(2)骶骨后凸(sacral kyphosis, SK): S1-2倾斜线与骶5尾1(S5Co1)倾斜线的夹角；(3)S5Co1倾斜线水平角(the horizontal angle of S5Co1, S5Co1HA): S5Co1倾斜线与水平线夹角。见图1。

## 1.3 分组及研究方法

根据Wiltse分型将滑脱患者分为退行性滑脱组和峡部裂型滑脱组，比较退行性滑脱组、峡部裂型滑脱组和对照组脊柱-骨盆矢状位参数、骶骨形态参数的差异，观察各组内脊柱-骨盆矢状位参数与骶骨形态参数是否存在相关性。

## 1.4 统计学分析

采用SPSS 26.0软件进行统计分析。计数资料采用 $\chi^2$ 检验，符合正态分布的计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示，多组间参数比较采用单因素方差分析；部分偏态资料以中位数 $M(IQR)$ 表示，两组比较采用Wilcoxon秩检验。组内骶骨参数与脊柱骨盆参数的相关关系采用Pearson检验，并对部分显著指标建立线性回归方程以量化解析其相关关系。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。



SVA: 矢状面轴向距离; TK: 胸椎后凸角; LL: 腰椎前凸角; SA: 滑脱角; PI: 骨盆入射角; SS: 骶骨倾斜角; PT: 骨盆倾斜角; SK: 骶骨后凸; S1-2T(S1-2 Tilt): 骶1-2倾斜角; S5Co1HA: 骶5尾1倾斜线水平角。

图1 脊柱-骨盆影像学矢状位参数和骶骨参数的测量

Fig. 1 Measurement of spino-pelvic sagittal parameters and sacral parameters

## 2 结果

### 2.1 三组基线资料比较

滑脱组91例，年龄(61.45±11.56)岁。其中退行性滑脱57例，男26例，女31例，年龄(65.49±8.29)岁。峡部裂性滑脱34例，男18例，女16例，年龄(54.68±13.13)岁。Meyerding分型分为：I度滑脱64例，II度滑脱24例，III度滑脱1例，IV度滑脱2例。对照组35例，男16例，女19例，年龄(64.77±10.47)岁。三组间性别分布无统计学差异( $P > 0.05$ )，年龄分布存在统计学差异( $P < 0.01$ )。见表1。

### 2.2 三组脊柱-骨盆矢状位参数比较

退行性滑脱组、峡部裂型滑脱组TK(29.78°±13.71°、30.56°±13.61°)低于对照组、PI(54.06°±

10.99°、56.10°±10.76°)、PT(22.84°±8.68°、21.45°±9.31°)均高于对照组。退行性滑脱组的LL(40.42°±20.44°)、SS(31.42°±10.59°)低于对照组。退行性滑脱组SA(5.70°±4.95°)明显低于峡部裂型滑脱组( $P$ 均<0.05)。见表1。

### 2.3 三组骶骨参数比较

退行性滑脱组及峡部裂型滑脱组的SK(57.23°±13.29°及56.01°±11.69°)高于对照组,S5Co1HA(80.70°±9.68°及81.45°±11.56°)低于对照组。峡部裂滑脱组的S1-2T(13.15°±9.08°)显著低于退行性滑脱组( $P$ 均<0.05)。见表1。

### 2.4 两滑脱组脊柱-骨盆矢状位参数与骶骨参数的相关性

经Pearson相关分析,各组内骶骨参数(SK、S1-2T)与矢状位参数(PI)有较好相关性( $P$ 均<0.05),见表2。进一步行多元线性回归,建立内脊柱-骨盆矢状位参数(PI)与骶骨参数(SK、S1-2T)的线性回归模型(方程):退行性滑脱组 $PI=0.383 \times SK-0.753 \times (S1-2T)+44.989(R=0.727)$ ,峡部裂型滑脱组 $PI=0.529 \times SK-0.876 \times (S1-2T)+38.001(R=0.815)$ 。见表3。

## 3 讨论

随着对脊柱整体平衡认识的不断加深,脊柱骨盆矢状位形态在腰椎滑脱的治疗过程中逐渐得到重视<sup>[6-9]</sup>。Roussouly等<sup>[10]</sup>提出通过外科手术矫正可以改善腰椎滑脱患者的脊柱平衡状态。Elmorsy等<sup>[11]</sup>进行了一项纳入40例低中等级退行性或峡部裂型滑脱患者的前瞻性研究,结果显示通过手术

恢复正常的矢状位平衡参数可以获得更好的临床结果。因此了解腰椎滑脱的脊柱骨盆参数特征对于外科医师十分重要,本研究发现腰椎滑脱患者的脊柱-骨盆矢状位形态以及骶骨形态与健康人群存在差异。滑脱患者的TK、S5Co1HA显著低于对照组,PI、PT、SK显著高于对照组。退行性滑脱组的LL、SS低于对照组。在两组滑脱患者之间。退行性滑脱组的SA低于峡部裂滑脱组、S1-2T高于峡部裂滑脱组。

Whitesides等<sup>[12]</sup>发现,患有峡部裂型滑脱的成人PI平均为64.5°,显著高于正常青少年的41.8°。Duval-Beaupere等<sup>[13]</sup>也发现PI在峡部裂型滑脱发生机制中起着重要作用。Funao等<sup>[14]</sup>通过对比退行性滑脱与单纯腰椎管狭窄患者的矢状位参数发现退行性滑脱患者具有更大的PI,并且与滑脱程度呈正相关。在本研究中,退行性滑脱及峡部裂型滑脱患者的PI分别为54.06°±10.99°和56.10°±10.76°,显著大于正常人群PI值,并且两种类型滑脱患者的PI值无明显差异,提示两组滑脱患者具有相似的骨盆形态。尽管滑脱组与对照组年龄存在显著差异,但既往研究已经证明成年后PI不会发生改变。Fredrickson等<sup>[15]</sup>比较在不同个体的矢状位参数,PI增大时SS的增加明显超过了PT,较大的PI使得骶骨上终板倾斜角度增大<sup>[16]</sup>,腰椎向前下方的剪切力增大,脊柱后方结构及椎间盘受力增加<sup>[17]</sup>,关节囊和韧带随着年龄的增长而逐渐变得松弛,这反过来又导致关节突关节对前方剪切力的抵抗力大幅下降,由此增大了腰椎滑脱的风险<sup>[18]</sup>。这可能是腰椎滑脱发生机制的一种解释。

表1 三组基线信息及影像学参数

Tab. 1 Radiological parameters and baseline data of the three groups

| 变量                       | 指标                            | 退行性滑脱组(n=57)             | 峡部裂型滑脱组(n=34)            | 对照组(n=35)   | $\chi^2/F/Z$ 值 | $P$ 值  |
|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|----------------|--------|
| 基线资料                     | 性别(男/女)/例                     | 26/31                    | 18/16                    | 16/19       | 0.529          | 0.768  |
|                          | 年龄/(岁, $\bar{x} \pm s$ )      | 65.49±8.29 <sup>b</sup>  | 54.68±13.13 <sup>a</sup> | 64.77±10.47 | 12.83          | <0.001 |
|                          | TK/(°, $\bar{x} \pm s$ )      | 29.78±13.71 <sup>a</sup> | 30.56±13.61 <sup>a</sup> | 38.94±10.51 | 6.143          | 0.003  |
| 影像学参数之<br>脊柱-骨盆矢状<br>位参数 | LL/(°, $\bar{x} \pm s$ )      | 40.42±20.44 <sup>a</sup> | 45.02±16.14              | 49.25±11.17 | 2.936          | 0.057  |
|                          | PI/(°, $\bar{x} \pm s$ )      | 54.06±10.99 <sup>a</sup> | 56.10±10.76 <sup>a</sup> | 49.33±8.92  | 3.929          | 0.022  |
|                          | PT/(°, $\bar{x} \pm s$ )      | 22.84±8.68 <sup>a</sup>  | 21.45±9.31 <sup>a</sup>  | 12.32±5.86  | 19.169         | <0.001 |
|                          | SS/(°, $\bar{x} \pm s$ )      | 31.42±10.59 <sup>a</sup> | 34.36±11.23              | 37.01±8.11  | 3.369          | 0.038  |
|                          | SVA/[mm, $M(IQR)$ ]           | 38(15, 142)              | 25(12, 130)              | -           | 1.105          | 0.269  |
|                          | SA/[°, $M(IQR)$ ]             | 5(3, 16) <sup>b</sup>    | 9(5, 25)                 | -           | 2.961          | 0.003  |
| 影像学参数之<br>骶骨参数           | S1-2T/(°, $\bar{x} \pm s$ )   | 17.09±7.08 <sup>b</sup>  | 13.15±9.08 <sup>a</sup>  | 17.79±6.35  | 4.008          | 0.021  |
|                          | SK/(°, $\bar{x} \pm s$ )      | 57.23±13.29 <sup>a</sup> | 56.01±11.69 <sup>a</sup> | 50.35±9.77  | 3.751          | 0.026  |
|                          | S5Co1HA/(°, $\bar{x} \pm s$ ) | 80.70±9.68 <sup>a</sup>  | 81.45±11.56 <sup>a</sup> | 94.45±12.02 | 19.404         | <0.001 |

<sup>a</sup> $P$ <0.05, vs 对照组; <sup>b</sup> $P$ <0.05, vs 峡部裂型滑脱组。

表2 退行性和峡部裂型腰椎滑脱以及对照组脊柱骨盆参数与骶骨参数的相关系数(*r*)

Tab. 2 Correlation coefficient of spinal pelvic parameters and sacral parameters in degenerative and isthmic spondylolisthesis and the control groups (*r*)

| 组别      | 指标    | TK    | LL                 | PI                 | SS                 |
|---------|-------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 退行性滑脱组  | SK    | 0.149 | 0.298 <sup>a</sup> | 0.548 <sup>a</sup> | 0.493 <sup>a</sup> |
|         | S1-2T | 0.096 | 0.208              | 0.567 <sup>a</sup> | 0.319 <sup>a</sup> |
| 峡部裂型滑脱组 | SK    | 0.159 | 0.051              | 0.390 <sup>a</sup> | 0.080              |
|         | S1-2T | 0.304 | 0.499 <sup>a</sup> | 0.595 <sup>a</sup> | 0.560 <sup>a</sup> |

显著性标记<sup>a</sup>*P*<0.05。

表3 各组内脊柱骨盆矢状位参数与骶骨参数多元线性回归分析

Tab. 3 Multiple linear regression analysis of sagittal spinal and pelvic parameters within each group with sacral parameters

| 组别      | 指标    | <i>B</i> | 标准误   | <i>t</i> 值 | <i>P</i> 值 | 容差    | <i>VIF</i> |
|---------|-------|----------|-------|------------|------------|-------|------------|
| 退行性滑脱组  | SK    | 0.383    | 0.079 | 4.878      | <0.001     | 0.969 | 1.032      |
|         | S1-2T | -0.753   | 0.147 | -5.114     | <0.001     | 0.969 | 1.032      |
| 峡部裂型滑脱组 | SK    | 0.529    | 0.099 | 5.340      | <0.001     | 0.938 | 1.066      |
|         | S1-2T | -0.876   | 0.127 | -6.868     | <0.001     | 0.938 | 1.066      |

除此之外本研究发现两组滑脱患者的TK小于对照组，PT值显著大于对照组，退行性滑脱组SS与LL显著小于对照组。在正常人群中，PT的波动范围较窄，PI增大时SS的变化较PT更为显著。然而本研究中滑脱患者具有较大的PI，但SS却没有随之增大，并且在退行性滑脱患者中SS显著小于对照组，这表明在退行性滑脱和峡部裂型滑脱患者中，调动了骨盆的代偿机制。在滑脱发生后，上位椎体相对前移，矢状面整体重心前移，骨盆作为矢状面平衡最重要的调节器，通过其后倾，PT增大，SS减小进一步维持矢状面平衡<sup>[1]</sup>。在Roussouly对人群脊柱骨盆矢状位分型中，PI较大对应较大的TK和LL。本研究中两组滑脱患者TK显著小于对照组，提示为维持脊柱矢状面平衡，减少重心前倾，胸椎后凸代偿性减小。同时LL小于对照组，提示在腰椎滑脱发生过程中，LL为适应骨盆的后倾，同样发生了代偿性变化。

本研究中SA在退行性滑脱和峡部裂型滑脱患者之间存在统计学差异。退行性腰椎滑脱患者椎间盘退变更加显著，椎间隙高度明显下降。椎间盘前缘高度的丢失会使退变节段的腰前凸角减小，同时滑脱的发生会使SA进一步减小。而峡部裂型滑脱没有了后方结构的限制，在滑脱发生后，局部SA角度增大，以维持正常的矢状面平衡。这可能是退行性滑脱SA小于峡部裂型滑脱的原因之一。SA角

度在维持下腰椎区域性前凸和矢状位整体平衡有重要作用。Lee等<sup>[19]</sup>在一项研究中发现，腰椎融合术后SA减小的患者较SA增加的患者矢状面恶化的风险更高，这提示我们在对退行性滑脱患者制订手术方案时应更加注意对SA角度的纠正，维持下腰椎的局部前凸，以获得更好的手术效果<sup>[20]</sup>。

骶骨作为脊柱最下方的延续，同时也是骨盆的重要组成部分。骨盆的前倾与后倾通过骶骨向上传递，调节人体的矢状位形态。腰椎滑脱的实质为下腰椎与骶骨之间的解剖异常<sup>[21]</sup>，从而发生整体矢状位对线变化。既往研究观察到了骶骨形态在腰椎滑脱发生发展中的作用<sup>[22]</sup>。有研究认为，STA较小的人群中峡部裂型滑脱患病率更高<sup>[12]</sup>。Zeliha<sup>[23]</sup>在退行性滑脱患者中发现了相同的表现，认为较小的STA增加了滑脱的倾向。然而Kazuhiro等<sup>[24]</sup>发现晚期峡部裂型滑脱患者的STA偏低，而在早期和进展期峡部裂型滑脱患者中并未观察到相同的特征，推测较低的STA来自滑脱发生后剪切力对骶骨终板的重塑。Wang等<sup>[25]</sup>在一项纳入131例发育性滑脱症患者的研究中发现，滑脱患者的STA显著低于对照组，并且在两组人群中STA与PI都存在相关性，同时还发现了滑脱患者具有更大的SK，推测SK较高是椎体滑移的易感因素。Hresko等<sup>[21]</sup>的研究中发现滑脱患者的S1-S2和S2-S3之间的后凸角度更大。可见骶骨形态与滑脱的发生发展存在相关性。宋凯等<sup>[26]</sup>在正常成年人群中发现骶骨形态与脊柱骨盆矢状位形态存在显著相关性，并提出了一系列新的骶骨形态参数。在本研究中，对退行性滑脱及峡部裂型滑脱患者的骶骨形态进行了比较分析，发现退行性滑脱和峡部裂型滑脱患者的SK分别为57.23°±13.29°和56.01°±11.69°，显著大于正常人群的50.35°±9.77°，具有统计学差异，而两组滑脱患者的SK无明显差异。既往研究证明，不仅是胸椎及腰椎的曲度，骶骨曲度的形成也与人类直立行走有明显的关联，并且骶骨曲度与腰椎前凸有一定相关性<sup>[27]</sup>。通过研究青少年骶骨形态的特征发现，在发育期SK与LL之间也存在相关性，而PI与LL无显著相关性<sup>[28]</sup>。因此可以推测滑脱患者具有较大的SK，对应较大的LL，造成下腰部受力增加，可能是腰椎滑脱发生的因素之一。S5Co1HA是一个位置参数<sup>[26]</sup>，在两组滑脱患者中的S5Co1HA值都显著减小，提示骨盆发生了明显的后旋代偿。

峡部裂型滑脱组的S1-2T小于退行性滑脱组和

对照组。与SS不同的是，S1-2T是一个解剖参数，S1-2T越小代表骶1上终板相对更加垂直于地面。在峡部裂型滑脱中，骶骨参数的特征是SK较大，而S1-2T较小，即代表较为弯曲的脊柱形态以及高耸的骶骨后上角。由此在脊柱伸展时，后方关节突关节会受到L4及S1关节突的钳夹和撞击。这是对峡部裂型滑脱发生的一种推测。

既往研究证明了在正常人群中骶骨参数与脊柱骨盆矢状位参数之间存在的相关性<sup>[26]</sup>。本研究在滑脱患者中也发现了这种规律。在滑脱患者中SK与S1-2T两个骶骨形态参数与PI均有相关性，通过多元线性回归分析，在退行性滑脱组 $PI=0.383SK-0.753(S1-2T)+44.989(R=0.727)$ ，峡部裂型滑脱组 $PI=0.529SK-0.876(S1-2T)+38.001(R=0.815)$ 。骶骨矢状面形态是每个人体特有的解剖变量，在成年后不易发生改变<sup>[21]</sup>。骨盆入射角作为脊柱矢状位形态测量的经典参数，在评估脊柱平衡、手术方案制订方面具有重要意义。本研究发现了骶骨参数与骨盆入射角的相关性，可在股骨头或髌臼无法良好识别时作为一种补充测量方法，通过上述方程进行预测PI等参数，可以帮助临床医师制定更精确的治疗计划，提高手术成功率，改善患者的长期预后<sup>[29-31]</sup>。

本研究存在一定的局限性。首先，由于峡部裂型滑脱患者发病年龄小于退行性滑脱患者，所选观察对象年龄不在同一基线水平，不能排除年龄因素对研究结果造成影响。其次，所纳入对象中大部分为低度滑脱患者，可能形成选择偏倚，对骶骨形态与滑脱程度的相关性有待进一步分析。

综上所述，在腰椎滑脱患者与正常人群之间，骶骨形态与脊柱骨盆矢状位参数存在显著差异，除SA，S1-2T外，在退行性滑脱与峡部裂型滑脱之间未观察到显著差异。滑脱患者的骶骨形态参数与脊柱骨盆矢状位参数存在相关性，可以通过骶骨形态参数预测评估骨盆入射角，为临床提供参考。

**作者贡献** 蔡一博：论文构思与设计，文献检索，撰写论文；宋凯，吴兵，李博，王兆瀚：提出研究思路，文献检索，设计方案；林峰，韩涛，刘春妍：修订初稿；王征：论文的质量控制及审校，对论文整体负责。

**利益冲突** 所有作者声明无利益冲突。

**数据共享声明** 同意在文章出版后共享研究中收集的所有去标识化个体数据以及研究方案、

统计分析计划、知情同意书、临床研究报告和统计代码，联系方式Email: caiyibo301@163.com。

#### 参考文献

- 1 Diebo BG, Balmaceno-Criss M, Lafage R, et al. Sagittal alignment in the degenerative lumbar spine: surgical planning [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2024, 106 (5): 445-457.
- 2 Amritanand R, Arockiaraj J, David KS, et al. Does the surgical reduction of high grade spondylolisthesis restore spinopelvic alignment? an analysis of 35 patients [J]. *Asian Spine J*, 2021, 15 (5): 596-603.
- 3 Zhang GZ, Deng YJ, He XG, et al. Different types of double-level degenerative lumbar spondylolisthesis: what is different in the sagittal plane? [J]. *World Neurosurg*, 2021, 150: e127-e134.
- 4 Zhou QS, Sun X, Chen X, et al. How does sagittal spinopelvic alignment of lumbar multisegmental spondylolysis differ from monosegmental spondylolysis? [J]. *J Neurosurg Spine*, 2020, 33 (2): 211-218.
- 5 陈斌彬, 毛克亚, 韩振川, 等. 微创经椎间孔腰椎植骨融合术与开放后路腰椎植骨融合术治疗腰椎滑脱症的疗效比较 [J]. *解放军医学院学报*, 2019, 40 (2): 101-105.
- 6 Wang DF, Chen XL, Han D, et al. Radiographic predictors of reaching minimal clinically important difference following lumbar fusion surgery in patients with degenerative lumbar spondylolisthesis [J]. *Eur Spine J*, 2024, 33 (5): 1786-1795.
- 7 Joelson A. Surgery for spinal stenosis with degenerative spondylolisthesis [J]. *BMJ*, 2024, 386: q1628.
- 8 Thornley P, Meade MH, Oitment C, et al. Sagittal alignment in operative degenerative lumbar spondylolisthesis: a scoping review [J]. *J Spine Surg*, 2023, 9 (3): 314-322.
- 9 任博文, 韩振川, 吴剑慧, 等. 腰椎椎间融合影像学评价方法的研究进展 [J]. *解放军医学院学报*, 2022, 43 (8): 901-906.
- 10 Roussouly P, Pinheiro-Franco JL. Biomechanical analysis of the spino-pelvic organization and adaptation in pathology [J]. *Eur Spine J*, 2011, 20 (Suppl 5): 609-618.
- 11 Elmorsy SEH, Abulnaser HA, Hassan Y, et al. Functional outcome of surgical management of low mid-grade lumbar spondylolisthesis when considering the sagittal balance parameters preoperatively: a prospective study [J]. *Chin Neurosurg J*, 2022, 8 (1): 35.
- 12 Whitesides TE Jr, Horton WC, Hutton WC, et al. Spondylolytic spondylolisthesis: a study of pelvic and lumbosacral parameters of possible etiologic effect in two genetically and geographically distinct groups with high occurrence [J]. *Spine*, 2005, 30 (6 Suppl): S12-S21.
- 13 Legaye J, Duval-Beaupère G, Hecquet J, et al. Pelvic incidence: a fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves [J]. *Eur Spine J*, 1998, 7 (2): 99-103.
- 14 Funao H, Tsuji T, Hosogane N, et al. Comparative study of spinopelvic sagittal alignment between patients with and without degenerative spondylolisthesis [J]. *Eur Spine J*, 2012, 21 (11): 2181-2187.
- 15 Fredrickson BE, Baker D, McHolick WJ, et al. The natural history of spondylolysis and spondylolisthesis [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1984, 66 (5): 699-707.
- 16 Hey HWD, Low TL, Soh HL, et al. Prevalence and risk factors of degenerative spondylolisthesis and retrolisthesis in the thoracolumbar and lumbar spine - an EOS study using updated radiographic parameters [J]. *Global Spine J*, 2024, 14 (4):

- 1137-1147.
- 17 Labbus K, Bürger J, Löchel J, et al. Impact of individual spinopelvic anatomy on the localization and severity of symptomatic isthmic spondylolisthesis [J]. *Global Spine J*, 2024, 14 (8): 2311-2316.
  - 18 Katz JN, Zimmerman ZE, Mass H, et al. Diagnosis and management of lumbar spinal stenosis: a review [J]. *JAMA*, 2022, 327 (17): 1688-1699.
  - 19 Lee HR, Cho JH, Lee DH, et al. Risk factors for the aggravation of sagittal balance after L5-S1 posterior lumbar interbody fusion [J]. *World Neurosurg*, 2023, 175: e653-e661.
  - 20 Ibrahim MF, Saeed FS, El-Morshidy EM, et al. Posterolateral fusion versus posterior lumbar interbody fusion for adult low-grade isthmic spondylolisthesis: analysis of sagittal radiographic parameters - a randomized controlled trial [J]. *Global Spine J*, 2025, 15 (3): 1614-1624.
  - 21 Hresko MT, Deckey DG, Hinchcliff E, et al. Comparative sacral morphology in spondylolisthesis patients [J]. *Spine Deform*, 2019, 7 (6): 945-949.
  - 22 李博, 宋凯, 吴兵, 等. 年龄、体位与性别对骶骨影像形态参数的影响 [J]. *解放军医学院学报*, 2022, 43 (6): 675-680.
  - 23 Cosgun Z, Dagistan E, Dagistan Y. Effects of sagittal balance differences on spondylolisthesis [J]. *Acta Ortop Bras*, 2019, 27 (2): 120-123.
  - 24 Sugawara K, Iesato N, Katayose M. Comparison of the sacral table angles by progression stage of lumbar spondylololysis [J]. *Spine Deform*, 2020, 8 (1): 123-127.
  - 25 Wang Z, Mac-Thiong JM, Parent S, et al. The relevance of sacral and sacro-pelvic morphology in developmental lumbosacral spondylolisthesis: are they equally important? [J]. *Eur Spine J*, 2014, 23 (1): 157-162.
  - 26 宋凯, 吴兵, 成俊遥, 等. 骶骨形态与脊柱骨盆矢状位参数的相关性研究 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2020, 30 (6): 493-499.
  - 27 Ang B, Lafage R, Elysée JC, et al. In the relationship between change in kyphosis and change in lordosis: which drives which? [J]. *Global Spine J*, 2021, 11 (4): 541-548.
  - 28 Wang Z, Parent S, Mac-Thiong JM, et al. Influence of sacral morphology in developmental spondylolisthesis [J]. *Spine*, 2008, 33 (20): 2185-2191.
  - 29 Wang DF, Chen XL, Han D, et al. The effect of sagittal alignment, coronal balance, and segmental stability on preoperative patient-reported outcomes in patients with degenerative lumbar spondylolisthesis [J]. *BMC Surg*, 2023, 23 (1): 48.
  - 30 Zhang WH, Yu Y, Li H, et al. The trend of changes in spine-pelvic sagittal parameters before and after surgery in patients with double-segment lumbar spondylolisthesis and their evaluating for surgery efficacy [J]. *Zhongguo Gu Shang*, 2023, 36 (9): 827-832.
  - 31 Ferraro M, Puglia F, Della Valle A, et al. Transforaminal lumbar interbody fusion with a tantalum cage: lumbar lordosis redistribution and sacral slope restoration with a modified posterior technique [J]. *J Orthop Traumatol*, 2023, 24 (1): 62.

(责任编辑:施晓亚,潘越)

(上接第926页)

- 19 Keenan S, Riesberg JC. Prolonged field care: beyond the "golden hour" [J]. *Wildern Environ Med*, 2017, 28 (2\_suppl): S135-S139.
- 20 Brenner M, Inaba K, Aiolfi A, et al. Resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta and resuscitative thoracotomy in select patients with hemorrhagic shock: early results from the American association for the surgery of trauma's aortic occlusion in resuscitation for trauma and acute care surgery registry [J]. *J Am Coll Surg*, 2018, 226 (5): 730-740.
- 21 Bedeir K, Seethala R, Kelly E. Extracorporeal life support in trauma: worth the risks? A systematic review of published series [J]. *J Trauma Acute Care Surg*, 2017, 82 (2): 400-406.
- 22 Johnson S, Lauby RS, April MD, et al. Development of Data-Driven Triage Systems for Identifying Mortally Wounded Casualties-Implications for Future Large-Scale Combat Operations [J/OL]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35373319/>.
- 23 Pamplin JC, Remondelli MH, Thota D, et al. Revolutionizing combat casualty care: the power of digital twins in optimizing casualty care through passive data collection [J]. *Mil Med*, 2025, 190 (1/2): 27-32.
- 24 Cannon JW, Khan MA, Raja AS, et al. Damage control resuscitation in patients with severe traumatic hemorrhage: A practice management guideline from the Eastern Association for the Surgery of Trauma [J]. *J Trauma Acute Care Surg*, 2017, 82 (3): 605-617.
- 25 Hirshberg A, Stein M, Walden R. Surgical resource utilization in urban terrorist bombing: a computer simulation [J]. *J Trauma Inj Infect Crit Care*, 1999, 47 (3): 545-550.
- 26 Hansen KS, Uggem PE, Brattebø G, et al. Team-oriented training for damage control surgery in rural trauma: a new paradigm [J]. *J Trauma Inj Infect Crit Care*, 2008, 64 (4): 949-954.
- 27 Parker P, Bodger O, Pallister I. The Royal College of Surgeons of England Damage Control Orthopaedic Trauma Skills course (DCOTS): resuscitative knowledge and confidence in surgical skills are reliably maintained at six months post course [J]. *Annals*, 2023, 105 (6): 548-553.
- 28 Swiech A, de Rocquigny G, Martinez T, et al. Terrorist threat: Creating a nationwide damage control training program for non-trauma care providers [J]. *Anaesth Crit Care Pain Med*, 2020, 39 (1): 59-64.
- 29 Bousigues M, Pretalli JB, Vivien B, et al. Damage control training: a cross-sectional survey of health care personnel of French emergency medicine structures [J]. *Mil Med*, 2024, 189 (9/10): e2257-e2263.
- 30 Vallée A. Digital twin for healthcare systems [J]. *Front Digit Health*, 2023, 5: 1253050.
- 31 张煌, 杜雁芸. 俄美军用人工智能竞争的战略稳定风险及其治理路径 [J]. *俄罗斯研究*, 2022 (6): 157-190.

(责任编辑:孙菲)