腰骶移行椎患者脊柱骨盆参数与下腰痛的相关性及预测模型研究

马　越[1,2]，于　涵[1,3]，苏天琦[1,2]，高　干[2]，陶本章[2]，薛　超[3]，张　军[2]
[1]解放军医学院，北京　100853；[2]解放军总医院第一医学中心神经外科医学部，北京　100853；[3]解放军总医院第四医学中心骨科医学部，北京　100853

摘要：背景　矢状位失衡是下腰痛(low back pain，LBP)的重要致病机制，腰骶移行椎(lumbosacral transitional vertebrae，LSTV)患者会由于脊柱失衡导致脊柱骨盆参数改变，这与下腰痛发病率升高是否具有相关性缺乏充分证据。**目的**　探讨LSTV患者脊柱矢状位平衡改变引起的脊柱-骨盆矢状面参数差异，并分析其与LBP的关系。**方法**　回顾性分析2023年1月—2024年1月就诊于解放军总医院第一医学中心骨科门诊以健康体检为主诉进行脊柱检查的患者。依据Castellvi分型标准，分为正常对照组和不同亚型腰骶移行椎组，比较组间下腰痛患病率、Oswestry功能障碍指数(Oswestry disability index，ODI)和骨盆矢状面参数的差异，并进行LBP与脊柱骨盆矢状面参数相关性检验及影响因素分析。**结果**　共纳入971例患者，其中LSTV组204例，正常健康组767例。与正常健康组比较，LSTV组LBP患病率(57.8% *vs* 15.6%，$P<0.001$)和ODI评分(15.32±8.45 *vs* 9.67±5.06，$P<0.001$)更高，且脊柱骨盆参数骨盆入射角(50.58°±10.71° *vs* 49.18°±7.12°，$P=0.027$)和骨盆入射角-腰椎前凸角显著增大(-6.41°±11.37° *vs* -8.69°±10.76°，$P=0.008$)，提示其腰椎前凸不足以匹配骨盆形态，可能引起脊柱骨盆的矢状面失衡。Castellvi分型Ⅱ、Ⅳ型患者ODI评分与骨盆入射角($r=0.24$，$P=0.007$)、腰椎前凸角($r=-0.28$，$P<0.001$)和骨盆入射角-腰椎前凸角($r=0.37$，$P<0.001$)具有显著相关性。多元Logistic回归显示，参照健康对照组，体质量指数>28 kg/m^2(*OR*=2.592，95% *CI*：1.190～5.641)、腰骶移行椎(*OR*=7.060，95% *CI*：2.488～20.020)、体力劳动为主的职业(*OR*=1.659，95% *CI*：1.030～2.671)为影响患者健康状况的独立危险因素。以回归风险构建的下腰痛预测评估模型，其ROC-AUC为0.706(95% *CI*：0.664～0.747)。**结论**　LSTV尤其是Castellvi Ⅱ/Ⅳ型患者的脊柱局部矢状位稳定性受到显著影响，其脊柱-骨盆矢状面参数发生改变，这可能是导致下腰痛的重要原因。

关键词：下腰痛；腰骶移行椎；Castellvi分型；脊柱骨盆参数；ODI功能障碍指数
中图分类号：R684　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-5227(2025)07-0646-07
DOI：10.12435/j.issn.2095-5227.25021001
引用本文：马越，于涵，苏天琦，等.腰痛与腰骶移行椎患者脊柱骨盆参数的相关性及影响因素/预测模型分析［J］.解放军医学院学报，2025，46（7）：646-652.

Spinopelvic parameters and LSTV-associated low back pain: Relationship and predictive modeling

MA Yue[1,2], YU Han[1,3], SU Tianqi[1,2], GAO Gan[2], TAO Benzhang[2], XUE Chao[3], ZHANG Jun[2]
[1]Chinese PLA Medical School, Beijing 100853, China; [2]Senior Department of Neurosurgery, the First Medical Center of PLA General Hospital, Beijing 100853, China; [3]Senior Department of Orthopedics, the Fourth Medical Center of PLA General Hospital, Beijing 100853, China
Corresponding author: ZHANG Jun. Email: junzhang301@163.com

Abstract: Background　Sagittal imbalance is an important pathogenic mechanism of low back pain in clinical practice. Patients with lumbosacral transitional vertebrae (LSTV) may experience altered spinopelvic parameters due to spinal imbalance. However, it remains unclear whether such changes correlate with increased incidence of low back pain. **Objective**　To investigate the prevalence and severity of low back pain in LSTV patients, identify differences in spinopelvic sagittal parameters affecting spinal sagittal balance among distinct LSTV subtypes, analyze key biomechanical mechanisms underlying low back pain from spinopelvic alignment perspectives, and establish an initial predictive model. **Methods**　A retrospective analysis was conducted on individuals who underwent spinal examinations during health check-ups at the First Medical Center of PLA General Hospital from January 2023 to January 2024. Based on Castellvi classification criteria, participants were categorized into a normal control group and LSTV subgroups with different subtypes. Comparative analysis assessed intergroup differences in low back pain prevalence, Oswestry Disability Index (ODI) scores, and pelvic sagittal parameters, followed by correlation testing between back pain severity and spinopelvic alignment parameters with subsequent multivariate regression to identify contributing factors. **Results**　The study cohort comprised 971 patients (204 LSTV cases *vs* 767 normal controls), revealing significantly higher low back pain prevalence

收稿日期：2025-05-27
第一作者：马越，在读硕士，主治医师。Email: vil219@163.com
通信作者：张军，博士，主任医师。Email: junzhang301@163.com

(57.8% *vs* 15.6%, *P*<0.001), elevated ODI scores (15.32±8.45 *vs* 9.67±5.06, *P*<0.001), and increased spinopelvic parameters in LSTV patients-specifically pelvic incidence (PI: 50.58±10.71 *vs* 49.18±7.12, *P*=0.027) and PI-lumbar lordosis mismatch (PI-LL: -6.41±11.37 *vs* -8.69±10.76, *P*=0.008), suggesting inadequate lumbar curvature to accommodate pelvic morphology potentially drives sagittal imbalance. Notably, ODI scores in Castellvi types II/IV correlated significantly with PI (*r*=0.24, *P*=0.007), LL (*r*=-0.28, *P*<0.001), and PI-LL (*r*=0.37, *P*<0.001). Multivariate regression identified BMI ≥28 kg/m^2 (*OR*=2.592, 95% *CI*: 1.190-5.641), LSTV diagnosis (*OR*=7.060, 95% *CI*: 2.488-20.020), and physically demanding occupations (*OR*=1.659, 95% *CI*: 1.030-2.671) as independent risk factors for impaired recovery (*P*<0.05), with the derived predictive model demonstrating moderate discrimination (ROC-AUC=0.706; 95% *CI*: 0.664-0.747). **Conclusion** In patients with LSTV, particularly those classified as Castellvi types II and IV, significant impairment of local sagittal spinal stability occurs, accompanied by alterations in spinopelvic sagittal parameters-these biomechanical disturbances may constitute a significant contributor to the pathogenesis of low back pain. Sagittal imbalance is an important pathogenic mechanism of low back pain in clinical practice. Patients with lumbosacral transitional vertebrae (LSTV) may experience altered spinopelvic parameters due to spinal imbalance. However, it remains unclear whether such changes correlate with increased incidence of low back pain.

Keywords: low back pain; lumbosacral transitional vertebra; Castellvi classification; spinopelvic parameters; oswestry disability index

Cited as: Ma Y, Yu H, Su TQ et al. Spinopelvic parameters and LSTV-associated low back pain: Relationship and predictive modeling[J]. Acad J Chin PLA Med Sch, 2025, 46(7): 646-652.

下腰痛(low back pain，LBP)是最常见的肌肉骨骼疾病之一。随着我国人口老龄化进程，LBP患病率呈持续上升趋势。研究表明，脊柱骨盆矢状面参数——T1脊柱骨盆倾斜角(T1 spinopelvic inclination，T1SPI)、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)的异常改变是导致下腰痛发生的重要生物力学机制[1-3]。腰骶移行椎(lumbosacral transitional vertebrae，LSTV)是常见的脊柱畸形，患病率最高可达35.9%[4-6]。有研究发现腰骶移行椎由于移行椎体的结构形态改变导致移行节段和临近节段的生物力学改变，引发脊柱骨盆参数改变[7-8]。腰骶移行椎脊柱骨盆参数的改变与下腰痛发病率升高是否具有相关性，近年来受到学术界关注，但由于临床数据不足，脊柱骨盆参数的不同种类、下腰痛严重程度及不同分型差异等方面仍缺乏两者相关性的充分证据。本课题通过大样本量临床数据分析，对不同Castellvi亚型的腰骶移行椎患者脊柱骨盆参数分别进行统计，比较各亚型间的脊柱骨盆参数差异，并探讨腰骶移行椎是否通过改变脊柱骨盆参数影响脊柱矢状位平衡，从而引起下腰痛，为外科医师确定个性化诊疗方案提供指导。

1 对象与方法

1.1 研究对象

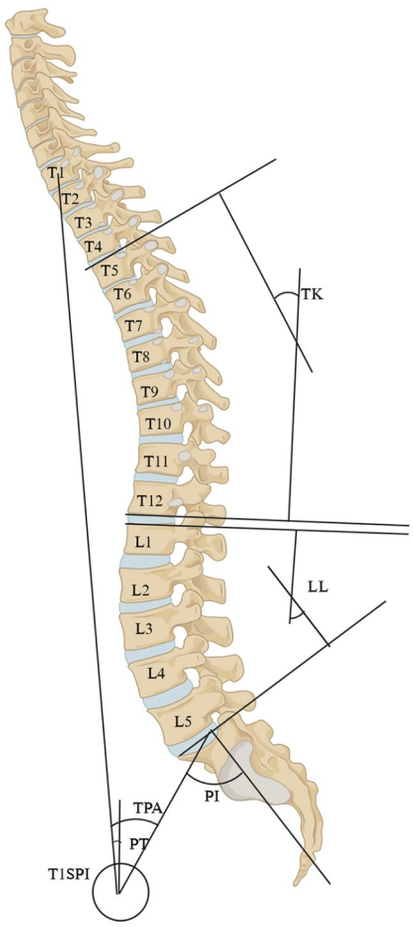
本研究为单中心回顾性病例对照研究。纳入2023年1月—2024年1月就诊于解放军总医院第一医学中心进行健康查体的患者。LBP诊断为患者就诊时有下腰部疼痛伴或不伴有下肢放射痛症状及体征(接诊与影像评估均由同一高年资脊柱外科医师完成)。

纳入标准：(1)年龄≥18岁，具有完整腰骶部CT、MRI及脊柱全长X线影像数据；(2)影像学未见显著退变(腰椎管狭窄≤单节段、椎间盘突出Schizas分级≤Ⅱ级、Cobb角＜10°)。排除标准：(1)结构性病变：强直性脊柱炎、特发性脊柱侧凸(Cobb角≥10°)、Scheuermann病等疾病；(2)特殊病史：脊柱手术史、感染性/肿瘤性脊柱病变、合并髋膝关节病变等既往疾病病史；(3)系统性疾病：代谢性骨病、神经肌肉系统疾病等全身疾病；(4)非腰骶部移行椎的其他腰骶部发育畸形。本研究经解放军总医院第一医学中心医学伦理委员会审查批准(伦审编号：S2023-170-01)。

1.2 影像学测量指标和临床资料收集

本研究选取以下影像学测量指标(图1)。(1)胸椎后凸角：采用T5上终板切线与T12下终板切线形成的夹角；(2)腰椎前凸角：由L1上终板切线与S1上终板切线构成的夹角；(3)骨盆参数体系：骨盆入射角为骶骨上终板中点至股骨头中心连线与该终板垂线形成的夹角；骨盆倾斜角为包含两个测量基准线——骶骨上终板中点至股骨头中心连线与通过股骨头中心的垂直参比线；PI-LL为骨盆入射角和腰椎前凸角的差值；(4)脊柱-骨盆复合参数：T1脊柱骨盆倾斜角为T1重心至股骨头中心连线相对于垂直轴的偏移角，正值表示T1垂线位于股骨头中心前方。

测量过程采用严格的质量控制，采用Surgimap(v2.3)软件标准化操作，由同一名高年资脊柱外科医师完成3次重复测量并取均值，影像学评估采用



T1SPI：T1脊柱骨盆倾斜角；TPA：T1椎体后缘角；PT：骨盆倾斜角；T1：椎体倾斜角；PI：骨盆倾斜角；TK：胸椎后凸角；LL：腰椎前凸角。

图1　脊柱骨盆矢状面参数示意图

Fig. 1　Sagittal spinopelvic parameters

双盲复核机制，数据采集严格执行DICOM标准化测量流程。

1.3　腰骶移行椎的诊断标准及分组

本研究采用Castellvi等[9]提出的腰骶部移行椎的4分型法。该分类体系依据假关节和骨性融合特征进行分型。研究团队通过多模态影像学综合评估(根据脊柱全长X线片进行节段计数和腰骶移行椎分型，并结合CT和MRI影像学资料辅助评估)，最终将受试者分为5组——正常对照组、Castellvi Ⅰ型、Castellvi Ⅱ型、Castellvi Ⅲ型和Castellvi Ⅳ型，以确保分类的解剖学精准性和临床相关性。

1.4　统计学方法

采用SPSS 23.0软件进行统计学分析。连续数值变量均先进行正态性检验。正态数据以$\bar{x}\pm s$表示，两组间比较采用独立样本t检验。偏态资料以$M(IQR)$表示，两组间比较采用独立样本秩检验。分类变量的统计推断采用Pearson χ^2检验或Fisher精确概率检验。连续数值变量的相关性采用Pearson相关分析。影响因素分析采用多因素Logistic回归，并据以构建Log$P$型[Ln(P/1-P)]预测模型。预测模型的效能分析采用受试者工作特征(receiver operation characteristic，ROC)曲线及配对4格表评估法。$P<0.05$为差异有统计学意义。

2　结果

2.1　研究对象一般资料

本研究共纳入971例样本，其中正常健康对照组767例(79.0%)，LSTV组204例(21.0%)。与对照组比较，LSTV组男性比例偏高，体质量指数(body mass index，BMI)均值更小，体力劳动职业者比例更高；与对照组比较，LSTV组下腰痛的患病率更高，Oswestry功能障碍指数(Oswestry disability index，ODI)更高；以上差异均有统计学意义($P<0.05$)，见表1。在LSTV患者中，腰椎骶化患者的比例高于骶椎腰化患者。本研究发现纳入样本中腰椎骶化患者的比例显著高于骶椎腰化患者(59.8% *vs* 40.2%)，其中Castellvi Ⅰ型占比最高(45.1%)，同时LSTV男性患者比例较正常对照组显著升高，这一结果与近年文献报告的结果一致[10-13]，LSTV发病率存在性别差异的原因可能与雄激素介导的骨重塑通路调控机制有关[14-16]。

2.2　腰骶移行椎患者的脊柱骨盆关节矢状面参数改变

与对照组比较，LSTV组脊柱骨盆关节矢状面参数发生显著变化，PI (50.58° ± 10.71° *vs* 49.18° ± 7.12°，P=0.027)和PI-LL (-6.41° ± 11.37° *vs* -8.69° ± 10.76°，P=0.008)显著升高。见表1。

进一步对LSTV患者进行精准Castellvis分型。结果显示，Ⅰ型患者92例，占比最高(45.1%)，Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ型患者分别为44例(21.6%)、43例(21.1%)、25例(12.2%)。组间分析发现Ⅱ型和Ⅳ型的患者相较于对照组PI、LL和PI-LL发生显著改变，而T1SPI和TK的差异无统计学意义。与正常对照组患者比较，Castellvi Ⅲ型患者PI、LL、PI-LL、T1SPI和TK均无统计学差异，见表2。此结果提示Castellvi Ⅱ型和Ⅳ型的患者存在脊柱-骨盆关节矢状面力学失衡。

表 1　LSTV 组与正常对照组的一般临床数据比较

Tab. 1　Demographic data comparison between subjects with or without LSTV

指标	LSTV(+) (n=204)	LSTV(-) (n=767)	t/χ^2值	P值
年龄/(岁，$\bar{x}\pm s$)	48.57±12.75	47.93±12.54	0.646	0.519
男性/(例，%)	118(57.8)	368(48.0)	6.272	0.012
BMI/(kg/m^2，$\bar{x}\pm s$)	22.80±2.86	23.27±2.71	2.176	0.030
吸烟/(例，%)	39(19.1)	160(20.9)	0.300	0.584
体力劳动职业/(例，%)	34(15.2)	72(9.8)	8.780	0.003
高血压/(例，%)	14(6.7)	49(6.4)	0.060	0.807
2 型糖尿病/(例，%)	19(9.3)	70(9.1)	0.007	0.934
ODI 评分/(分，$\bar{x}\pm s$)	15.32±8.45	9.67±5.06	9.125	＜0.001
下腰痛/(例，%)	118(57.8)	123(15.6)	150.937	＜0.001
临床分型/(例，%)				
腰椎骶化	122(59.8)	0(0)		-
骶椎腰化	82(40.2)	0(0)		-
PI/(°，$\bar{x}\pm s$)	50.58±10.71	49.18±7.12	2.220	0.027
LL/(°，$\bar{x}\pm s$)	57.32±6.99	57.94±7.98	1.092	0.276
TK/(°，$\bar{x}\pm s$)	39.94±8.98	40.51±8.26	0.860	0.390
T1SPI/[°，$M(IQR)$]	-2.56 (-7.65 ~ 2.79)	-3.08 (-7.30 ~ 1.89)	1.541	0.264
PI-LL/[°，$M(IQR)$]	-6.34 (-14.99 ~ 0.40)	-8.69 (-15.83 ~ -1.06)	2.569	0.018

PI：骨盆入射角；LL：腰椎前凸角；TK：胸椎后凸角；T1SPI：T1 脊柱骨盆倾斜角。

2.3　Castellvi 不同亚型患者与对照组的下腰痛症状评分(ODI 症状评分)比较

LSTV 组患者下腰痛患病率和症状评分均显著高于正常对照组，提示 LSTV 与下腰痛存在某种关联。进一步分析 Castellvi 不同亚型患者的下腰痛 ODI 症状评分，发现 Castellvi Ⅱ型和Ⅳ型患者相较于对照组患者的 ODI 症状评分显著升高(P＜0.05)，而 Castellvi Ⅲ型患者与对照组的 ODI 症状评分无统计学差异(P＞0.05)，见图 2。此结果提示，Castellvi Ⅱ型和Ⅳ型可能与下腰痛症状加重存在关联。

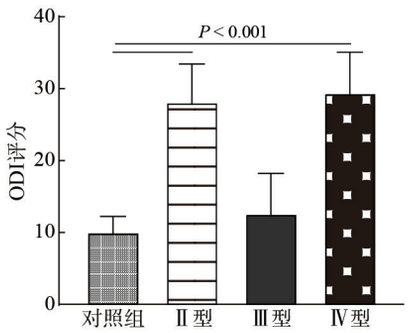


图 2　不同 Castellvis 分型 ODI 评分比较

Fig. 2　Comparison of ODI scores for different Castellvi types

2.4　ODI 与脊柱骨盆矢状面参数的相关性分析

为进一步探究 Castellvi 各亚型与加重下腰痛的关系，本研究对脊柱-骨盆矢状面参数与 ODI 值进行 Pearson 相关分析，结果见表 3。Castellvi Ⅱ型和Ⅳ型患者的 PI、LL、PI-LL 与 ODI 症状评分均存在显著相关性(P＜0.05)，而 TK、T1SPA 的相关性均不显著。Castellvi Ⅲ型患者各种脊柱-骨盆矢状面参数与 ODI 评分的相关性均无统计学意义。此结果提示，腰骶移行椎患者，尤其是 Castellvi Ⅱ型和Ⅳ型患者，脊柱骨盆矢状面力学结构失衡非常突出，易导致下腰痛的发生。

2.5　下腰痛的关联因素分析

采用非条件 Logistic 回归，因变量为下腰痛情况。自变量经临床和统计专家会商及结合国内外已发表研究结果，考虑以下 7 个指标/参数——年龄、BMI、性别、职业、LSTV、吸烟史和 2 型糖尿病。此外为提高统计效率，将部分为连续数值的自变量，按两组总均值进行分段(分层)，转化成两分类变量。各变量赋值设计见表 4。回归过程采用逐步后退法，$\alpha_{剔除}$=0.10，$\alpha_{入选}$=0.05。回归结果显示，肥胖(BMI≥28 kg/m^2)，存在 LSTV，职业(体力劳动为主)为影响患者健康状况的独立关联因素(OR＞1，P＜0.05)。见表 5。

表 2　对照组与不同 Castellvi 亚型患者脊柱骨盆矢状面参数比较(°，$\bar{x}\pm s$)

Tab. 2　Comparison of spino-pelvic sagittal plane parameters between patients incontrol group and patients with different castellvi subtypes (°, $\bar{x}\pm s$)

指标	对照组 (n=767)	Castellvi 亚型			P_1值	P_2值	P_3值
		Ⅱ型(n=44)	Ⅲ型(n=43)	Ⅳ型(n=25)			
PI	49.87±5.67	55.35±6.56	52.74±10.95	52.51±7.52	＜0.001	0.360	0.024
LL	57.98±5.30	51.13±2.25	57.51±1.75	60.13±2.60	＜0.001	0.558	0.044
TK	39.58±9.25	40.53±8.85	40.10±9.21	42.56±11.48	0.507	0.717	0.116
T1SPI	-2.65±6.71	-2.49±6.92	-2.76±5.78	-3.01±7.81	0.878	0.916	0.793
PI-LL	-7.99±7.81	-4.51±7.36	-7.78±11.18	-4.42±1.51	0.004	0.867	0.023

P_1：对照 *vs* Ⅱ型；P_2：对照 *vs* Ⅲ型；P_3：对照 *vs* Ⅳ型。

表 3　ODI评分与脊柱骨盆矢状面参数的相关性分析

Tab. 3　Correlation analysis between spinal pelvic parameters and ODI in Castellvi II and IV

脊柱骨盆矢状面参数	ODI值			
	Castellvi Ⅱ/Ⅳ型		Castellvi Ⅲ型	
	*r*值	*P*值	*r*值	*P*值
PI	0.24	＜0.001	0.08	0.591
LL	-0.28	＜0.001	-0.43	0.156
TK	0.07	0.302	-0.21	0.171
T1SPI	0.04	0.556	0.19	0.225
PI-LL	0.37	＜0.001	0.15	0.338

表 4　回归变量赋值表

Tab. 4　Coding scheme for binary variables

变量	代码	参数/指标	赋值=1	赋值=0
因变量	Y	下腰痛	有	无
自变量	X1	年龄/岁	≥70	＜70
	X2	BMI/(kg/m^2)	≥28	＜28
	X3	性别	男	女
	X4	职业	体力劳动为主	其他
	X5	LSTV	有	无
	X6	吸烟史	有	无
	X7	2型糖尿病	有	无

表 5　研究样本的下腰痛的影响因素分析

Tab. 5　Analysis of Influencing factors for low back pain in the study sample

指标/因素	*β*值	*Sx̄*	*Wald* χ^2	*P*值	*OR*	*OR* 95% *CI*
常数	-0.290	0.123	5.575	0.018	0.748	0.588～0.952
BMI≥28 kg/m^2	0.952	0.397	5.754	0.016	2.592	1.190～5.641
职业	0.506	0.243	4.334	0.037	1.659	1.030～2.671
LSTV	1.954	0.532	13.495	＜0.001	7.060	2.488～20.020

2.6　下腰痛预测评估模型分析——ROC分析及配对4格表评估

模型构建：以本研究下腰痛患者为阳性样本(241例)，无下腰痛者为阴性样本(730例)，以上述多因素回归所得回归风险概率模型直接构建下腰痛的预测模型(Log*P*模型)。

ROC分析：以模型值：Ln(*P*/1-*P*)=-0.290+0.952×BMI(kg/m^2)+0.506×职业+1.954×LSTV作为预测效应量，进行ROC分析。结果显示，ROC AUC (0.95 *CI*)为0.706(0.664～0.747)。最佳约登指数为0.389，对应的最佳临界点敏感度和特异度分别为0.531和0.858。见图3。

模型效能参数评估：以本研究诊断分组为金标准(即下腰痛患者为金标准阳性样本，对照为金标准阴性样本)。再由模型表达式模拟计算得虚拟阈值为1.706，以此对研究样本进行属性判断(≥1.706为阳性，否则为阴性)，经配对4格表预测效能分析评估，模型各种效能参数见表6。

统计推断：关联性(趋同性)检验P＜0.05，提示该预测模型和实际情况密切关联。优势性(差异性)检验P＜0.05，提示该模型预测结果和金标准结果有一定差异。

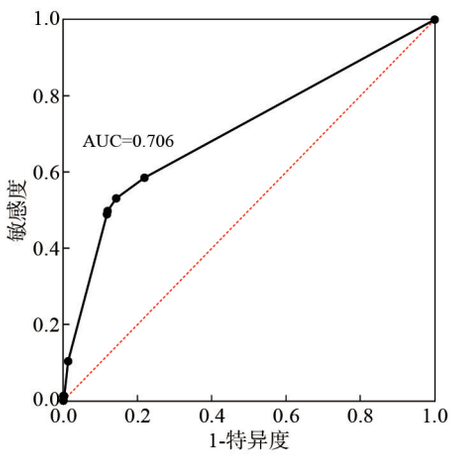


图 3　下腰痛预测评估模型的ROC曲线

Fig. 3　ROC curve of low back pain prediction and evaluation model

表 6　模型效能参数(配对4格表计算法)

Tab. 6　Model performance metrics (Paired 2×2 contingency table analysis)

指标及分类		模型预测结果		
		LBP+	LBP-	合计
金标准	LBP+	147	94	241
	LBP-	175	555	730
诊断效能参数	预测阈值	LBP+/阳性(≥1.706)		
	AUC	0.685		
	敏感度(n/N)	0.610(147/241)		
	特异度(n/N)	0.760(555/730)		
	准确度(n/N)	0.723(702/971)		
	约登指数	0.370		
	阳性预测值(n/N)	0.457(147/322)		
	阴性预测值(n/N)	0.855(555/649)		
	一致性系数Kappa	0.333(一致性一般)		
统计推断	关联性检验/χ^2,*P*	110.385,＜0.001		
	优势性检验/χ^2,*P*	312.252,＜0.001		

本表AUC为单折点曲线下面积，略低于ROC分析积分所得AUC。

3　讨论

LSTV不仅影响脊柱节段的准确计数，更通过改变生物力学传导干扰脊柱-骨盆复合体功能，进而破坏脊柱稳定性。Panjabi和White[17]于1980年提出了脊柱稳定性三子系统理论，根据功能性由骨骼和

韧带组成的被动子系统(passive subsystem，PS)、肌肉构成的主动子系统(active subsystem，AS)、神经控制子系统(neural control subsystem，NS)三者相互协作，共同维护脊柱的动态稳定性。这一理论为理解腰骶移行的致病机制提供了理论基础。本研究发现，LSTV通过改变移行节段的解剖结构(如假关节形成或骨性融合)，影响了脊柱骨盆复合体的力学平衡，导致PS应力分布异常，引发AS持续收缩，异常力学信号经神经传导影响中枢调控，最终突破NS阈值，形成“躯体疼痛-肌肉痉挛-脊柱失稳”的恶性循环，诱发LBP和腰椎退行性改变。

3.1 腰骶移行椎各亚型与下腰痛的相关性分析

关于Castellvi分型与下腰痛的关联性，目前研究存在争议。Nardo等[18]和Tang等[19]报道了腰骶移行椎Castellvi分型与下腰痛的相关性，CastellviⅡ型(单侧/双侧假关节)和Ⅳ型(单侧假关节+对侧融合)患者的下腰痛发生率显著高于其他分型，而Ⅰ型(横突肥大)和Ⅲ型(骨性融合)患者症状相对隐匿，其机制在于Ⅱ/Ⅳ型的假关节或不对称融合限制了移行节段活动度，迫使邻近节段代偿性负荷增加，加速退变[20-23]。这一结论在本研究中得到进一步验证，结果显示CastellviⅡ/Ⅳ型患者的ODI评分相较于对照组患者显著升高，而CastellviⅢ型患者的ODI评分无统计学差异。值得注意的是，CastellviⅢ型患者的骨性融合虽可能通过减少节段微动降低疼痛风险，但部分研究提出，不对称融合可能导致同侧肌肉张力异常升高[24-26]，这一矛盾现象提示需结合生物力学动态评估进一步探究。本研究的大样本量分析为CastellviⅡ/Ⅳ型作为高风险分型提供了强有力的证据，其机制可能与假关节或不对称融合导致的邻近节段代偿性负荷增加有关。

3.2 腰骶移行椎各亚型脊柱骨盆参数改变与下腰痛的相关性分析

脊柱骨盆矢状面参数的异常改变是LSTV引发下腰痛的核心生物力学基础。本研究发现，CastellviⅡ/Ⅳ型患者的PI、LL及PI-LL差值较对照组显著升高(P均<0.05)，且与ODI评分呈显著相关性($r=0.24\sim0.37$，$P<0.001$)。

这种参数失衡可通过四重机制诱发疼痛[7,27-28]。(1)生物力学失衡与退变加速：LL异常改变椎间盘髓核压力分布，导致纤维环应力集中，加速退行性改变；(2)肌肉代偿失衡：深层核心肌群(如多裂肌)功能减弱迫使浅层肌群(竖脊肌)代偿收缩，导致疲劳与痉挛；(3)神经炎症激活：应力异常引发关节囊微损伤，释放白细胞介素6、肿瘤坏死因子α等炎性因子，降低疼痛阈值并诱导中枢敏化；(4)代偿性病理失稳：骨质增生、韧带肥厚等代偿虽短期稳定脊柱，但长期限制活动度，加剧退变与微动损伤。值得关注的是，CastellviⅡ/Ⅳ型患者的T1SPI与TK虽无统计学差异，但存在代偿性增大趋势，提示胸椎可能通过后凸增加维持整体矢状面平衡，而腰骶局部已形成“隐性失稳”[29]。这种失衡通过“力学改变-肌肉代偿-神经炎症”三重机制加剧下腰痛，并最终导致邻近节段椎间盘突出等退行性疾病。因此，临床干预需聚焦于恢复腰骶移行节段稳定性，结合核心肌群功能训练，阻断恶性循环。

3.3 腰骶移行椎患者下腰痛风险预测模型

为建立精准的下腰痛风险分层体系，本研究采用非条件Logistic回归模型，系统分析腰骶移行椎患者的LBP影响因素，并基于回归系数构建Log$P$型风险预测模型。通过ROC曲线(AUC值、95% CI)和Kappa一致性检验，从判别效能、临床适用性双维度评估模型价值。该Logistic回归模型整合了LSTV(OR=7.06)、肥胖(BMI≥28 kg/m^2，OR=2.59)、体力劳动职业(OR=1.66)等三大独立风险因子，其ROC AUC为0.706(95% CI：0.664～0.747)，提示中等预测效能。模型的高特异度(0.760)与阴性预测值(0.855)使其适用于人群初筛，可有效排除低风险个体。但当前模型存在两点局限：一是敏感度(0.610)与阳性预测值(0.457)有待提升，可能因未纳入动态生物力学参数(如屈伸位X线的节段活动度)或炎症标志物(CRP、IL-6)；二是回顾性设计可能引入选择偏倚，需多中心前瞻性队列进一步验证。未来研究可结合有限元分析量化移行节段应力分布，或通过功能性MRI评估核心肌群激活模式，以优化风险分层体系。

本研究存在一定局限性：(1)仅聚焦LSTV相关下腰痛，未全面涵盖其他致病因素，可能导致病因归因偏倚；(2)回顾性设计带来选择偏倚风险，后续开展多中心前瞻性队列研究可能有助于减小此偏倚；(3)本研究采用多因素Logistic回归分析，虽然考虑了多个影响因素，但仍可能存在其他未纳入模型的潜在影响因素。

综上所述，本研究证实CastellviⅡ/Ⅳ型LSTV通过显著改变PI、LL、PI-LL参数破坏脊柱矢状位平衡，进而增加下腰痛风险。LSTV、肥胖、体力劳动职业是下腰痛的独立危险因素，基于上述因子构建的预测模型可为临床风险分层提供参考。未来

需整合动态生物力学与分子标志物，深化对LSTV致病机制的探讨，推动精准治疗策略的发展。

作者贡献　马越：撰写初稿；于涵：调查研究；苏天琦：方法设计；高干：项目管理；陶本章：有效验证；薛超：监督指导；张军：审读和修订。

利益冲突　所有作者声明无利益冲突。

数据共享声明　本论文相关数据可依据合理理由从作者处获取，Email：vil219@163.com。

参考文献

1　Matson DM，Maccormick LM，Sembrano JN，et al. Sacral dysmorphism and lumbosacral transitional vertebrae （LSTV） review［J］. Int J Spine Surg，2020，14（suppl 1）：14-19.
2　Lian J，Levine N，Cho W. A review of lumbosacral transitional vertebrae and associated vertebral numeration［J］. Eur Spine J，2018，27（5）：995-1004.
3　Mahato NK. Morphometric analysis and identification of characteristic features in sacra bearing accessory articulations with L5 vertebrae［J］. Spine J，2010，10（7）：616-621.
4　Asai Y，Tsutsui S，Yoshimura N，et al. Relationship between age-related spinopelvic sagittal alignment and low back pain in adults of population-based cohorts：the ROAD study［J］. J Pain Res，2022，15：33-38.
5　He SJ，Zhang YJ，Ji W，et al. Analysis of spinopelvic sagittal balance and persistent low back pain （PLBP） for degenerative spondylolisthesis （DS） following posterior lumbar interbody fusion （PLIF）［J/OL］. https://doi.org/10.1155/2020/5971937.
6　Maria CW，Patryk W，Mateusz Ż，et al. Is sagittal spinopelvic alignment a cause of low back pain in pediatric spine pathologies? A review［J］. J Child Orthop，2023，17（6）：548-555.
7　Takemoto M，Boissière L，Vital JM，et al. Are sagittal spinopelvic radiographic parameters significantly associated with quality of life of adult spinal deformity patients? Multivariate linear regression analyses for pre-operative and short-term post-operative health-related quality of life［J］. Eur Spine J，2017，26（8）：2176-2186.
8　Zhou SY，Du L，Luo YX，et al. Effect of lumbosacral transitional vertebrae on sagittal balance of lumbo-pelvic complexity assessed by quantitative whole-body CT imaging［J］. Quant Imaging Med Surg，2023，13（12）：8531-8544.
9　Castellvi AE，Goldstein LA，Chan DP. Lumbosacral transitional vertebrae and their relationship with lumbar extradural defects［J］. Spine （Phila Pa 1976），1984，9（5）：493-495.
10　Zhu WH，Ding X，Zheng JL，et al. Characteristics，treatment and research development of bertolotti’s syndrome：a bibliometric analysis and systematic review［J］. Int J Surg，2023，109（19）：3159-3168.
11　Coskun Benlidayi I，Tirasci E. The effect of lumbosacral transitional vertebra on lumbar spine degeneration and spondylolisthesis among patients with low back pain［J］. Pain Pract，2024，24（1）：52-61.
12　Vinha A，Bártolo J，Lemos C，et al. Lumbosacral transitional vertebrae：prevalence in a southern European population and its association with low back pain［J］. Eur Spine J，2022，31（12）：3647-3653.
13　An CH，Lee JS，Jang JS，et al. Part affinity fields and CoordConv for detecting landmarks of lumbar vertebrae and sacrum in X-ray images［J］. Sensors （Basel），2022，22（22）：8628.
14　Xie SM，Cui LQ，Wang CL，et al. Contact between leaked cement and adjacent vertebral endplate induces a greater risk of adjacent vertebral fracture with vertebral bone cement augmentation biomechanically［J］. Spine J，2025，25（2）：324-336.
15　Sugiura K，Morimoto M，Higashino K，et al. Transitional vertebrae and numerical variants of the spine：prevalence and relationship to low back pain or degenerative spondylolisthesis［J］. Bone Joint J，2021，103-B（7）：1301-1308.
16　Konin GP，Walz DM. Lumbosacral transitional vertebrae：classification，imaging findings，and clinical relevance［J］. AJNR Am J Neuroradiol，2010，31（10）：1778-1786.
17　Panjabi MM，White AA 3rd. Basic biomechanics of the spine［J］. Neurosurgery，1980，7（1）：76-93.
18　Nardo L，Alizai H，Virayavanich W，et al. Lumbosacral transitional vertebrae：association with low back pain［J］. Radiology，2012，265（2）：497-503.
19　Tang M，Yang XF，Yang SW，et al. Lumbosacral transitional vertebra in a population-based study of 5860 individuals：prevalence and relationship to low back pain［J］. Eur J Radiol，2014，83（9）：1679-1682.
20　Guo R，Yang X，Zhong Y，et al. Correlations between Modic change and degeneration in 3-joint complex of the lower lumbar spine：a retrospective study［J］. Medicine （Baltimore），2018，97（38）：e12496.
21　Elster AD. Bertolotti’s syndrome revisited［J］. Spine，1989，14（12）：1373-1377.
22　Alonzo F，Cobar A，Cahueque M，et al. Bertolotti’s syndrome：an underdiagnosed cause for lower back pain［J］. J Surg Case Rep，2018（10）：rjy276.
23　Quinlan JF，Duke D，Eustace S. Bertolotti’s syndrome. A cause of back pain in young people［J］. J Bone Joint Surg Br，2006，88（9）：1183-1186.
24　Bahadir Ulger FE，Illeez OG. The effect of lumbosacral transitional vertebrae （LSTV） on paraspinal muscle volume in patients with low back pain［J］. Acad Radiol，2020，27（7）：944-950.
25　Shibayama M，Ito F，Miura Y，et al. Unsuspected reason for sciatica in bertolotti’s syndrome［J］. J Bone Joint Surg Br，2011，93（5）：705-707.
26　Hanhivaara J，Määttä JH，Karppinen J，et al. The association of lumbosacral transitional vertebrae with low back pain and lumbar degenerative findings in MRI：a large cohort study［J］. Spine （Phila Pa 1976），2022，47（2）：153-162.
27　Khalifé M，Vergari C，Ferrero E，et al. The rib cage：a new element in the spinopelvic chain［J］. Eur Spine J，2022，31（6）：1457-1467.
28　Cirillo Totera JI，Fleiderman Valenzuela JG，Garrido Arancibia JA，et al. Sagittal balance：from theory to clinical practice［J］. EFORT Open Rev，2021，6（12）：1193-1202.
29　Müller JA，Krenn VA，Böni T，et al. The influence of lumbosacral transitional vertebrae on lumbar lordosis and the angle of pelvic incidence［J］. J Anat，2024，244（4）：594-600.

（责任编辑：施晓亚，潘越）