·临床研究论著·

经椎间孔腰椎椎体间融合术后出现假关节形成的风险因素分析及预测模型的构建与验证

高升 孙军战 袁伟 俞军卫

【摘要】 **目的** 探讨经椎间孔腰椎椎体间融合术(transforaminal lumbar interbody fusion,TLIF)术后假关节形成的风险因素,构建并验证个体化预测模型,为临床风险分层干预提供依据。**方法** 回顾性分析2021年2月至2024年7月于我院行TLIF治疗的182例(234椎)的临床资料。收集年龄、性别、吸烟史、骨质疏松等基线特征,手术参数以及平均椎间隙高度丢失(△MDH)、上位椎弓根螺钉角度变化(△SSA)等术后影像动力学指标。先后通过单因素分析与多因素Logistic回归筛选独立风险因素,建立列线图(Nomogram)模型,并采用Bootstrap法(1 000次重抽样)进行内部验证,通过受试者工作特征(receiver operating characteristic,ROC)曲线、校准曲线和决策曲线分析评估模型性能。**结果** 182例患者TLIF术后假关节形成的发生率为9.34%(17/182)。多因素分析显示:骨质疏松症(OR=17.61,95% CI:2.60~119.45,*P*=0.003)、吸烟史(OR=12.95,95% CI:2.01~83.35,*P*=0.007)、△MDH(OR=25.08,95% CI:3.16~199.02,*P*=0.002)及△SSA(OR=20.08,95% CI:3.36~120.14,*P*=0.001)是TLIF术后假关节形成的独立风险因素。据此构建的Nomogram模型具有优异区分度(AUC=0.97,95% CI:0.94~1.00)、校准度(Hosmer-Lemeshow检验结果:*P*=0.992)及临床实用性(阈值概率为0.2~0.8时净获益显著提升)。**结论** 本研究建立的Nomogram模型整合了骨质疏松症、吸烟史、△MDH与△SSA等风险因子,可精准量化TLIF术后假关节形成风险,为高危患者围手术期和术后干预提供决策支持。

【关键词】 经椎间孔腰椎椎体间融合术;假关节;列线图;骨质疏松;椎间隙高度;风险因素

Risk factors for pseudarthrosis after transforaminal lumbar interbody fusion: Development and validation of a prediction model. *Gao Sheng, Sun Junzhan, Yuan Wei, Yu Junwei. Department of Orthopedics Ⅱ, 901st Hospital of the Joint Logistics Support Force, Hefei 230031, China*

Corresponding author: Sun Junzhan, E-mail: gssjz105@163.com

【**Abstract**】 **Objective** To investigate the risk factors for pseudarthrosis after transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF), and to develop and validate an individualized prediction model to provide a clinical basis for risk-stratified intervention. **Methods** The clinical data of 182 patients involving 234 fusion segments who underwent TLIF in our hospital from February 2021 to July 2024 were retrospectively analyzed. Baseline characteristics (including age, sex, smoking history, and osteoporosis), surgical parameters, and postoperative imaging dynamics indexes, including loss of middle disc height (△MDH) and change in superior screw angle (△SSA), were collected. Univariate and multivariate Logistic regression analyses were performed sequentially to screen independent risk factors. A Nomogram prediction model was established and internally validated using the Bootstrap resampling with 1 000 repetitions. The performance of the model was evaluated by receiver operating characteristic (ROC) curves, calibration curves, and decision curve analysis. **Results** The incidence of pseudarthrosis after TLIF was 9.34% (17/182). Multivariate analysis showed that osteoporosis (OR=17.61, 95% CI: 2.60-119.45, *P*=0.003), smoking history (OR=12.95, 95% CI: 2.01-83.35, *P*=0.007), △MDH (OR=25.08, 95% CI: 3.16-199.02, *P*=0.002), and △SSA (OR=20.08, 95% CI: 3.36-120.14, *P*=0.001) were independent risk factors for pseudarthrosis after TLIF. The constructed Nomogram model demonstrated excellent discrimination (AUC=0.97, 95% CI: 0.94-1.00), calibration (Hosmer-Lemeshow test, *P*=0.992), and clinical utility (with significantly increased net benefit at threshold probabilities of 0.2-0.8). **Conclusion** The Nomogram model developed in this study, which integrates osteoporosis, smoking history, △MDH, and △SSA,

DOI:10.3969/j.issn.1674-8573.2026.04.007
基金项目:联勤保障部队第九〇一医院科研项目(2025YGDZ10)
作者单位:联勤保障部队第九〇一医院骨二科,合肥 230031
通信作者:孙军战,E-mail:gssjz105@163.com

can accurately quantify the risk of pseudarthrosis after TLIF, providing decision support for perioperative and postoperative interventions in high-risk patients.

【Key words】 Transforaminal lumbar interbody fusion; Pseudarthrosis; Nomogram; Osteoporosis; Disc height; Risk factors

腰椎退行性疾病是中老年人群腰腿痛及功能障碍的常见病因。经椎间孔腰椎椎体间融合术(transforaminal lumbar interbody fusion,TLIF)因其创伤相对较小、可有效恢复椎间隙高度与腰椎生理曲度、提供良好神经减压效果及较高的融合成功率,已成为治疗此类疾病的常用手术技术之一[1]。然而,部分患者术后可出现假关节形成等并发症,文献报道其发生率在3%~23%[2-3],平均发生率约为9.1%[1]。假关节形成是腰椎融合术后翻修的最主要原因之一,占所有翻修病例的45%~56%[2],患者可表现为持续性或复发性腰腿痛,严重损害生活质量[1-2],保守治疗往往无效,需行翻修手术切除假关节组织和/或处理移位的椎间融合器[3]。值得注意的是,针对假关节的翻修手术效果常不理想,复发性假关节发生率高达35%~50%,临床失败率可达40%~70%[4],显著增加医疗成本[2]。因此,预防假关节形成对于优化TLIF手术疗效、降低再手术率及改善患者长期预后至关重要[1,4]。目前,尚缺乏一种整合患者基线特征、手术细节及关键术后影像学参数动态变化的综合预测工具,用于个体化评估TLIF术后假关节形成风险。为此,本研究旨在系统分析影响TLIF术后假关节形成的多种潜在风险因素,构建出相应的列线图(Nomogram)预测模型并进行内部验证,以期为临床工作提供参考依据。

资料与方法

一、研究对象

回顾性分析2021年2月至2024年7月,于我院行TLIF手术的182例(234椎)腰椎退行性疾病患者的临床资料,其中男80例,女102例;年龄为(59.41±10.41)岁(33~82岁);融合节段数:单节段136例,双节段40例,三节段6例。

纳入标准:①确诊为腰椎退行性疾病且于我院行TLIF术的成年患者(年龄≥18岁);②具备术后≥1年的腰椎薄层CT影像数据;③完整保存出院前及术后3个月的标准腰椎正、侧位X线片,且临床资料完整、可供分析。排除标准:①既往有腰椎融合或翻修手术史者;②合并腰椎椎体骨折者;③存在脊柱畸形、感染或结核者;④因术后并发症(如感染、血肿、神经损伤)需行二次手术者;⑤影像学资料质量差,影响影像学参数的测量。本研究已获得医院伦理委员会批准通过(审批号:202508004),并已豁免患者的知情同意。

二、手术方法

全身麻醉后,患者取俯卧位。“C”型臂X线机定位手术节段后行后路正中切口。根据术前临床症状,将存在下肢症状的一侧定义为减压侧。剥离减压侧的骶棘肌,显露手术节段的椎板及关节突关节,随后植入椎弓根螺钉。对侧则通过Wiltse入路显露关节突,并植入椎弓根螺钉。继而切除减压侧部分关节突及椎板,完整摘除椎间盘后,植入填满颗粒骨的融合器。所用颗粒骨来源于椎板、棘突及关节突;若自体骨量不足,则混合置入部分同种异体颗粒骨。若患者存在椎体滑脱,则适当提拉加压后路钉棒系统复位滑脱,使用预弯的连接棒恢复腰椎前凸。透视确认融合器位置良好、钉棒固定牢固,冲洗术野,仔细止血。最后放置引流管并逐层缝合切口。

患者术后3天内预防性使用抗生素。当24 h引流量<40 mL时拔除引流管。出院后持续佩戴定制的硬质腰围3个月,要求患者在离床活动及坐位时全天佩戴,由家属监督佩戴情况。

三、TLIF术后假关节形成的判断标准

以“术后1年内腰椎动力位X线片显示手术节段的椎间活动度在3°以上,或经CT检查显示椎间植骨处未见连续骨小梁形成、植入物周围存在透亮影”为假关节形成的影像学判断标准[5](图1)。

四、资料收集

本研究收集了可能与TLIF术后假关节形成相关的潜在风险因素数据,涵盖患者基线特征、手术相关因素及术后影像学参数。患者基线特征包括年龄、性别、吸烟史、糖尿病史、骨质疏松症史、身体质量指数(body mass index,BMI)、术前血清白蛋白(albumin,Alb)水平及碱性磷酸酶(alkaline phosphatase,ALP)水平。手术相关因素则包括融合器类型、植骨材料、螺钉固定方式、手术融合节段数量以及融合节段是否包含L_5/S_1节段。

影像学参数的测量基于出院前及术后3个月的标准腰椎正、侧位X线片。具体参数包括手术节段

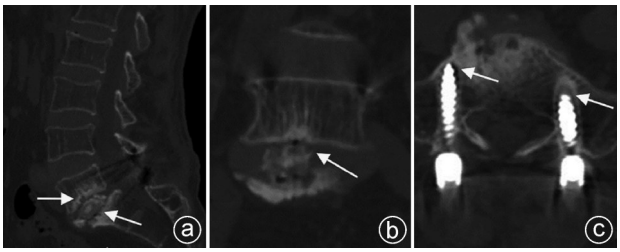

图1 TLIF术后假关节形成 a、b：可见骨移植物不连续（箭头所示）；c：可见螺钉松动（箭头所示）。

的椎间隙前缘高度（anterior disc height，ADH）和椎间隙后缘高度（posterior disc height，PDH）、节段性前凸角（segmental lumbar lordosis angle，SLA）和总椎间高度（total intervertebral height，TIH）；植入物参数包括上位椎弓根螺钉角度（superior screw angle，SSA）、下位椎弓根螺钉角度（inferior screw angle，ISA）、椎间融合器矢状面水平位置（sagittal horizontal position of the cage，SHPC）和冠状面水平位置（coronal horizontal position of the cage，CHPC）。其中，TIH即手术节段上位椎体上终板中心与下位椎体下终板中心的垂直距离；SLA即手术节段上位椎体上终板与下位椎体下终板延长线的夹角；SSA和ISA的测量即上位或下位椎弓根螺钉长轴与该椎体上终板平行线的夹角；SHPC即融合器中心点距离椎体中线之间的距离，CHPC即融合器中心点距离后正中线的距离。基于上述测量值，进一步计算得出以下参数：①平均椎间隙高度（mean disc height，MDH），MDH=（ADH+PDH）/2；②根据上述指标的出院前数值一术后3个月数值，计算得出SLA、TIH、SSA、ISA、SHPC和CHPC的变化值（以“△”表示）。

上述影像学参数由2名脊柱外科医师分别独立测量，取其平均值作为最终测量结果。为评估影像学参数测量的可靠性，采用组内相关系数（intraclass correlation coefficient，ICC）评估观察者间及观察者内一致性。观察者间一致性通过比较两名医师的测量结果进行评估；观察者内一致性通过其中一名医师在2周后重复测量30例随机选择的病例进行评估。ICC值>0.75表示一致性良好，0.60~0.75表示一致性中等，<0.60表示一致性较差。

五、统计学分析

数据分析采用SPSS Statistics 26.0（IBM公司，美国）和R软件（版本4.3.3；R Core Team，2024）共同完成。首先，根据数据特性进行分组比较分析。对于符合正态分布的连续变量（其正态性通过Shapiro-Wilk检验评估），采用独立样本t检验进行组间比较，以均值±标准差表示；若变量不符合正态分布，则采用Mann-Whitney U检验或Wilcoxon秩和检验，结果以中位数（四分位距）表示。分类变量的组间比较则使用卡方检验或Fisher精确检验（当理论频数<5时），结果以“例（%）”表示。所有假设检验的统计学显著性水平设定为P<0.05（双侧检验）。将两组差异性分析中P<0.1的变量纳入多因素二元Logistic回归模型进行进一步分析，最终确定影响假关节形成的独立风险因素，并计算其比值比（OR）及95%置信区间（95% CI）。基于多因素Logistic回归分析的结果，使用R软件构建个体化预测假关节形成风险的Nomogram模型。为全面评价该预测模型的性能，本研究进行了严格的内部验证（采用Bootstrap重抽样法，1 000次重复）。模型的区分能力通过绘制受试者工作特征（receiver operating characteristic，ROC）曲线并计算曲线下面积（area under the curve，AUC）来评估；模型的校准度则通过绘制校准曲线并结合Hosmer-Lemeshow拟合优度检验进行评价；通过决策曲线分析（decision curve analysis，DCA）评估模型在不同阈值概率下的临床净获益，以量化该预测模型在临床决策中的实际应用价值。

结　果

一、TLIF术后假关节形成情况

182例术后获随访12~27个月，平均19.5个月。截至末次随访，共有17例（22椎）TLIF术后出现融合节段假关节形成，发生率为9.34%（17/182）；其中，单节段13例，双节段3例，三节段1例。17例中，有13例（76.47%）出现明显的疼痛和功能障碍，接受翻修手术治疗；另4例（23.53%）未见相关临床症状，继续随访观察，并嘱患者加强核心肌群训练。将此17例患者列入假关节形成组，另165例列入融合良好组进行后续分析。典型病例见图2。

二、影像学参数测量的可靠性分析

影像学参数测量的可靠性分析显示，所有测量参数均具有良好的观察者间及观察者内一致性。观察者间ICC值为0.87~0.93，观察者内ICC值为0.89~0.95，表明影像学参数测量结果可靠（表1）。

三、两组间差异性分析

两组间临床特征和手术相关因素的差异性分析显示，假关节形成组与融合良好组在骨质疏松和吸烟史方面存在显著差异，假关节形成组的骨质疏松比例更高（58.82% vs. 16.36%，P<0.001），吸烟史比例也更高（52.94% vs. 21.21%，P=0.009），但两组在性别、年龄、BMI、Alb、ALP、糖尿病、手术节段分布、

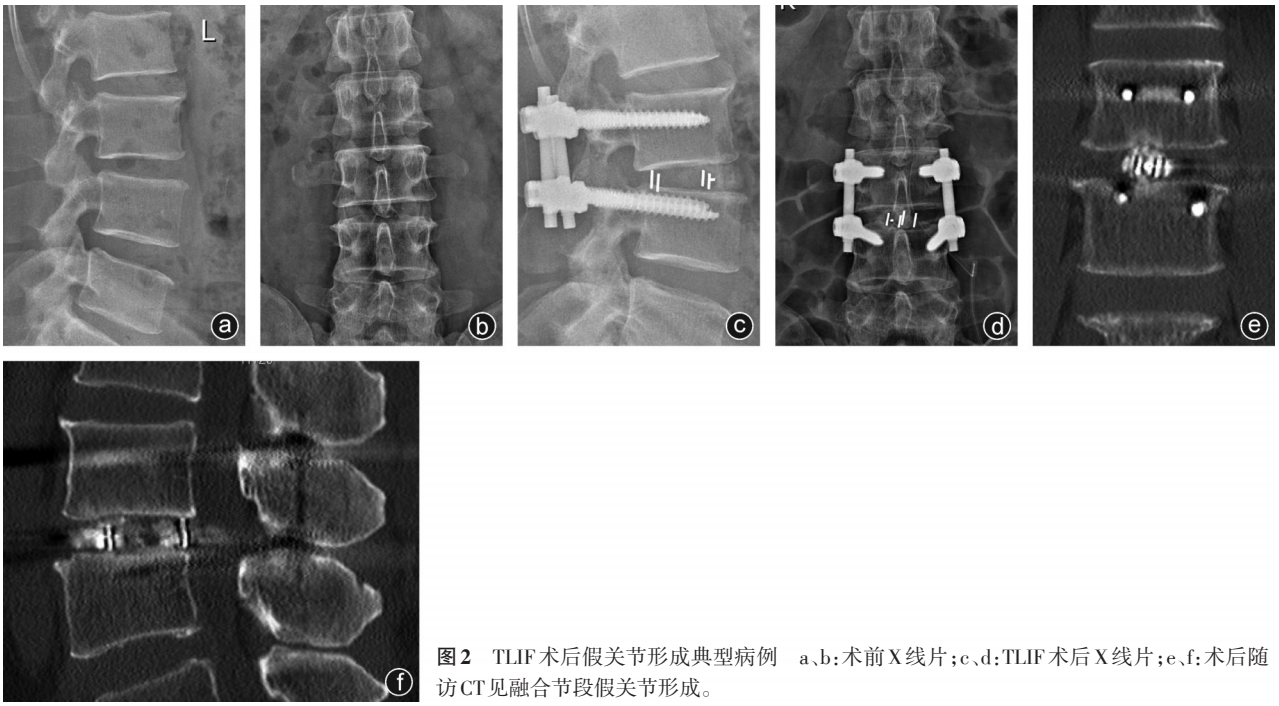

图2　TLIF术后假关节形成典型病例　a、b：术前X线片；c、d：TLIF术后X线片；e、f：术后随访CT见融合节段假关节形成。

表1　影像学参数测量的可靠性分析

影像学参数	观察者间ICC值（95% CI）	观察者内ICC值（95% CI）
ADH	0.89(0.84~0.93)	0.91(0.87~0.94)
PDH	0.87(0.82~0.91)	0.89(0.85~0.93)
MDH	0.91(0.87~0.94)	0.93(0.90~0.96)
SLA	0.90(0.86~0.93)	0.92(0.88~0.95)
TIH	0.88(0.83~0.92)	0.90(0.86~0.93)
SSA	0.93(0.90~0.95)	0.95(0.92~0.97)
ISA	0.92(0.89~0.94)	0.94(0.91~0.96)
SHPC	0.89(0.85~0.92)	0.91(0.87~0.94)
CHPC	0.87(0.82~0.91)	0.89(0.85~0.93)

融合器类型、植骨材料、螺钉固定方式等方面差异均无统计学意义（表2）。影像学参数比较发现，假关节形成组的平均△MDH和△SSA明显大于融合良好组（2.50 mm vs. 1.80 mm；3.30° vs. 2.00°；$P<0.001$），而△ISA、△SLA、△TIH等参数无显著差异（表3）。

四、多因素Logistic回归分析

将表2、3中$P<0.1$的因素均纳入多因素Logistic回归模型，以假关节形成（是=1，否=0）为因变量，骨质疏松（是=1，否=0）、吸烟史（是=1，否=0）、△MDH、△SSA、△ISA为自变量进行分析。结果显示：骨质疏松症（OR=17.61，95% CI：2.60~119.45，$P=0.003$）、吸烟史（OR=12.95，95% CI：2.01~83.35，$P=0.007$）、△MDH（OR=25.08，95% CI：3.16~199.02，$P=0.002$）、△SSA（OR=20.08，95% CI：3.36~120.14，$P=0.001$）均是TLIF术后假关节形成的独立预测因素（表4）。

五、预测模型的构建与验证

根据表4中的Logistic回归模型相关系数，构建出相应的预测方程为：

$$In(\frac{p}{1-p}) = -21.43 + 2.87 \times 骨质疏松症 + 2.56 \times 吸烟史 + 3.22 \times \triangle MDH + 3.00 \times \triangle SSA + 1.03 \times \triangle ISA$$

利用R软件“rms”包，将上述预测方程转化为更为直观的Nomogram模型（图3）。使用者可通过对应轴线获取各因子分值并累加总分，最终在底部风险刻度尺上直接读取个体化风险概率，例如总分140分对应约60%的假关节形成风险。

模型的验证结果显示其具有优异的预测效能。通过ROC评估（图4），模型的AUC达0.97（95% CI：0.94~1.00），表明其区分高风险与低风险患者的能力接近理想水平。校准曲线进一步证实模型预测风险与实际观测风险高度吻合（图5），偏差校正曲线紧贴理想曲线（平均绝对误差仅0.018），且Hosmer-Lemeshow检验显示无显著差异（$\chi^2=0.797$，$P=0.992$），说明模型校准度良好。DCA曲线从临床实用性角度验证了该模型的价值（图6）：当临床医师设定的高风险阈值概率在0.2~0.8区间时，应用该模型进行风险分层决策可显著提升净获益率，凸显其指导临床精准干预的潜力。

讨　论

TLIF作为治疗腰椎退行性疾病的常用术式，其

术后假关节形成是影响预后结局的关键并发症。本研究通过回顾性分析182例患者数据，证实骨质疏松症、吸烟史、△MDH及△SSA是TLIF术后假关节形成的独立风险因素（OR值：12.95~25.08）。这些因素通过干扰骨融合的生物学进程与生物力学稳定性，共同导致融合失败。

表2 两组患者的临床特征和手术相关因素比较（$\bar{x}\pm s$）

指标	假关节形成组（17例）	融合良好组（165例）	$\chi^2(t)$值	P值
性别/例(%)				
男	7(41.18)	73(44.24)	0.059	0.808
女	10(58.82)	92(55.76)		
年龄/岁	57.89±10.55	59.56±10.42	−0.628	0.530
BMI/(kg·m^{-2})	25.03±3.71	24.96±3.82	0.072	0.943
Alb/(g·L^{-1})	39.87±3.42	40.36±3.71	−0.522	0.602
ALP/(U·L^{-1})	82.64±17.83	80.76±16.54	0.443	0.658
骨质疏松症/例(%)	10(58.82)	27(16.36)	14.634	<0.001
吸烟史/例(%)	9(52.94)	35(21.21)	6.822	0.009
糖尿病/例(%)	3(17.65)	19(11.52)	0.121	0.728
含L_5/S_1节段/例(%)	9(52.94)	81(49.09)	0.091	0.762
融合节段数/例(%)				
单节段	13(76.47)	123(74.55)	0.548	0.760
双节段	3(17.65)	37(22.42)		
三节段	1(5.88)	5(3.03)		
融合器类型/例(%)				
PEEK	11(64.71)	92(55.76)	0.502	0.478
钛合金	6(35.29)	73(44.24)		
植骨材料/例(%)				
自体骨	8(47.06)	86(52.12)	0.158	0.691
混合植骨[a]	9(52.94)	79(47.88)		
螺钉固定方式/例(%)				
单皮质固定	9(52.94)	123(74.55)	2.607	0.106
双皮质固定	8(47.06)	42(25.45)		

注：[a]表示术中自体骨与同种异体骨混合植骨

一、风险因素的影响机制

骨质疏松症作为最显著的风险因子（OR=17.61），其病理基础在于骨代谢的严重失衡。研究表明，骨质疏松症患者骨髓微环境中RANKL/OPG信号轴失调，导致破骨细胞过度活化，显著加速植骨区的骨吸收[6-7]；同时，骨髓脂肪浸润取代正常造血组织，减少骨髓间充质干细胞（bone marrow mesenchymal stem cells，BMSCs）与血管内皮祖细胞数量，损害植骨床的血管化能力[8]。这种生物学环境的恶化，结合椎弓根螺钉把持力下降引发的“应力屏蔽效应”，共同抑制了骨-植入物界面的融合[9-10]。本研究中，假关节形成组骨质疏松比例高达58.82%，远高于融合良好组（16.36%），提示临床需将术前骨密度筛查列为TLIF患者的常规评估项目。对于骨质疏

表3 两组患者的影像学参数比较[$M(P_{25}, P_{75})$]

指标	假关节形成组（17例）	融合良好组（165例）	Z值	P值
△MDH/mm	2.50(2.10, 2.90)	1.80(1.40, 2.20)	3.688	<0.001
△SSA/°	3.30(2.90, 3.60)	2.00(1.40, 2.60)	4.942	<0.001
△ISA/°	2.50(2.00, 2.80)	2.10(1.50, 2.50)	1.799	0.072
△SLA/°	2.58(1.89, 2.71)	2.73(1.94, 3.57)	1.351	0.177
△TIH/mm	3.01(2.63, 3.28)	2.64(2.00, 3.23)	1.289	0.198
△CHPC/%	2.79(1.84, 3.74)	3.03(1.92, 3.94)	0.522	0.602
△SHPC/%	2.65(2.05, 3.85)	2.96(2.06, 3.78)	0.375	0.708

表4 TLIF术后假关节形成的多因素Logistic回归分析

变量	β	SE	Z	P值	OR值	95% CI
骨质疏松症	2.87	0.98	2.94	0.003	17.61	2.60~119.45
吸烟史	2.56	0.95	2.70	0.007	12.95	2.01~83.35
△MDH	3.22	1.06	3.05	0.002	25.08	3.16~199.02
△SSA	3.00	0.91	3.29	0.001	20.08	3.36~120.14
△ISA	1.03	0.65	1.59	0.112	2.81	0.79~10.06

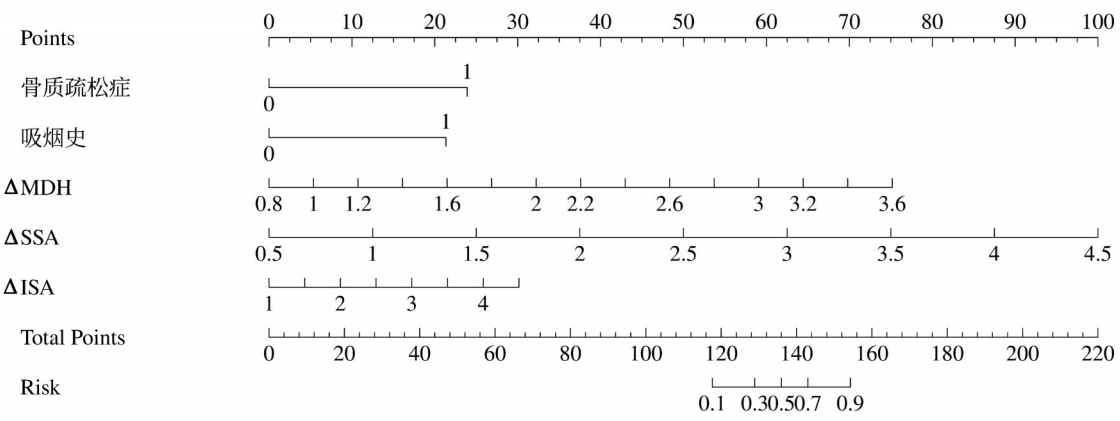

图3 TLIF术后假关节形成的Nomogram预测模型

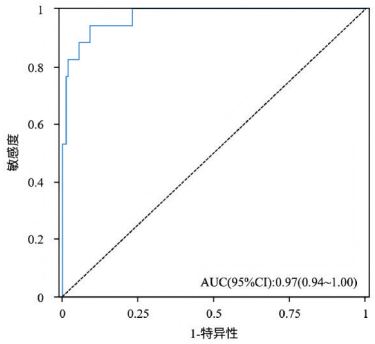

图4　ROC曲线

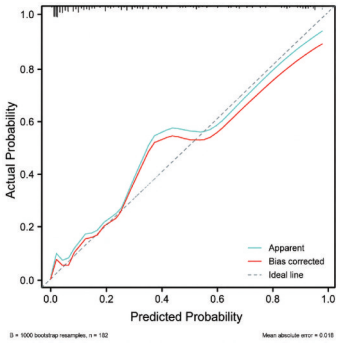

图5　校准曲线

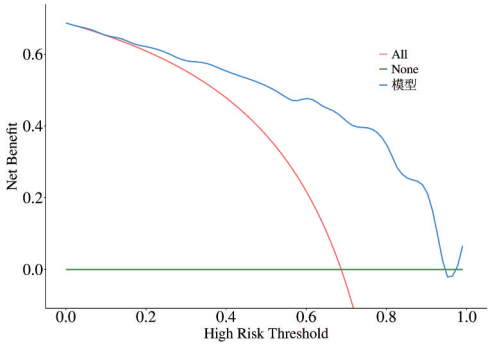

图6　DCA曲线

松症患者，围手术期应采用针对性药物治疗，双膦酸盐（如唑来膦酸）可有效抑制破骨活性，而成骨促进剂特立帕肽则能刺激BMSCs分化，加速融合进程[11]；在手术技术上，可改用骨水泥强化螺钉或追加后外侧植骨以增强稳定性[12]。

Luca等[13]指出，吸烟是影响TLIF手术疗效的一项明确因素，吸烟越多则患者术后2年内的疼痛缓解越少、总体疗效越差。本研究中，吸烟史是影响TLIF术后假关节形成的重要风险因子（OR=12.95），Silcox等[14]早在1995年证实了这一点。尼古丁激活α7-烟碱受体介导微血管痉挛，使植骨区毛细血管密度下降40%以上，导致移植物缺血性坏死[15]；同时，尼古丁抑制了BMSCs的成骨分化能力[16]。此外，吸烟诱导的慢性炎症状态上调肿瘤坏死因子α（TNF-α）、白细胞介素-1β（IL-1β）等因子[17]，促进植骨区纤维化瘢痕形成。本研究观察到假关节组52.94%的患者有吸烟史，与Phan等[18]报道的吸烟者融合率降低15.5%的现象一致。因此，强制性戒烟干预应贯穿整个围手术期：术前至少8周完全戒烟以确保尼古丁代谢清除，术后维持6个月以上。

△MDH作为TLIF术后假关节形成的重要预测因子（OR=25.08），其机制涉及生物力学与生物学反应的恶性循环：一方面，术中过度撑开椎间隙会使融合器内植骨块承受异常剪切应力，激活破骨细胞加速骨吸收[19]；另一方面，术后早期高度丢失>2 mm（假关节组中位数为2.50 mm）导致融合器-终板接触面积减小，界面微动阻碍骨长入[20]。这种改变还可能继发椎间孔狭窄，神经根受压引起的疼痛进一步限制功能锻炼，形成阻碍骨愈合的负反馈。这一发现提示，术中应避免盲目追求椎间隙高度的恢复。对于术后发现△MDH>2 mm的患者，建议延长硬质腰围佩戴时间至6个月，并限制屈伸活动。

△SSA同样被确认为独立预测因子（OR=20.08）。△SSA反映了术后螺钉角度的动态变化，如松动或移位，可能导致融合节段的不稳定微动，从而干扰骨愈合过程，增加纤维性愈合而非骨性融合的风险[21]；这种角度的变化还可能改变椎弓根螺钉-棒系统的载荷分布，导致融合器或植骨区应力集中，抑制成骨细胞的活性。此外，SSA的变化可能提示椎间高度或终板对合关系的改变，影响植骨床的接触压力和血供，进而降低骨融合率[22]。从手术技术角度看，较大的△SSA可能反映初始螺钉置入位置不佳，如过度偏斜或深度不足，导致骨-螺钉界面松动或融合器位置偏移，减少有效融合面积[23]。生物力学的不稳定还可能引发慢性炎症反应，促进纤维瘢痕形成，并激活破骨细胞活性，抑制成骨分化，最终导致植骨融合失败、假关节形成。

二、Nomogram预测模型的性能与临床实用价值

本研究基于上述Logistic回归分析的风险因子和回归系数，构建的Nomogram预测模型整合了骨质疏松症、吸烟史、术后△MDH及△SSA等独立风险因素，实现了对TLIF术后假关节形成风险的个体化量化评估。该模型在内部验证中展现出卓越性能：通过其ROC曲线的AUC=0.97证实其区分能力处于优秀水平；校准曲线与Hosmer-Lemeshow检验（P=0.992）表明模型预测风险与实际观察风险高度一致，尤其在高风险区间未出现明显偏差；DCA分析进一步证实，当临床阈值概率设定于0.2~0.8范围时，应用该模型可显著提升干预净获益率。

该模型的临床价值在于动态捕捉生物力学失稳的早期信号。△MDH与△SSA作为术后3个月的关键影像学预警指标，较传统静态参数更能敏感地反映融合进程中的异常变化，为干预提供关键时间窗。基于Nomogram总分可将患者分层管理：低危者（风险<10%）减少过度随访；中高危者则实施针对性干预——强化抗骨质疏松治疗及严格戒烟≥8周，术中采用骨水泥螺钉或斜行融合器优化生物力学稳定性，术后延长腰围制动并加密影像监测。尽管当前

模型受限于单中心回顾性设计及样本量，其整合动态影像参数的创新思路为未来构建多维度的预测体系奠定了基础，后续将通过多中心前瞻性研究进一步优化临床转化路径。

三、本研究的不足与小结

本研究存在一些局限性需予以说明。首先，作为单中心回顾性分析，样本量相对有限（假关节组仅17例），对于亚组（如三节段融合、严重骨质疏松）的分析能力较弱，可能导致部分潜在风险因素被遗漏，且难以进行组内有症状与无症状患者的影像-临床症状关联分析；本研究的预测模型未进行外部验证，结论的普适性有待多中心、大样本的前瞻性研究进一步证实。其次，尽管模型整合了关键影像动力学参数（△MDH与△SSA），但尚未纳入Ⅰ型前胶原氨基端前肽（PINP）、β胶原特殊序列（β-CTX）等血清骨代谢标志物及基因多态性等潜在生物学预测因子，未来需构建“影像-生物学”多维预测体系以提升精度。此外，术后△MDH与△SSA的测量依赖人工判读，可能存在观察者间差异。

综上所述，本研究通过系统分析TLIF术后假关节形成的风险因素，建立并验证了整合骨质疏松症、吸烟史、△MDH及△SSA的Nomogram预测模型。该模型在内部验证中表现出优异的区分度、校准度及临床实用性，为早期识别高风险患者提供了量化工具。未来研究可通过多中心合作完善模型，并推动其向智能化临床决策支持系统的转化。

参 考 文 献

[1] Wang Z, Wang J, Jin C, et al. Development and validation of a risk prediction model for pseudarthrosis following transforaminal lumbar interbody fusion: A retrospective analysis[J]. World Neurosurg, 2025, 193: 636-646.

[2] Zhong J, Tareen J, Ashayeri K, et al. Does bone morphogenetic protein use reduce pseudarthrosis rates in single-level transforaminal lumbar interbody fusion surgeries?[J]. Int J Spine Surg, 2024, 18(2): 207-216.

[3] Morgenstern C, Morgenstern R. Full-endoscopic removal of migrated and pseudoarthrotic lumbar interbody cages: Case reports and technical note[J]. Int J Spine Surg, 2023, 17(3): 370-379.

[4] Derman PB, Singh K. Surgical strategies for the treatment of lumbar pseudarthrosis in degenerative spine surgery: A literature review and case study[J]. HSS J, 2020, 16(2): 183-187.

[5] 游卓华, 郭新虎, 李危石. 腰椎后路融合术后假关节形成的研究进展[J]. 中华骨与关节外科杂志, 2025, 18(5): 456-461.

[6] De Leon-Oliva D, Barrena-Blázquez S, Jiménez-Álvarez L, et al. The RANK-RANKL-OPG system: A multifaceted regulator of homeostasis, immunity, and cancer[J]. Medicina, 2023, 59(10): 1752.

[7] Cheng CH, Chen LR, Chen KH. Osteoporosis due to hormone imbalance: An overview of the effects of estrogen deficiency and glucocorticoid overuse on bone turnover[J]. Int J Mol Sci, 2022, 23(3): 1376.

[8] Wu S, Ohba S, Matsushita Y. Single-cell RNA-sequencing reveals the skeletal cellular dynamics in bone repair and osteoporosis[J]. Int J Mol Sci, 2023, 24(12): 9814.

[9] Kammien AJ, Galivanche AR, Joo PY, et al. Comparison of postoperative outcomes in patients with and without osteoporosis undergoing single-level anterior cervical discectomy and fusion[J]. N Am Spine Soc J, 2022, 12: 100174.

[10] Paxinos O, Tsitsopoulos PP, Zindrick MR, et al. Evaluation of pull-out strength and failure mechanism of posterior instrumentation in normal and osteopenic thoracic vertebrae[J]. J Neurosurg Spine, 2010, 13(4): 469-476.

[11] 杨崇正, 刘衡, 吴志浩, 等. 特立帕肽序贯地舒单抗或唑来膦酸治疗OVCF患者的疗效比较[J]. 中国骨质疏松杂志, 2024, 30(8): 1180-1192.

[12] 张诗爽, 魏梦诚, 蔡磊, 等. 骨水泥强化椎弓根螺钉治疗多节段腰椎退行性疾病伴严重骨质疏松症的中期疗效[J]. 骨科, 2025, 16(2): 109-114.

[13] Luca A, Mannion AF, Grob D. Should smoking habit dictate the fusion technique?[J]. Eur Spine J, 2011, 20(4): 629-634.

[14] Silcox DH, Daftari T, Boden SD, et al. The effect of nicotine on spinal fusion[J]. Spine (Phila Pa 1976), 1995, 20(14): 1549-1553.

[15] Bonfante S, Bosco AF, Luize DS, et al. Influence of nicotine on healing process of autogenous bone block grafts in the mandible: A histomorphometric study in rats[J]. Int J Oral Maxillofac Implants, 2008, 23(3): 437-444.

[16] Tie K, Wu M, Deng Y, et al. Histone hypo-acetylation of Sox9 mediates nicotine-induced weak cartilage repair by suppressing BMSC chondrogenic differentiation[J]. Stem Cell Res Ther, 2018, 9(1): 98.

[17] Derella CC, Tingen MS, Blanks A, et al. Smoking cessation reduces systemic inflammation and circulating endothelin-1[J]. Sci Rep, 2021, 11(1): 24122.

[18] Phan K, Fadhil M, Chang N, et al. Effect of smoking status on successful arthrodesis, clinical outcome, and complications after anterior lumbar interbody fusion (ALIF)[J]. World Neurosurg, 2018, 110: e998-e1003.

[19] Lu X, Li D, Wang H, et al. Biomechanical effects of interbody cage height on adjacent segments in patients with lumbar degeneration: a 3D finite element study[J]. J Orthop Surg Res, 2022, 17(1): 325.

[20] Pisano AJ, Fredericks DR, Steelman T, et al. Lumbar disc height and vertebral Hounsfield units: Association with interbody cage subsidence[J]. Neurosurg Focus, 2020, 49(2): E9.

[21] Louie PK, Kumar R, Bansal A, et al. Are variable screw angle change and screw-to-vertebral body ratio associated with radiographic subsidence following anterior cervical discectomy and fusion?[J]. Global Spine J, 2025, 15(3): 1582-1591.

[22] Çetik RM, Glassman SD, Dimar JR, et al. Immediate postoperative change in the upper instrumented screw-vertebra angle is a predictor for proximal junctional kyphosis and failure[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2025, 50(5): 304-310.

[23] Noriega DC, Eastlack RK, Hernández GL, et al. Does the interfacing angle between pedicle screws and support rods affect clinical outcomes after posterior thoracolumbar fusion? A retrospective clinical study[J]. Spine J, 2024, 24(1): 125-131.

（收稿日期：2025-07-23）

（本文编辑：陈姗姗）

引用格式

高升, 孙军战, 袁伟, 等. 经椎间孔腰椎椎体间融合术后出现假关节形成的风险因素分析及预测模型的构建与验证[J]. 骨科, 2026, 17(4): 343-349. DOI:10.3969/j.issn.1674-8573.2026.04.007.