

中国骨质疏松性椎体压缩骨折椎体强化术后残余痛风险预测模型的 meta 分析

常梦静^{1,2}, 崔琳^{1,3}✉, 郑雪梅^{2,4}, 盛珺², 刘达², 廖冬发²

【摘要】目的 系统评价中国骨质疏松性椎体压缩骨折椎体强化术后残余痛风险预测模型,为临床提供参考依据。**方法** 检索中国知网、万方、中国生物医学文献、维普、PubMed、Web of Science、Cochrane Library 和 EMBASE 等中英文数据库,检索时限为建库至 2025-05-31,由 2 名研究者独立进行文献的筛选和资料的提取,采用预测模型偏倚风险评估工具(PROBAST)对文献进行质量评价,并使用 RevMan 5.4 软件对高频预测因子进行 Meta 分析。**结果** 共纳入 24 篇文献,包括 33 个预测模型,样本量为 45~610 例,纳入模型的 C-index 为 0.774~0.94,受试者操作特征曲线下面积为 0.70~0.94。PROBAST 结果显示,纳入的风险预测模型整体适用性较好,但偏倚风险较高,与研究对象的数据来源、结局评估的盲法控制、缺失数据的处理及模型性能评估不完善等有关。**结论** 筋膜损伤、椎体内真空裂隙、骨水泥分布、骨密度为共同的高频预测因子,临床工作者应重点关注。我国骨质疏松性椎体压缩骨折椎体强化术后残余痛风险预测模型尚存在不足,未来应进一步提高相关模型研究的质量并加强模型的外部验证与临床适用性研究。

【关键词】 骨质疏松性椎体压缩骨折;椎体强化术;残余痛;风险预测模型;系统评价;循证护理

【中国图书分类号】 R681

【引用本文】 常梦静,崔琳,郑雪梅,等.中国骨质疏松性椎体压缩骨折椎体强化术后残余痛风险预测模型的 meta 分析[J].武警医学,2026,37(2):123-131.

Meta-analysis of the risk prediction model of residual pain after vertebroplasty for osteoporotic vertebral compression fractures in China

CHANG Mengjing^{1,2}, CUI Lin^{1,3}✉, ZHENG Xuemei^{2,4}, SHENG Jun², LIU Da², and LIAO Dongfa². 1. College of Nursing, Chengdu Medical College, Chengdu 610000, China; 2. Nursing Department, 3. Orthopaedics, General Hospital of PLA Western Theater Command, Chengdu 610000, China; 4. College of Nursing, North Sichuan Medical College, Nanchong 637000, China

【Abstract】 Objective To systematically evaluate the risk prediction models of residual pain after vertebroplasty for osteoporotic vertebral compression fractures in China, and to provide references for clinical practice. **Methods** Relevant studies were retrieved from databases including CNKI, Wanfang Data, Chinese Biomedical Literature Database, VIP Database, PubMed, Web of Science, Cochrane Library, and EMBASE. The search period was from the establishment of the database to May 31, 2025. Two researchers independently screened the literature and extracted the data. The quality of the literature was evaluated using the Prediction Model Risk of Bias Assessment Tool (PROBAST), and a meta-analysis of the high-frequency predictors was conducted using RevMan 5.4 software. **Results** A total of 24 articles were included, including 33 prediction models. The total sample size ranged from 45 to 610 cases. The C-index of the included models was 0.774-0.94, and the area under the receiver operating characteristic curve ranged from 0.70-0.94. The results of the PROBAST showed that the overall applicability of the included risk prediction models was good, but the risk of bias was high, which was related to the data source of the study subjects, the blind control of outcome assessment, the handling of missing data, and the imperfect evaluation of model performance. **Conclusions** Fascial injury, intravertebral vacuum fissure, bone cement distribution, and bone density are common high-frequency predictors. Clinicians should pay special attention to these factors. The risk prediction models for residual pain after vertebral augmentation surgery for osteoporotic vertebral compression fractures in China still have deficiencies. In the future, the quality of related model research should be further improved, and the external validation and clinical applicability research of the model should be strengthened.

【Key words】 osteoporotic vertebral compression fractures; vertebroplasty; residual pain; risk prediction model; systematic review; evidence-based nursing

基金项目:四川省自然科学基金(2022NSFC0664)

作者简介:常梦静,硕士研究生,护士。

作者单位:1. 610000,成都医学院护理学院;610000 成都,西部战区总医院;2. 骨科;3. 护理部;4. 637000 南充,川北医学院护理学院

✉ 通信作者

骨质疏松性椎体压缩骨折(osteoporotic vertebral compression fractures, OVCFs)是骨质疏松症的常见

并发症,主要由椎体骨量减少、骨微结构退化、骨强度降低所致,在有无外力作用下均可能发生^[1]。随着全球人口老龄化加剧,OVCFs的疾病负担日益加重,50岁以上人群的发病率高达30%~50%^[2]。在中国,该趋势尤为显著,每年新增OVCFs患者超过180万,严重影响老年人健康和社会医疗资源^[3]。经皮椎体强化术(percutaneous vertebral augmentation, PVA)具有简单易行、疼痛缓解迅速、创伤小等优势,被广泛用于治疗OVCFs^[4]。然而,临床实践发现,OVCFs患者经手术治疗后残余痛的发生率为5%~32%^[5],我国的发生率普遍高于其他国家,影响患者康复进程和生活质量。近年来,为改善术后预后、识别高风险患者,我国学者构建了多种术后残余痛风险预测模型。但模型在变量选择、建模方法及验证策略上差异较大,预测性能亦不一致,相关证据尚缺乏系统性的综合评价,难以指导临床实践。因此,本研究旨在全面系统检索国内外文献中以中国人群为对象所建立的预测模型,并对其基本特征、模型性能及偏倚风险等进行评价和分析,为临床实践提供更具针对性的循证依据。

1 资料与方法

1.1 检索策略 采用主题词与自由词相结合的方式,系统检索国内外数据库,包括中国知网、万方、中国生物医学文献、维普、PubMed、Web of Science、Cochrane Library 和 EMBASE 数据库,并追溯纳入文献的参考文献以补充相关文献。检索时限为建库至2025-05-31。中文检索词:骨质疏松性椎体压缩骨折、椎体压缩骨折、椎体强化术、椎体成形术、疼痛、残余痛、腰背痛、预测模型、列线图等;英文检索词:osteoporosis vertebralbody compression fracture, OVCFs, Vertebroplasty, kyphoplasty, pain, back pain, predict model, nomograms 等。本研究已在国际化前瞻性系统评价注册数据库(PROSPERO)网站注册(CRD42025635347)。

1.2 纳入与排除标准 纳入标准:(1)研究对象确诊为OVCFs且接受椎体强化术的中国人群;(2)研究内容为OVCFs椎体强化术后残余痛风险预测模型的构建/验证;(3)结局指标为术后出现疼痛;(4)研究类型包括队列研究、病例对照研究和横断面研究。排除标准:(1)非中文或英文;(2)非原创文章(综述、会议摘要、基础实验);(3)无法获取全文或无法提取有效信息;(4)重复发表。

1.3 文献筛选与资料提取 文献筛选与资料提取

过程均由两名经过循证课程学习的研究员独立进行。首先将文献导入NoteExpress软件筛出重复文献,然后根据纳、排标准进行文献筛选,并基于预测模型构建研究数据提取和质量评价清单(CHARMS)^[6]提取内容,包括第一作者、年份、研究设计、样本量、建模方法、预测因子、模型性能、模型呈现形式等。当两名研究员产生不同意见时,与第三名研究员讨论判定是否纳入。

1.4 纳入文献的偏倚风险和适用性评估 本研究采用PROBAST进行文献偏倚风险评价^[7]。PROBAST从研究人群、预测因子、结果及数据分析四个方面对风险预测模型进行偏倚风险评价,共20个信号问题。每个信号问题的答案包括“是”“否”“不清楚”。适用性评价从研究人群、预测因子及结果3个角度进行,评价步骤与偏倚风险评估相似。当两名研究员产生不同意见时,与第三名研究员讨论判定。

1.5 统计学处理 采用RevMan 5.4软件对高频预测因子的预测价值进行Meta分析。异质性通过Q检验和 I^2 统计量评估, $I^2 > 50\%$ 或 $P < 0.1$ 提示存在显著异质性,采用随机效应模型;否则采用固定效应模型。若存在明显异质性,进一步进行敏感性分析、亚组分析或描述性分析。 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 文献筛选流程及结果 初步检索获得相关文献1299篇,剔除重复文献430篇,阅读题目和摘要后剔除724篇,阅读全文,根据纳入和排除标准剔除不符合研究121篇,最终纳入24篇文献,1篇文献因未能提供或允许计算必要的比值比(odds ratio, OR)而被排除^[8],故23篇文献进行Meta分析。

2.2 纳入文献的基本特征 文献发表时间均在近五年(2021-2025),其中中文15篇,英文9篇。4篇为病例对照研究^[9-12],1篇为前瞻性研究^[13],其余为回顾性队列研究,在本研究最终所纳入的33个模型中,统计样本量为45~610例,结局事件数为14~134,残余痛的发生率为9.39%~50.00%。大部分研究均未报告缺失值的处理,2项研究直接删除缺失数据^[8,14]。最终纳入预测模型的因子3~8个,集中于影像学特征、骨水泥相关因素、患者基础状态及手术相关因素,被纳入预测模型频次位于前三位的4个预测因子分别是筋膜损伤(12)、椎体内真空裂隙(10)、骨密度(10)和骨水泥分布(9)。预测模型

的呈现形式为列线图、数学公式、评分系统和网页计算器,列线图展示居多。具体结果见表1。

表1 中国 OVCFs 椎体强化术后残余痛风险预测模型 meta 分析纳入文献的基本特征

作者及发表年份/年	研究对象	研究类型	样本量(建模/验模)/例	结局指标/观察时间	结局事件数量/例	残余痛的发生率/%	EPV	缺失值处理方法	预测因子	模型呈现方式
徐耀等/2024 ^[15]	行 PVP 的患者	回顾性队列研究	136	疼痛缓解不佳/术后 1 d、1 个月	58	42.6	8.3	未报告	①②③④⑤⑥⑦	列线图
王艳等/2024 ^[11]	行 PKP 的老年患者	病例对照研究	101	术后腰背痛/术后 3 个月	43	42.57	10.75	未报告	①⑤⑥⑦	列线图
周圆圆等/2024 ^[10]	行 PVA 的老年患者	病例对照研究	170	术后腰背痛/术后 1 个月	85	50	14.17	未报告	④⑤⑦⑩⑪	公式
Yang 等/2022 ^[16]	行 PKP 的单椎体患者	回顾性队列研究	98/45	术后残余痛/术后 6 个月	19/14	23.08	3.8/2.8	未报告	①⑥⑧⑨⑩	评分系统
Lin 等/2023 ^[17]	行 PKP 的患者	回顾性队列研究	281/126	术后残余痛/术后 1 d、1 周、1 个月、3 个月和 6 个月	47/22	16.73/17.46	9.4/4.4	未报告	③④⑤⑩⑫	列线图
Tu 等/2024 ^[18]	行 PKP 的单椎体患者	回顾性队列研究	186/81	术后残余痛/术后 1 d、1 个月和 3 个月	46	17.22	9.2	未报告	④⑬⑭⑮⑯	列线图
陈思等/2024 ^[19]	行 PVP 的单节段患者	回顾性队列研究	309/94	术后残余痛/术后 3 d、1 个月	29	9.39	5.8	未报告	④⑩⑬⑰⑱	列线图、网页计算器
Liu 等/2021 ^[14]	行 PVP 的患者	回顾性队列研究	208/88	短期复发性疼痛/术后 48 h	83	27.85	27.67	直接删除	③⑧⑳	列线图
Yu 等/2023 ^[20]	行 PKP 的患者	回顾性队列研究	236	术后残余痛/术后 12 个月	30	12.7	6	未报告	⑥⑬⑰⑱⑳㉑	列线图
Wu 等/2024 ^[8]	行 PVP 的患者	回顾性队列研究	610/153	术后残余痛/术后 1 周、2 周、1 个月、3 个月和 1 年	122	16.0	无法计算	直接删除	⑥⑩⑬⑱㉒㉓	热图
Li 等/2021 ^[21]	行 PVP 单节段患者	回顾性队列研究	268	术后残余痛/术后 3 d 和 1 个月	37	13.81	9.25	未报告	⑬⑰⑱㉓	列线图
李军科等/2024 ^[22]	行 PVP 的单节段患者	回顾性队列研究	245	术后残余痛/术后 1 个月	34	13.88	8.5	未报告	④⑬⑰⑱㉓	列线图
Ge 等/2022 ^[13]	行 PKP 的单节段患者	前瞻性队列研究	548/183	术后残余痛/术后 3 d、1 个月	59/22	11.2	14.75/5.5	未报告	④⑤⑬⑱	列线图
舒存洪等/2024 ^[9]	行 PVP 的患者	病例对照研究	120	术后残余痛/未明确表明	60	50	10	未报告	④⑤⑥⑦⑩⑳	列线图
章柯杰等/2024 ^[23]	行 PVP 的患者	回顾性队列研究	120	术后腰背痛/术后 4 周	13	10.83	3.25	未报告	⑬⑰⑱㉓㉔	公式
吴晶晶等/2024 ^[24]	行 PVA 的患者	回顾性队列研究	202	术后残余痛/术后 1 d、1 个月	35	17.33	8.75	未报告	⑦⑩⑰⑱⑳	列线图
裘小康等/2023 ^[25]	行 PVP 的患者	回顾性研究	136	术后疼痛/未明确表明	58	42.65	7.25	未报告	①②③⑤⑥⑦⑱㉔	列线图

(续表)

作者及发表年份/年	研究对象	研究类型	样本量(建模/验模)/例	结局指标/观察时间	结局事件数量/例	残余痛发生率/%	EPV	缺失值处理方法	预测因子	模型呈现方式
田龙等/2023 ^[26]	行PVA的患者	回顾性队列研究	228	疼痛缓解不佳/术后1个月	35	15.35	5	未报告	⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿	列线图
成昌桂等/2023 ^[27]	行PVP的单椎体患者	回顾性队列研究	302	残余腰背痛/术后1个月	43	14.2	10.75	未报告	⑬⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿	列线图
廖邦强等/2023 ^[28]	行PVP的患者	回顾性队列研究	114	术后残余痛/术后1周、4周、3个月、6个月	41	36	10.25	未报告	④⑤⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿	列线图
李东等/2024 ^[29]	行PKP的老年患者	回顾性队列研究	218	疼痛缓解/术后6个月	31	14.22	6.2	未报告	①⑩⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿	列线图
林渺满等/2022 ^[30]	行PVA的单椎体患者	回顾性队列研究	377	术后残余痛/术后1d、出院前、术后3个月、6个月	64	16.98	12.8	未报告	④⑤⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿	列线图
杨森/2024 ^[31]	行PKP的患者	病例对照研究	102	疼痛缓解程度	31	30.39	10.33	未报告	①⑤⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿	列线图
Lu等/2025 ^[12]	行PKP的患者	回顾性队列研究	208/54	疼痛缓解	66	31.73	16.5	未报告	⑥⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿	列线图

注:OVCFs. 骨折疏松性椎体压缩骨折;PVP. 经皮椎体成形术;PKP. 经皮椎体后凸成形术;EPV. 变量发生事件数;①年龄;②美国麻醉医师协会分级(ASA);③吸烟;④胸腰筋膜损伤(TLFI);⑤骨密度(BMD);⑥骨水泥注入量;⑦骨水泥渗漏;⑧骨折部位(胸椎/腰椎/混合);⑨骨折类型[OF分型];⑩后凸畸形;⑪小关节损伤(FJI);⑫骨水泥未覆盖骨折线;⑬椎体内裂隙症(IVC);⑭棘间韧带退变;⑮肌肉减少症;⑯骨折至手术时间;⑰康复依从性;⑱既往腰伤史;⑲骨水泥分布类型(完全/不完全);⑳文化程度;㉑骨折严重程度[Genant半定量分型];㉒心理;㉓是否规范抗骨质疏松治疗;㉔骨水泥-椎体百分比[注入伤椎骨水泥体积/伤椎体积];㉕皮质断裂;㉖椎体骨折数量;㉗椎旁肌变性(Goutallier分级);㉘术前Cobb角;㉙放射评分;㉚椎体高度恢复情况;㉛短期并发症;㉜实施早期干预;㉝高血小板/淋巴细胞比值(PLR);㉞合并症;㉟中枢神经系统(CNS)药物使用。

2.3 纳入模型的验证方法及性能评价 在模型构建方面,仅文献[8]采用机器学习的方法建立预测模型,其余均采用 logistic 回归或 LASSO 回归分析建立模型。受试者操作特征曲线下面积(area under the curve, AUC)与 C-index 的取值范围均为 0.5~1,数值越接近 1,表明模型的区分能力越强^[32]。整体来看,模型的判别能力处于较高水平,AUC 或 C-index 多介于 0.80~0.93,其中王艳等^[11]构建的模型在 0.94 以上。模型校准度普遍良好,多数研究报告了 Hosmer-Lemeshow 检验($P>0.05$)或校准曲线显示拟合满意;Brier 用于衡量模型对观测结果与真实结果之间的差异程度,取值范围 0~0.25,越接近 0 表示模型预测准确性越高^[32],Wu 等^[8]的研究应用 Brier 分数来量化模型的校准性能。部分研究提供了敏感度与特异度,通常在 80%左右。在模型验证方面,文献[8,12,13,16-19]对模型进行了内外部验证,文献[23,27]未对模型进行验证,其余文献仅进行了内部验证。总体来看,多数研究采用 Boot-

strap、随机拆分、交叉验证等方式完成内外部验证;采用时段验证完成外部验证。大部分研究采用决策曲线分析(DCA)作为可视化工具来评估预测模型的临床效用。

2.4 高频预测因子 meta 分析结果 Meta 分析前,对纳入研究的偏倚风险及适用性进行了系统评价。总体来看,大多数研究在研究对象、预测因子、结局评估及数据分析方面存在偏倚风险,主要来源包括未使用合适的数据来源、预测因子定义不统一、缺乏盲法评估及数据处理不恰当。部分模型未充分报告模型建立流程、变量选择方法及样本量不合理,导致模型的偏倚风险偏高。此外,由于研究人群多来自单中心或特定地区,其适用性存在一定局限。目前研究的偏倚风险对 Meta 分析结果的解释具有一定影响,但不影响本系统评价的主要方向和结论。本研究在不考虑手术方式及随访时间等因素的影响的前提下,对出现频次前三位的预测因子(筋膜损伤、椎体内真空裂隙、骨密度和骨水泥分布)进行 Meta

分析。

2.4.1 筋膜损伤 12项研究认为筋膜损伤具有预测价值,各研究之间存在异质性($P < 0.001, I^2 = 77%$),采用随机效应模型分析,结果显示,筋膜损伤是OVCFs椎体强化术后残余痛的独立危险因素($OR = 4.40, 95\% CI: 2.70 \sim 7.17, Z = 5.96, P < 0.001$,

图1)。因异质性 $\geq 50%$,进行敏感性分析,去除引起异质性的研究^[15],其余11项研究不存在异质性($P = 0.55, I^2 = 0%$),采用固定效应模型分析,结果显示,筋膜损伤是OVCFs椎体强化术后残余痛的独立危险因素($OR = 4.79, 95\% CI: 3.62 \sim 6.35, Z = 10.92, P < 0.001$)。

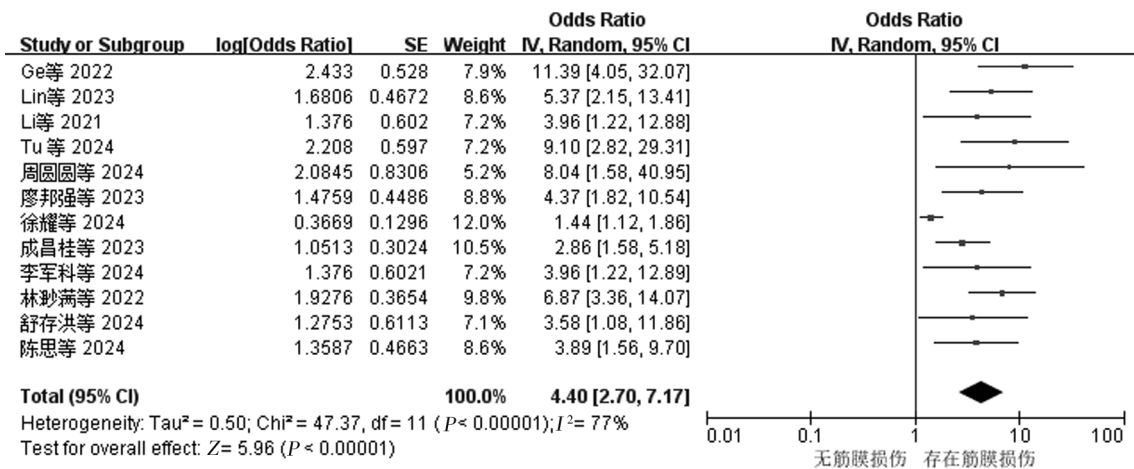


图1 筋膜损伤对OVCFs术后残余痛影响的meta分析森林图

OVCFs. 骨质疏松性椎体压缩骨折

2.4.2 椎体内真空裂隙 10项研究认为椎体内真空裂隙具有预测价值,各研究之间存在异质性($P = 0.03, I^2 = 52%$),采用随机效应模型分析,结果显示,存在椎体内真空裂隙与术后发生残余痛显著增加相关($OR = 3.00, 95\% CI: 2.08 \sim 4.33, Z = 5.87, P < 0.001$,图2)。因异质性 $\geq 50%$,进行敏感性分

析,去除引起异质性研究^[24],其余9项研究不存在异质性($P = 0.9, I^2 = 0%$),采用固定效应模型分析,结果显示,椎体内真空裂隙是OVCFs椎体强化术后残余痛的预测因素($OR = 3.38, 95\% CI: 2.5 \sim 4.57, Z = 7.94, P < 0.001$)。

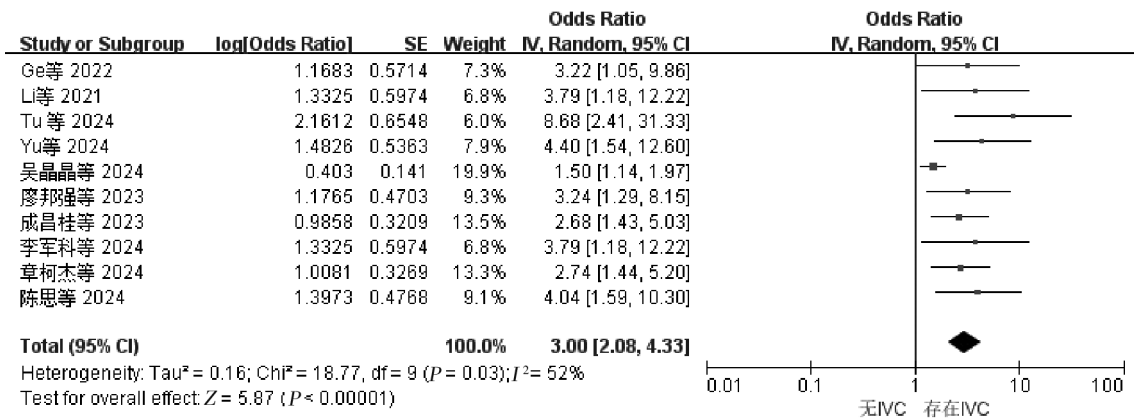


图2 椎体内真空裂隙对OVCFs患者术后残余痛影响的meta分析森林图

OVCFs. 骨质疏松性椎体压缩骨折

2.4.3 骨密度 10项研究认为骨密度具有预测价值,其中7项将骨密度作为连续变量处理,3项作为二分类变量处理。在连续变量组中,Meta分析结果显示骨密度每下降1单位与残余痛风险显著增加相关($OR = 0.14, 95\% CI: 0.05 \sim 0.40, Z = 3.68, P < 0.001$);在二分类变量组中,低骨密度相比高骨密度显著增加残余背痛风险($OR = 2.14, 95\% CI: 1.93 \sim 2.37, Z = 14.71, P < 0.001$)。两组分析结果方向一致,均提示骨密度较低是术后残余背痛的危险因素,但由于变量处理方式不同,未将两组结果合并。

2.4.4 骨水泥分布 鉴于不同研究对骨水泥分布的分类方法不完全一致,本研究采用“骨水泥分布不完全”VS“理想分布”作为统一分析标准(分布不完全:团块状、O型、未覆盖骨折线;分布理想:海绵状、H型、覆盖骨折线)。9项研究认为骨水泥分布具有预测价值,各研究之间不存在异质性($P = 0.13, I^2 = 36\%$),采用固定效应模型分析结果显示,骨水泥分布不完全是OVCFs椎体强化术后残余痛的预测因素($OR = 1.93, 95\% CI: 1.61 \sim 2.30, Z = 7.24, P < 0.001$)。

3 讨 论

3.1 预测模型总体偏倚风险偏高 当前OVCFs椎体强化术后残余痛风险预测模型偏倚风险的主要来源为:(1)研究设计局限性,纳入的多篇研究均为单中心回顾性研究,由于数据收集非预设,受限于现有病历资料,可能存在暴露与结局信息记录不全、选择性报告、未控制混杂因素及难以控制暴露测量与结局评估的一致性等问题。(2)样本量与事件数不足,多数研究变量发生事件数(events per variable, EPV)接近或低于推荐标准($EPV \geq 10$)。事件数不足易导致回归模型出现过拟合现象,降低预测结果的稳定性和泛化能力。(3)预测因子筛选方法存在偏倚,部分研究采用单变量分析筛选变量,可能会忽略变量间交互作用、多重共线性及临床相关性,增加模型的不稳定性及潜在偏倚。(4)缺失数据处理不规范或未明确说明,纳入文献均未提及缺失数据的处理方法,如直接删除或默认完整数据分析,可能导致选择性偏倚,影响最终模型的效度。(5)内部验证方法有限且缺乏外部验证,模型的跨中心推广性与普适性尚未得到验证,存在高估预测性能的风险。(6)预测变量及结局未采用盲法,存在潜在的信息偏倚与观察者偏倚风险。因此,后续的预测模型开

发或验证应严格参照风险预测模型报告规范,参考PROBAST或TRIPOD^[33]完整清晰报告预测模型各方面的信息,尽量减少模型偏倚风险,以更好地预测术后残余痛的发生。

3.2 预测因子的有效性 胸腰筋膜损伤是出现频率最高的预测因子,其致痛机制是筋膜结构破坏导致炎症介质释放,刺激富含痛觉神经末梢的组织。一项Meta分析证实了胸腰筋膜损伤与术后疼痛之间存在独立关系,患筋膜损伤患者发生术后残余痛的风险是无损伤者的4倍以上($OR: 4.79$)^[34]。由于胸腰筋膜损伤引起的疼痛常被OVCFs引起的急性和剧烈疼痛所掩盖,故术前应常规检查筋膜状况以提高疗效预测准确性。临床上,术中实施胸腰筋膜间阻滞及术后加强物理治疗与肌稳定性训练可促进筋膜功能恢复,可能有助于减轻早期术后疼痛。

椎体内真空裂隙(intravertebral vacuum cleft, IVC)是OVCFs中因骨坏死或假关节形成导致的特殊病理改变。其存在会影响骨水泥的分布与渗透,导致应力分布异常、椎体不稳,椎体内的真空现象会刺激周围组织,引发疼痛^[35]。研究发现,与无IVC的患者相比,IVC阳性患者骨水泥分布评分显著降低($P < 0.05$)。骨水泥在裂隙周围易形成团块状或不均匀的“固体模式”分布,无法在椎体内形成均匀的应力支撑。这种不稳定的力学环境会导致椎体微动,刺激神经末梢,成为术后持续性疼痛的直接原因。因此,术中应特别关注IVC阳性患者骨水泥的分布质量,并在术后严密随访,以预防和及时处理因椎体不稳所导致的疼痛。

本研究采用基于形态学(海绵状/团块状)、连接性(O型/H型)及骨折线覆盖情况三种分类体系评估骨水泥分布^[36]。现有证据一致显示,骨水泥的均匀、连续和充分弥散与更佳的术后疼痛缓解密切相关^[37-39]。海绵状分布可增强骨水泥与骨小梁的接触面积,使椎体获得均匀支撑,显著降低术后早期和远期的疼痛评分;相反,团块状分布易导致局部刚度峰值,产生应力集中并增加残余痛风险。H型分布可更好维持双侧生物力学平衡,减少骨水泥-骨界面微动,而骨折线是否被充分覆盖直接影响断裂面稳定性,对防止椎体再次塌陷尤为关键。然而,目前分型标准仍未统一,变量定义不一致也导致预测模型间异质性较大。未来需构建较为统一的骨水泥分布评价体系,以提高模型的可用性和可比性。

骨密度是衡量骨骼强度、预测骨折风险的一个重要指标。赖泽鹏等^[40]基于全球疾病负担数据的

研究显示,我国 50 岁以上人群因低骨密度导致的骨折发病率呈持续上升趋势,表明骨质疏松相关骨折的整体负担持续加重。低骨密度不仅反映骨小梁稀疏和骨结构退化,也影响骨水泥的嵌合效果和加固持久性,使椎体在增强后仍可能存在微动或局部应力集中,产生持续性疼痛^[41]。研究发现,骨密度每下降 1 个标准差,脊椎骨折风险增加 1.5~2 倍^[42]。为降低低骨密度患者术后疼痛风险,应在术前术后全程进行积极的骨代谢干预,如使用抗骨质疏松药物、增加钙和维生素 D 的摄入等。

本研究发现,当前预测模型多聚焦于影像学和手术相关变量,对手术时机、年龄、心理状态及术后康复依从性等临床因素纳入不足,限制了模型的实践解释力和适用性。一项纳入 930 例 OVCFs 患者的系统评价结果表明,PVA 的手术时机与术后残余痛相关^[43],早期 PKP 干预相较于延迟干预可实现相当或更优的术后疼痛缓解,且不增加骨水泥渗漏风险,同时降低相邻椎体骨折发生率,若骨折至手术时间过长可能导致畸形固定与软组织损伤加重,压迫邻近组织从而增加持续性疼痛风险;高龄患者因骨质衰弱及恢复能力下降,且更易受心理作用影响,自觉疼痛加重^[25];实施早期康复干预是术后残余痛的保护因素,而术后康复不足会导致肌肉功能下降和疼痛延迟缓解^[11];近年系统综述和随机研究提示,术后短期使用支具可在急性期减轻疼痛并提升活动^[44,45],但支具的长期效果证据不足,是否常规用于 PVA 术后仍需更多高质量试验验证^[46]。然而,现有模型对这些临床因素纳入不足,未来模型构建应更加重视生物-心理-社会多维度变量,建议纳入可量化的时间变量、心理评估工具及康复指标,以提高预测准确性和临床可用性。

3.3 OVCFs 椎体强化术后残余痛风险预测模型的开发及应用建议 OVCFs 椎体强化术后残余痛风险预测模型作为临床决策辅助工具,其核心价值在于识别高风险个体并指导精准化护理干预。未来可从以下几方面优化模型:(1)建议进行前瞻性、大样本、多中心研究,提高模型适用性。(2)纳入充足的样本量。有研究指出,当结果事件的数量达到预测因子数量的 20 倍时,所构建的模型将具备较高的说服力^[47]。同时有学者建议在进行模型验证时至少包括 100 名有结果的参与者,避免数据的有偏估计^[48]。(3)在变量筛选方面,避免仅基于单因素 logistic 回归分析,可借助数据挖掘技术(如机器学习算法)探索与 OVCFs 患者椎体强化术后残余痛发

生相关的潜在复杂因素。(4)PROBAST 建议采用多重插补法进行缺失值的处理,可减少因缺失数据引起的偏倚和误差,提高研究结果的可靠性^[49]。如果缺失数据对分析目标的影响较小,也可以选择忽略这些数据,但须在报告中明确说明。(5)选择独立且具代表性的验证队列进行外部验证,评估模型的稳定性与普适性。(6)详细说明候选预测变量的定义和测量方法,疼痛结局应由盲法评估者收集。

本研究虽对 OVCFs 椎体强化术后残余痛风险预测模型进行了较为全面的系统评价,但仍不可避免地存在一些局限性:(1)受限于文献纳入排除标准,仅纳入我国 OVCFs 椎体强化术后残余痛风险预测模型,但不同地区人群的骨密度基线水平、手术操作规范、术后护理模式及疼痛评估标准可能存在差异,可能影响预测模型的普适性;(2)仅对排名前三的预测因子进行了 Meta 分析,可能对预测结局有影响;(3)纳入研究中对术后残余痛的定义和随访时间存在异质性,可能对模型性能和预测因子筛选带来影响。

综上,本研究通过系统检索共纳入 24 篇 OVCFs 椎体强化术后残余痛风险预测模型研究,采用 PROBAST 对纳入研究进行偏倚风险及适用性评价发现,纳入的模型具有良好的区分度及适用性,但模型存在高偏倚风险,主要源自回顾性设计、样本和事件数不足、变量筛选方法学问题、缺失数据管理不当、验证体系不完整、结局异质性及主观评估标准不一等多方面因素。未来研究应针对这些不足,整合多源数据、优化建模方法,结合临床实际,大力推动外部验证以提高模型的性能;同时,临床工作者在选择模型时,应根据患者的具体情况和实际需求,综合考虑各种因素,选择最适合的风险预测模型,为 OVCFs 患者提供更精准、优质的医疗服务。

【参考文献】

- [1] 王光超,杨立利,杨长伟,等. 骨质疏松性椎体压缩骨折骨修复策略专家共识(2024版)[J]. 临床外科杂志, 2024, 32(4): 442-448.
- [2] 杨惠林. 骨质疏松性椎体压缩骨折诊治的热点问题与思考[J]. 中华创伤骨科杂志, 2023, 25(1): 14-18.
- [3] Si L, Winzenberg T M, Jiang Q, et al. Projection of osteoporosis-related fractures and costs in China: 2010-2050[J]. Osteoporos Int, 2015, 26(7): 1929-1937.
- [4] Hoyt D, Urits I, Orhurhu V, et al. Current concepts in the management of vertebral compression fractures[J].

- Curr Pain Headache Rep, 2020, 24(5): 1-10.
- [5] Yang X G, Dong Y Q, Liu X, *et al.* Incidence and prognostic factors of residual back pain in patients treated for osteoporotic vertebral compression fractures: a systematic review and meta-analysis[J]. Eur Spine J, 2024, 33(12): 4521-4537.
- [6] Moons K G M, De Groot J A H, Bouwmeester W, *et al.* Critical appraisal and data extraction for systematic reviews of prediction modelling studies: the CHARMS checklist[J]. PLoS Med, 2014, 11(10): e1001744.
- [7] Moons K G M, Wolff R F, Riley R D, *et al.* PROBAST: a tool to assess risk of bias and applicability of prediction model studies: explanation and elaboration [J]. Ann Intern Med, 2019, 170(1): W1-W33.
- [8] Wu H, Li C, Song J J, *et al.* Developing predictive models for residual back pain after percutaneous vertebral augmentation treatment for osteoporotic thoracolumbar compression fractures based on machine learning technique[J]. J Orthop Surg Res, 2024, 19(1): 803.
- [9] 舒存洪, 张姚萍, 张元斌. LASSO 回归筛选骨质疏松性椎体压缩骨折患者术后残余疼痛的预测因子及模型构建[J]. 中华全科医学, 2024, 22(11): 1880-1883, 1980.
- [10] 周圆圆, 张玲敏, 袁之木. 老年骨质疏松性胸腰椎压缩骨折患者术后残余腰痛影响因素及预测模型的构建分析[J]. 颈腰痛杂志, 2024, 45(1): 101-106.
- [11] 王 艳, 范相成, 马延辉, 等. 老年骨质疏松性胸腰椎压缩性骨折患者术后残余腰痛影响因素分析及预测模型的构建[J]. 中国基层医药, 2024, 31(10): 1495-1501.
- [12] Lu S, Xia X, Shi X, *et al.* A nomogram for postoperative pain relief in patients with osteoporotic vertebral compression fracture treated with polymethylmethacrylate bone cement[J]. Sci Rep, 2025, 15(1): 1780.
- [13] Ge C, Chen Z, Lin Y, *et al.* Preoperative prediction of residual back pain after vertebral augmentation for osteoporotic vertebral compression fractures: Initial application of a radiomics score based nomogram[J]. Front Endocrinol (Lausanne), 2022, 13: 1093508.
- [14] Liu Z, Zhang X, Liu H, *et al.* A nomogram for short-term recurrent pain after percutaneous vertebroplasty for osteoporotic vertebral compression fractures[J]. Osteoporos Int, 2022, 33(4): 851-860.
- [15] 徐 耀, 钱志鹏, 袁延红, 等. 骨质疏松性椎体压缩骨折患者术后疼痛缓解不佳风险列线图构建[J]. 中国骨与关节杂志, 2024, 13(1): 28-32.
- [16] Yang D J, Liu X, Zhou Y, *et al.* A novel scoring system to predict the residual back pain after percutaneous kyphoplasty for osteoporotic vertebral compression fracture[J]. Front Surg, 2022, 9: 1035681.
- [17] Lin M M, Wen X M, Huang Z W, *et al.* A nomogram for predicting residual low back pain after percutaneous kyphoplasty in osteoporotic vertebral compression fractures[J]. Osteoporos Int, 2023, 34(4): 749-762.
- [18] Tu W Q, Niu Y P, Su P, *et al.* Establishment of a risk prediction model for residual low back pain in thoracolumbar osteoporotic vertebral compression fractures after percutaneous kyphoplasty [J]. J Orthop Surg Res, 2024, 19(1): 41.
- [19] 陈 思, 霍 理, 王伯鑫, 等. 经皮椎体成形术治疗单节段骨质疏松性椎体压缩骨折术后残余疼痛的列线图模型构建[J]. 骨科, 2024, 15(6): 507-512, 518.
- [20] Yu H W, Luo G, Wang Z Q, *et al.* Predictors of residual low back pain in patients with osteoporotic vertebral fractures following percutaneous kyphoplasty[J]. Front Surg, 2023, 10: 1119393.
- [21] Li Q J, Shi L, Wang Y B, *et al.* A nomogram for predicting the residual back pain after percutaneous vertebroplasty for osteoporotic vertebral compression fractures [J]. Pain Res Manag, 2021: 3624614.
- [22] 李军科, 马续彬, 李 亮, 等. 预测骨质疏松性椎体压缩骨折经皮椎体成形术后残余背痛的列线图[J]. 中国骨伤, 2024, 37(6): 553-559.
- [23] 章柯杰, 张 聪, 陈威烨, 等. 胸腰椎 OVCF 椎体成形术后腰痛风险预测模型构建[J]. 浙江创伤外科, 2024, 29(10): 1805-1807, 1812.
- [24] 吴晶晶, 李思炜, 朱爱朝, 等. 老年骨质疏松性椎体压缩骨折患者椎体成形术残余疼痛风险列线图[J]. 中国骨与关节杂志, 2024, 13(9): 743-748.
- [25] 裘小康, 季 萍, 杨艳玲, 等. 骨质疏松性胸腰椎骨折患者术后疼痛的影响因素分析及其预测模型构建[J]. 实用医学杂志, 2023, 39(18): 2312-2316.
- [26] 田 龙, 胡 萌, 卢俊松, 等. 椎体强化术治疗胸腰椎骨质疏松性椎体压缩性骨折早期疼痛缓解不佳的列线图预测模型构建[J]. 脊柱外科杂志, 2023, 21(5): 331-337.
- [27] 成昌桂, 高增鑫, 陈优民, 等. 骨质疏松性椎体压缩性骨折经皮椎体成形术后残余腰痛风险列线图模型的构建与验证[J]. 实用临床医药杂志, 2023, 27(12): 38-43.
- [28] 廖邦强, 陈方宽, 张 毅, 等. 基于列线图构建骨质疏松压缩性骨折患者 PVP 术后发生残余痛的预测模型[J]. 医学信息, 2023, 36(13): 19-23.
- [29] 李 东, 周 荣, 宋春健, 等. 老年骨质疏松性椎体压缩骨折患者经皮椎体后凸成形术术后下腰痛缓解

- 效果的列线图模型构建[J]. 中华老年多器官疾病杂志, 2024, 23(10): 772-776.
- [30] 林渺满, 文雪梅, 黄宗伟, 等. 骨质疏松性椎体压缩骨折椎体强化术后残余腰痛风险预测模型的构建与验证[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2022, 32(8): 720-728.
- [31] 杨森, 何雨欣, 姜为民, 等. 基于血液学指标的OVCF患者PKP术后残余痛预测模型构建[J]. 中国血液流变学杂志, 2024, 33(3): 412-418.
- [32] Alba A C, Agoritsas T, Walsh M, *et al.* Discrimination and calibration of clinical prediction models: Users' guides to the medical literature[J]. JAMA, 2017, 318(14): 1377-1384.
- [33] Collins G S, Reitsma J B, Altman D G, *et al.* Transparent reporting of a multivariable prediction model for individual prognosis or diagnosis (TRIPOD): the TRIPOD statement [J]. BMJ (Clinical research ed.), 2015, 350: g7594.
- [34] Ahmed Mohamed A, Xu X Y, Zhang Z Q, *et al.* Association between thoracolumbar fascia injury and residual back pain following percutaneous vertebral augmentation: a systematic review and meta-analysis[J]. Front Endocrinol, 2025, 16: 1532355.
- [35] Chong Y W, Zhang X, Li S, *et al.* Mechanism of formation of intravertebral clefts in osteoporotic vertebral compression fractures: An in vitro biomechanical study [J]. Spine J, 2018, 18(12): 2297-2301.
- [36] Yang K, Zhu X, Sun X, *et al.* Bone cement distribution patterns in vertebral augmentation for osteoporotic vertebral compression fractures: a systematic review[J]. J Orthop Surg Res, 2025, 20: 568.
- [37] He S, Zhang Y, Lv N, *et al.* The effect of bone cement distribution on clinical efficacy after percutaneous kyphoplasty for osteoporotic vertebral compression fractures [J]. Medicine, 2019, 98(50): e18217.
- [38] Chen B, Li Y, Xie D, *et al.* Comparison of unipedicular and bipedicular kyphoplasty on the stiffness and biomechanical balance of compression fractured vertebrae [J]. Eur Spine J, 2011, 20(8): 1272-1280.
- [39] 王雪峰, 刘辉, 丁少成. 骨水泥分布模式对骨质疏松性椎体压缩骨折术后临床治疗效果[J]. 中国骨与关节杂志, 2019, 8(11): 836-841.
- [40] 赖泽鹏, 吴昉晓, 蒋炬希, 等. 1990-2023年中国50岁以上人群低骨密度相关性骨折的归因疾病负担研究[J]. 中国修复重建外科杂志, 2025, 39(11): 1363-1370.
- [41] 袁春, 缪伟, 唐文凯, 等. PVP治疗骨质疏松性椎体压缩骨折术后持续腰背疼痛的影响因素分析[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2021, 36(9): 956-958.
- [42] Li Y, Xu Z. The relationship of body composition with bone mineral density and 10-year probability of hip fracture in postmenopausal women[J]. Geriatr Nurs, 2024, 59: 250-255.
- [43] Liu D, Xu J, Wang Q, *et al.* Timing of percutaneous balloon kyphoplasty for osteoporotic vertebral compression Fractures [J]. Pain Physician, 2023, 26(3): 231-243.
- [44] Squires M, Green J H, Patel R, *et al.* Clinical outcomes after bracing for vertebral compression fractures: a systematic review and meta-analysis of randomized trials[J]. J Spine Surg, 2023, 9(2): 139-148.
- [45] Kataoka H, Hirase T, Goto K, *et al.* Effects of a rehabilitation program combined with pain management that targets pain perception and activity avoidance in older patients with acute vertebral compression fracture: a randomised controlled trial [J]. Pain Res Manag, 2023, 2023: 1383897.
- [46] Zhang J, Fan Y, He X, *et al.* Bracing after percutaneous vertebroplasty for thoracolumbar osteoporotic vertebral compression fractures was not effective[J]. Clin Interv Aging, 2019, 14: 265-270.
- [47] Courvoisier D S, Combescure C, Agoritsas T, *et al.* Performance of logistic regression modeling: beyond the number of events per variable, the role of data structure [J]. J Clin Epidemiol, 2011, 64(9): 993-1000.
- [48] Van Calster B, Nieboer D, Vergouwe Y, *et al.* A calibration hierarchy for risk models was defined: from utopia to empirical data[J]. J Clin Epidemiol, 2016, 74: 167-176.
- [49] Graham J W. Missing data analysis: making it work in the real world [J]. Annu Rev Psychol, 2009, 60: 549-576.

(2025-07-30 收稿 2025-11-21 修回)

(责任编辑 卢益灿)