



doi:10.7659/j.issn.1005-6947.260360

http://dx.doi.org/10.7659/j.issn.1005-6947.260360

China Journal of General Surgery, 2026, 35(8):1632-1642.

· 临床研究 ·

基于术后Caprini评分的脊柱手术患者住院期间静脉血栓 栓塞增强预测模型构建及内部验证

王康韬, ALI Muhammad Kashif, 潘柏宏, 欧阳洋

(中南大学湘雅医院 普通外科血管外科, 湖南 长沙 410008)

摘要

背景与目的: 静脉血栓栓塞(VTE)是脊柱手术后重要并发症。Caprini评分可用于围手术期VTE风险分层,但对术后早期凝血纤溶状态、营养状态及手术创伤负荷等信息的反映有限。本研究以术后Caprini评分为基础,评价早期术后临床信息的增量预测价值,构建并内部验证脊柱手术患者住院期间VTE预测模型。

方法: 采用单中心回顾性队列研究,纳入2024年中南大学湘雅医院接受脊柱手术的成年患者1508例,以术后住院期间发生总体VTE为主要结局。术后实验室指标取术后24~48 h内首次检测值,发生VTE者仅采用确诊前检测结果。构建3个Logistic回归模型:模型A为术后Caprini评分单变量模型;模型B在此基础上纳入年龄、白蛋白、纤维蛋白降解产物(FDP)、手术时间、术中出血量及输注红细胞量;模型C保留术后Caprini评分、年龄、白蛋白和FDP。采用1000次Bootstrap重抽样和分层10折交叉验证进行内部验证,并通过受试者工作特征(ROC)曲线下面积(AUC)、校准及决策曲线分析评价模型性能;同时进行术前Caprini评分对照、剔除FDP敏感性分析及LASSO辅助分析。基于验证后的模型B和模型C开发在线Web风险评估工具,实现VTE风险的个体化计算与可视化评估。

结果: 1508例患者中156例发生VTE,发生率为10.34%。Bootstrap校正后,模型A、B和C的AUC分别为0.706、0.824和0.821;10折交叉验证折外AUC分别为0.699(95% CI=0.656~0.742)、0.824(95% CI=0.792~0.855)和0.820(95% CI=0.790~0.851)。模型B和C的区分度均优于模型A(均 $P<0.001$),而模型B与C差异无统计学意义($P=0.494$)。模型B和C的校准斜率分别为0.954和0.975,决策曲线分析显示,在约0.02~0.30的阈值概率范围内,两种增强模型总体净获益高于模型A。剔除FDP后,增强模型的折外预测AUC降至0.795,与模型B比较,配对DeLong检验的AUC差值为0.028($P=0.006$),提示FDP具有一定增量预测价值。基于验证后的模型B和C开发了在线Web风险评估工具,可实现患者VTE风险的个体化计算与可视化评估。

结论: 术后Caprini评分可提供脊柱手术患者住院期间VTE的基础风险信息,但单独使用时区分度有限。在此基础上整合年龄、白蛋白、FDP及手术等相关信息,可进一步提高风险识别能力。简化模型在减少预测变量的同时保持了与完整增强模型相近的预测性能,可用于术后VTE风险分层及在线辅助评估,但仍需在独立、多中心队列中进行外部验证。

关键词

静脉血栓栓塞; 脊柱手术; Caprini评分; 风险预测; Logistic回归

中图分类号: R654.3

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2025JJ70053)。

收稿日期: 2026-06-24; **修订日期:** 2026-08-13。

作者简介: 王康韬,中南大学湘雅医院助理研究员,主要从事血管外科疾病方面的研究。

通信作者: 欧阳洋, Email: oyyking@126.com

Development and internal validation of an enhanced model for predicting in-hospital venous thromboembolism after spine surgery based on the postoperative Caprini score

WANG Kangtao, ALI Muhammad Kashif, PAN Baihong, OUYANG Yang

(Division of Vascular Surgery, Department of General Surgery, Xiangya Hospital, Central South University, Changsha 410008, China)

Abstract

Background and Aims: Venous thromboembolism (VTE) is an important complication after spine surgery. Although the Caprini score is widely used for perioperative VTE risk stratification, it has limited ability to capture early postoperative information related to coagulation and fibrinolysis, nutritional status, and surgical burden. This study aimed to evaluate the incremental predictive value of early postoperative clinical information beyond the postoperative Caprini score and to develop and internally validate models for predicting in-hospital VTE after spine surgery.

Methods: This single-center retrospective cohort study included 1 508 adult patients who underwent spine surgery at Xiangya Hospital, Central South University, in 2024. The primary outcome was overall VTE occurring during postoperative hospitalization. Postoperative laboratory variables were defined as the first measurements obtained within 24–48 h after surgery; for patients who developed VTE, only measurements obtained before VTE diagnosis were used. Three Logistic regression models were developed. Model A included the postoperative Caprini score alone. Model B additionally included age, albumin, fibrin degradation products (FDP), operation duration, intraoperative blood loss, and transfused red blood cell units. Model C included the postoperative Caprini score, age, albumin, and FDP. Internal validation was performed using 1 000 bootstrap resamples and stratified 10-fold cross-validation. Model discrimination, calibration, and clinical utility were assessed using the area under the receiver operating characteristic curve (AUC), calibration analysis, and decision curve analysis. A preoperative Caprini score model, a sensitivity analysis excluding FDP, and an auxiliary LASSO analysis were also performed. Based on the validated models B and C, online web-based risk assessment tools were developed to enable individualized VTE risk calculation and visual assessment.

Results: Among the 1 508 patients, 156 developed VTE, corresponding to an incidence of 10.34%. After bootstrap optimism correction, the AUC of models A, B, and C were 0.706, 0.824, and 0.821, respectively. The corresponding out-of-fold AUC from 10-fold cross-validation were 0.699 (95% *CI*=0.656–0.742), 0.824 (95% *CI*=0.792–0.855), and 0.820 (95% *CI*=0.790–0.851). Models B and C demonstrated significantly better discrimination than Model A (both $P<0.001$), whereas no significant difference was observed between models B and C ($P=0.494$). The calibration slopes of models B and C were 0.954 and 0.975, respectively. Decision curve analysis showed that models B and C generally provided greater net benefit than model A across threshold probabilities of approximately 0.02–0.30. After excluding FDP, the out-of-fold AUC of the enhanced model was 0.795; paired DeLong comparison with model B yielded an AUC difference of 0.028 ($P=0.006$), indicating an incremental predictive contribution of FDP. Online web-based risk assessment tools were developed based on the validated models B and C, enabling individualized VTE risk calculation and visual assessment.

Conclusion: The postoperative Caprini score provides baseline risk information for in-hospital VTE after spine surgery but has limited discrimination when used alone. Incorporating age, albumin, FDP, and surgery-related information further improves risk discrimination. The simplified model maintained

predictive performance comparable to that of the full enhanced model while using fewer predictors, supporting its potential use for postoperative VTE risk stratification and online assessment. External validation in independent multicenter cohorts is required before broader clinical application.

Key words

Venous Thromboembolism; Spine surgery; Caprini Score; Risk Prediction; Logistic Regression

CLC number: R654.3

静脉血栓栓塞 (venous thromboembolism, VTE) 包括深静脉血栓形成 (deep vein thrombosis, DVT) 和肺栓塞 (pulmonary embolism, PE), 是外科围手术期重要并发症之一, 可增加住院时间、再入院及死亡风险^[1-2]。Caprini 评分综合年龄、基础疾病、既往血栓史、手术及活动受限等因素, 已广泛用于外科患者 VTE 风险分层^[3]。近期, 国内专家共识进一步强调, 应结合患者血栓及出血风险实施动态评估和分层管理^[4]。

脊柱手术患者具有较为特殊的 VTE 风险构成。高龄、活动受限、手术时间延长、术中出血量及手术范围增加等因素均可能增加术后 VTE 风险, 而药物预防又需兼顾椎管内血肿及相关神经功能损害风险^[5-7]。近年来, 多项研究尝试建立脊柱手术后 VTE 预测模型。Kong 等^[8]基于脊柱手术患者构建了包含年龄、D-二聚体、手术时间及术中出血量等因素的预测模型; He 等^[9]进一步将纤维蛋白降解产物 (fibrin degradation product, FDP)、D-二聚体及血栓弹力图指标纳入风险预测; Li 等^[10]针对后路腰椎融合术后 DVT 建立了列线图模型; Wu 等^[11]则采用机器学习方法评价脊柱手术后 DVT 风险。这些研究提示, 在传统临床危险因素基础上进一步整合凝血纤溶状态及手术相关信息, 有望提高术后 VTE 风险识别能力。

然而, 既往研究在患者构成、手术类型、结局定义、观察时间及预测变量方面存在较大差异, 部分模型主要针对特定术式或特定患者群体^[12-15]。在临床已有 Caprini 风险评估基础上, 术后早期实验室及手术相关信息能够提供多少增量预测价值, 仍需进一步评价。基于此, 本研究以术后 Caprini 评分为基础风险评估变量, 联合年龄、FDP、白蛋白及手术创伤负荷相关指标构建完整和简化 Logistic 增强预测模型, 并采用 Bootstrap 重抽样和分层 10 折交叉验证进行内部验证, 同时开发在线 Web 风险评估工具。

1 资料与方法

1.1 研究对象

本研究为单中心回顾性队列研究。纳入 2024 年 1 月 1 日—12 月 31 日在中南大学湘雅医院接受脊柱手术治疗并出院的患者。数据来源于电子病历系统、手术麻醉系统、检验系统及影像检查记录。原始结构化临床记录共 1 606 例, 98 例因结局资料缺失、关键变量缺失、重复记录无法明确索引手术, 或年龄 < 18 岁, 未进入主要分析集, 最终纳入 1 508 例成年患者。纳入标准: (1) 年龄 ≥ 18 岁; (2) 接受脊柱相关手术; (3) 可获得术后 VTE 结局; (4) 主要人口学、围手术期及实验室资料满足主要分析需要。排除标准: (1) 关键结局资料缺失; (2) 核心分析变量缺失; (3) 重复记录且无法明确索引手术; (4) 年龄 < 18 岁。本研究经中南大学湘雅医院医学伦理委员会批准 (批准号: 2026071799)。

1.2 研究终点

主要终点为术后住院期间发生的总体 VTE, 包括 DVT 和 PE, 建模分析不区分亚型。本研究基于真实世界临床诊疗资料确定 VTE 结局。对出现下肢肿胀、疼痛、皮温改变、胸闷、气促、血氧下降等临床表现, 或凝血纤溶指标异常并经临床医师判断需进一步排查者, 行下肢静脉超声或 CT 肺动脉造影等检查。研究期间未对全部患者实施统一影像学筛查。VTE 诊断以影像学结果为主要依据; 影像学资料不完整者, 结合出院诊断、病程记录及治疗医嘱综合判定。仅有 D-二聚体或 FDP 升高而无影像学或明确临床诊疗证据, 不定义为 VTE 事件。

1.3 数据收集与变量定义

收集一般资料、合并症及既往病史、实验室指标、围手术期及手术相关指标。一般资料包括年龄、性别及体质量指数 (body mass index, BMI); 合并症及既往病史包括高血压、严重肺部疾病、下肢静脉曲张或静脉炎; 实验室指标包括

白细胞计数、红细胞计数、血红蛋白、白蛋白、D-二聚体、FDP、红细胞沉降率及血脂指标;围手术期及手术相关指标包括术前和术后Caprini评分、手术时间、术中出血量、输注红细胞量、是否入住重症监护室(intensive care unit, ICU)及手术部位。

术后实验室指标取术后24~48 h内首次检测值,发生VTE者仅采用VTE确诊前的检测结果,确诊后结果不纳入模型。术后Caprini评分取电子病历系统中术后首次评估总分,发生VTE者采用确诊前已完成的评分记录。

本中心脊柱手术患者围手术期VTE管理以动态风险评估、早期活动和机械预防为基础。患者入院及术后进行Caprini风险评估,并结合活动受限、既往VTE史、恶性肿瘤、神经功能障碍及出血风险进行临床判断;无禁忌者实施踝泵运动、尽早下床活动及间歇充气加压等措施。药物预防由主管医师综合VTE风险、手术范围、术后止血和引流情况,以及椎管内血肿风险个体化决定。术后出现下肢肿胀、疼痛、压痛、胸痛、气促、低氧等临床疑征,或结合既往危险因素及凝血纤溶指标异常后临床怀疑VTE时,进一步行下肢静脉超声或CT肺动脉造影等检查。研究期间未对全部患者实施统一主动影像学筛查。由于结构化药物记录不能稳定区分预防性抗凝与VTE确诊后的治疗性抗凝,且药物名称、剂量及启动时间记录不完整,药物预防未作为模型预测变量。

1.4 数据清洗与质量控制

原始数据依据住院记录、手术日期和出院日期进行匹配,对重复记录、结局资料缺失、关键变量缺失及不符合分析条件的记录进行标记。逐项核查变量名称、类型、单位、编码、异常值及缺失值,并重新确认白细胞和红细胞计数字段的映射关系。FDP、手术时间和术中出血量呈偏态分布,建模时采用 $\log(x+1)$ 转换。最终队列中FDP缺失13例,缺失率为0.86%。缺失值不赋值为0,模型A纳入1 508例,包含FDP的模型B和模型C采用1 495例完整病例分析。

1.5 统计学分析及模型构建

采用R软件进行统计分析。连续变量根据分布以均数 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm s$)或中位数(四分位间距)[$M(IQR)$]表示,组间比较采用独立样本 t 检验或Wilcoxon秩和检验;分类变量以例数(百分

比)[$n(\%)$]表示,采用 χ^2 检验或Fisher确切概率法。采用标准化均数差(SMD)评价组间差异,SMD绝对值 ≥ 0.10 提示存在一定差异。双侧 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

共构建3个Logistic回归模型:模型A为术后Caprini评分单变量模型;模型B在此基础上纳入年龄、白蛋白、 $\log(FDP+1)$ 、 $\log(\text{手术时间}+1)$ 、 $\log(\text{术中出血量}+1)$ 及输注红细胞量,变量依据既往研究、临床意义及可获得性预先确定;模型C保留术后Caprini评分、年龄、白蛋白及 $\log(FDP+1)$,作为简化模型。另以模型B的7个候选变量进行LASSO辅助分析,采用10折交叉验证确定惩罚参数;LASSO仅用于评价变量稳定性,不用于确定正式模型结构或计算个体预测概率。

采用1 000次Bootstrap重抽样和分层10折交叉验证进行内部验证,评价受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线下面积(area under the curve, AUC)、Brier评分、校准截距、校准斜率及临床净获益。模型间AUC采用配对DeLong检验比较。另进行术前Caprini评分对照、剔除FDP敏感性分析及多重共线性评价。根据Youden指数确定最佳预测概率截断值,并计算敏感度、特异度、阳性预测值和阴性预测值。

1.6 在线Web工具开发

基于模型B和模型C构建R Shiny在线VTE风险评估工具。该工具支持直接输入术后Caprini评分或逐项计算评分,并根据年龄、FDP、白蛋白及手术相关指标估计个体VTE风险。工具仅用于辅助术后风险分层,不作为影像学检查、药物预防或抗凝治疗的单独决策依据。访问链接为:<https://xiangya-clinical-tools.shinyapps.io/spine-vte-risk-tool>。

2 结果

2.1 患者纳入及基线特征

1 508例成年脊柱手术患者中,术后住院期间发生VTE 156例(10.34%)。FDP缺失13例(0.86%),均为非VTE患者。与非VTE组比较,VTE组年龄更大[64(58~70)岁 vs. 56(47~62)岁, $P < 0.001$],高血压、严重肺部疾病及下肢静脉曲张或静脉炎比例更高(均 $P < 0.05$)。实验室指标方面,VTE组血红蛋白、白蛋白和红细胞计数较低,D-二聚体、FDP、红细胞沉降率、总胆固醇及高

密度脂蛋白胆固醇水平较高（均 $P<0.05$ ）；两组性别、BMI、白细胞计数及低密度脂蛋白胆固醇差异无统计学意义（均 $P>0.05$ ）（表 1）。

表 1 VTE 组与非 VTE 组患者基线资料及实验室指标比较

Table 1 Comparison of baseline characteristics and laboratory findings between the VTE and non-VTE groups

变量	非 VTE 组($n=1\ 352$)	VTE 组($n=156$)	SMD	P
年龄[岁, $M(IQR)$]	56(47~62)	64(58~70)	0.94	<0.001
男性[$n(\%)$]	732(54.14)	73(46.79)	0.15	0.082
BMI [kg/m^2 , $M(IQR)$]	23.99(21.88~26.12)	24.29(22.30~26.39)	0.10	0.281
高血压[$n(\%)$]	315(23.30)	60(38.46)	0.33	<0.001
严重肺部疾病[$n(\%)$]	98(7.25)	21(13.46)	0.20	0.006
下肢静脉曲张/静脉炎[$n(\%)$]	24(1.78)	8(5.13)	0.18	0.013
血红蛋白[g/L , $M(IQR)$]	122.00(110.33~134.54)	112.17(98.50~121.83)	0.65	<0.001
白蛋白[g/L , $M(IQR)$]	37.53(35.67~39.70)	35.27(34.12~36.80)	0.91	<0.001
白细胞计数($\times 10^9/\text{L}$, $\bar{x} \pm s$)	9.25 $\pm$ 2.36	9.35 $\pm$ 2.35	0.04	0.611
红细胞计数($\times 10^{12}/\text{L}$, $\bar{x} \pm s$)	4.05 $\pm$ 0.59	3.66 $\pm$ 0.53	0.70	<0.001
D-二聚体[mg/L , $M(IQR)$]	0.33(0.17~0.59)	0.82(0.49~1.24)	0.99	<0.001
FDP [mg/L , $M(IQR)$]	3.10(1.60~5.89)	8.19(4.76~13.39)	1.02	<0.001
红细胞沉降率[mm/h , $M(IQR)$]	32.25(18.33~50.46)	42.75(29.00~63.34)	0.39	<0.001
总胆固醇[mmol/L , $M(IQR)$]	4.79(4.19~5.44)	4.88(4.42~5.55)	0.19	0.038
低密度脂蛋白胆固醇[mmol/L , $M(IQR)$]	3.07(2.61~3.52)	3.16(2.72~3.65)	0.19	0.055
高密度脂蛋白胆固醇[mmol/L , $M(IQR)$]	1.17(1.01~1.36)	1.22(1.06~1.46)	0.21	0.013

2.2 围手术期及手术相关指标比较

VTE 组术前和术后 Caprini 评分均高于非 VTE 组，手术时间更长，术中出血量和输注红细胞量更多，ICU 入住比例更高；两组手术部位分布亦存在差异，VTE 组腰椎手术比例较高，颈椎手术比例较

低（均 $P<0.05$ ）。全部患者中，1 461 例（96.9%）具有间歇充气加压机械预防记录，VTE 组机械预防记录比例低于非 VTE 组（92.3% vs. 97.41%， $P<0.001$ ）（表 2）。

表 2 VTE 组与非 VTE 组患者围手术期及手术相关指标比较

Table 2 Comparison of perioperative and surgery-related characteristics between the VTE and non-VTE groups

变量	非 VTE 组($n=1\ 352$)	VTE 组($n=156$)	SMD	P
术前 Caprini 评分[$M(IQR)$]	2(1~2)	3(2~3)	0.60	<0.001
术后 Caprini 评分[$M(IQR)$]	5(5~6)	6(6~7)	0.67	<0.001
手术时间[min , $M(IQR)$]	140(103~188)	178(138~216)	0.51	<0.001
术中出血量[mL , $M(IQR)$]	200(50~300)	350(169~500)	0.63	<0.001
输注红细胞量[U, $M(IQR)$]	0(0.00~0.00)	0(0.00~0.38)	0.30	<0.001
ICU 入住[$n(\%)$]	28(2.07)	9(5.77)	0.19	0.010
手术部位[$n(\%)$]				
复杂脊柱(胸椎/多节段/其他)	95(7.03)	16(10.26)		
颈椎	452(33.43)	28(17.95)	0.35	<0.001
腰椎	805(59.54)	112(71.79)		
间歇充气加压机械预防记录[$n(\%)$]	1 317(97.41)	144(92.30)	0.23	<0.001

2.3 模型构建及内部验证与敏感性分析

模型 A 中，术后 Caprini 评分每增加 1 分，VTE 发生优势比增加 45.1%（ $OR=1.451$ ，95% $CI=1.318\sim 1.598$ ， $P<0.001$ ）。模型 B 多因素分析显示，年龄、

$\log(\text{FDP}+1)$ 及 $\log(\text{术中出血量}+1)$ 与较高 VTE 风险相关，白蛋白水平升高与较低 VTE 风险相关；术后 Caprini 评分、手术时间和输注红细胞量未达到统计学显著性。模型 C 中，术后 Caprini 评分、

年龄、白蛋白和log(FDP+1)均与VTE发生独立相关(表3)(图1A)。1 000次Bootstrap重抽样均成功完成。模型A、模型B和模型C的Bootstrap校正AUC分别为0.706、0.824和0.821,固定分层10折交叉验证结果与Bootstrap验证结果一致;在1 495例共同完整病例中,模型A、模型B和模型C的折外预测(out-of-fold, OOF) AUC分别为0.699(95% CI=0.656~0.742)、0.824(95% CI=0.792~0.855)和0.820(95% CI=0.790~0.851)(图1B),OOF Brier评分分别为0.090 1、0.079 1和0.080 2,OOF校准截距分别为-0.000 2、-0.000 1和0.001 0,OOF校准斜率分别为0.973、0.954和0.975(图1C)。配对DeLong检验显示,模型B和模型C的AUC均高于模型A,AUC差值分别为0.124(95% CI=0.082~0.166, $P<0.001$)和0.121(95% CI=0.079~0.163, $P<0.001$);模型B与模型C之间差异无统计学意义(AUC差值为0.003, 95% CI=-0.006~0.013, $P=0.494$)。基于OOF预测概率和Youden指数,模型B的敏感度、特异度、阳性预测值(PPV)和阴性预测值(NPV)分别为76.3%、75.1%、26.3%

和96.5%,模型C分别为84.6%、68.0%、23.5%和97.4%(表4)。决策曲线分析显示,在约0.02~0.30的阈值概率范围内,模型B和模型C的净获益总体高于模型A(图1D)。模型B各变量的方差膨胀因子为1.20~1.91,模型C为1.35~1.57,未发现明显多重共线性。进一步进行对照及敏感性分析。术前Caprini评分模型的Bootstrap校正AUC为0.698,10折交叉验证OOF AUC为0.699(95% CI=0.658~0.739),术后与术前Caprini评分模型的AUC差异无统计学意义($P=0.898$)。剔除FDP后,增强模型的Bootstrap校正AUC为0.796,10折交叉验证OOF AUC为0.795(95% CI=0.761~0.828)(图1E);模型B较不含FDP模型的AUC提高0.028(95% CI=0.008~0.049, $P=0.006$)(表4)。LASSO辅助分析显示,lambda.min下7个候选变量均被保留;lambda.1se下保留术后Caprini评分、年龄、白蛋白、log(FDP+1)及log(术中出血量+1)(图1F)。上述LASSO结果仅用于评价变量稳定性,不用于确定正式模型结构或计算个体预测概率。

表3 术后VTE预测模型的Logistic回归结果
Table 3 Logistic regression results of the postoperative VTE prediction models

模型	β	S.E.	OR(95% CI)	P
模型A				
截距	-4.327	0.313	0.013(0.007~0.024)	<0.001
术后Caprini评分	0.372	0.049	1.451(1.318~1.598)	<0.001
模型B				
截距	-6.576	2.547	0.001(0.000~0.205)	0.010
术后Caprini评分	0.116	0.060	1.123(0.998~1.263)	0.054
年龄(岁)	0.052	0.011	1.053(1.031~1.075)	<0.001
白蛋白(g/L)	-0.113	0.047	0.893(0.815~0.979)	0.016
log(FDP+1)	0.990	0.153	2.692(1.992~3.637)	<0.001
log(手术时间+1)	0.298	0.282	1.348(0.775~2.343)	0.290
log(术中出血量+1)	0.285	0.122	1.330(1.046~1.690)	0.020
输注红细胞量(U)	-0.152	0.084	0.859(0.729~1.011)	0.069
模型C				
截距	-3.148	1.997	0.043(0.001~2.149)	0.115
术后Caprini评分	0.123	0.059	1.131(1.008~1.269)	0.036
年龄(岁)	0.050	0.011	1.052(1.030~1.074)	<0.001
白蛋白(g/L)	-0.127	0.045	0.881(0.807~0.962)	0.005
log(FDP+1)	1.036	0.152	2.819(2.092~3.798)	<0.001

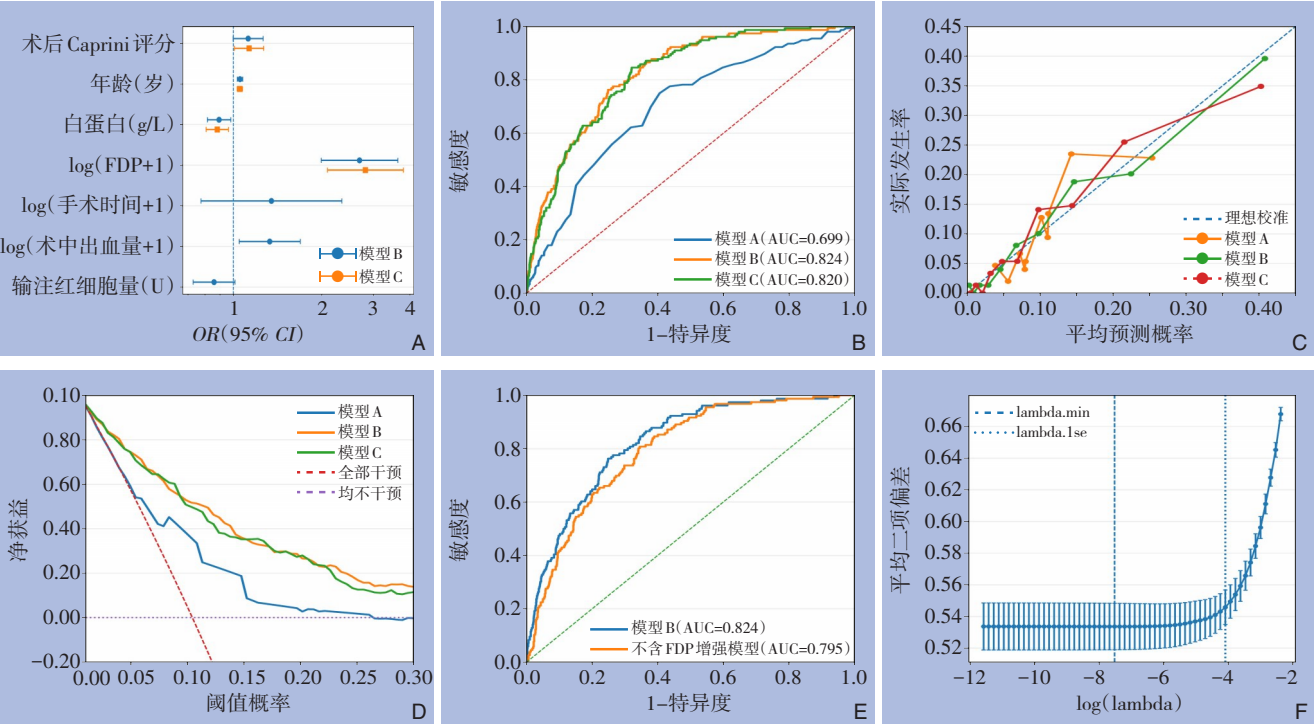


图1 术后VTE预测模型的预测性能及辅助分析 A: 模型B和C中各预测变量的OR及95% CI; B: 三种模型的10折交叉验证 OOF ROC 曲线; C: 三种模型的OOF 校准曲线; D: 决策曲线; E: 模型B与剔除FDP模型的OOF ROC 曲线; F: LASSO 10折交叉验证曲线

Figure 1 Predictive performance and auxiliary analyses of the postoperative VTE prediction models A: ORs and 95% CIs for the predictors in models B and C; B: OOF ROC curves of the three models based on 10-fold cross-validation; C: OOF calibration curves of the three models; D: decision curve analysis; E: OOF ROC curves of model B and the model excluding FDP; F: 10-fold cross-validation curve for LASSO analysis

表4 不同VTE预测模型的内部验证、模型比较及敏感性分析结果

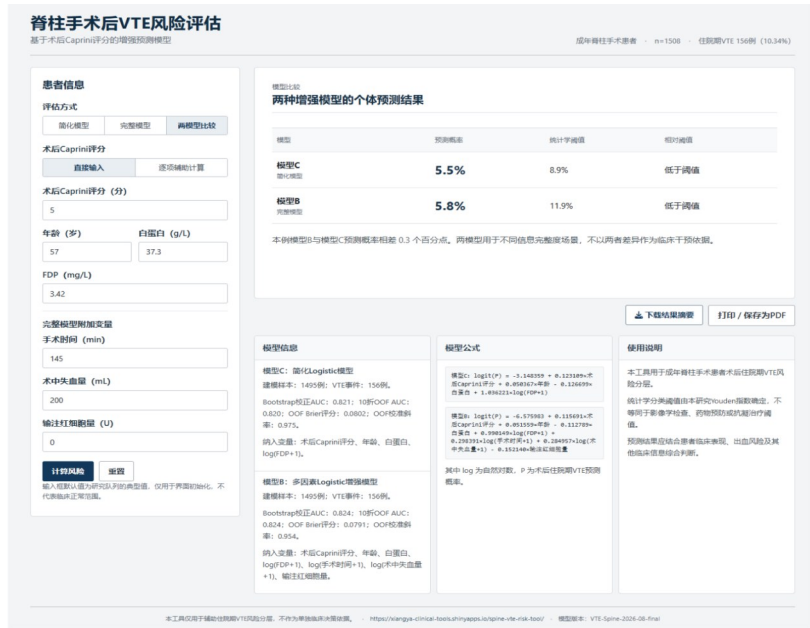
Table 4 Internal validation, model comparison, and sensitivity analyses of the VTE prediction models

模型内部验证	Bootstrap 校正 AUC	10折交叉验证 AUC(95% CI)	OOF Brier 评分	OOF 校准截距	OOF 校准斜率
模型 A	0.706	0.699(0.656~0.742)	0.090 1	-0.000 2	0.973
模型 B	0.824	0.824(0.792~0.855)	0.079 1	-0.000 1	0.954
模型 C	0.821	0.820(0.790~0.851)	0.080 2	0.001 0	0.975
模型分类性能	最佳截断值	敏感度(%)	特异度(%)	PPV(%)	NPV(%)
模型 A	0.109	75.0	59.4	17.7	95.3
模型 B	0.119	76.3	75.1	26.3	96.5
模型 C	0.089	84.6	68.0	23.5	97.4
模型 AUC 的 DeLong 比较		AUC 差值(95% CI)		P	
模型 B vs. 模型 A		0.124(0.082~0.166)		<0.001	
模型 C vs. 模型 A		0.121(0.079~0.163)		<0.001	
模型 B vs. 模型 C		0.003(-0.006~0.013)		0.494	
对照及敏感性分析	Bootstrap 校正 AUC	10折交叉验证 AUC(95% CI)	模型比较	AUC 差值(95% CI)	P
术前 Caprini 模型	0.698	0.699(0.658~0.739)	术后 vs. 术前 Caprini	0.003(-0.038~0.044)	0.898
不含 FDP 增强模型	0.796	0.795(0.761~0.828)	模型 B vs. 不含 FDP 模型	0.028(0.008~0.049)	0.006

2.4 在线Web工具

基于模型B和模型C开发了术后VTE风险在线评估工具。该工具支持直接输入术后Caprini评分或通过逐项模块辅助计算评分,并根据年龄、FDP、白蛋白及手术相关指标输出个体化VTE预测

概率。模型B用于临床资料较完整时的风险评估,模型C用于变量较少情况下的快速评估。模型输出的统计学最佳截断值仅用于风险分层参考,不作为单独启动影像学检查、药物预防或抗凝治疗的依据(图2)。



<https://xiangya-clinical-tools.shinyapps.io/spine-vte-risk-tool/>
扫码访问脊柱手术后VTE风险评估工具

图2 术后VTE风险在线评估工具界面及访问二维码

Figure 2 Interface and QR code for the online postoperative VTE risk assessment tool

3 讨论

本研究基于1 508例成年脊柱手术病例的真实世界临床资料,在术后Caprini评分基础上构建了完整增强模型和简化增强模型。结果显示,单独采用术后Caprini评分具有一定预测价值,而联合年龄、白蛋白、FDP及手术创伤相关指标后,模型区分度明显提高。1 000次Bootstrap校正后,模型A、B和C的AUC分别为0.706、0.824和0.821;10折交叉验证所得结果相近,模型B和模型C均显著优于模型A,而两种增强模型之间差异无统计学意义。模型B和模型C的校准斜率均接近1,提示其具有较好的内部区分度和校准表现。上述结果表明,在常规Caprini风险评估基础上进一步整合术后早期实验室指标和手术相关信息,可提高脊柱手术患者住院期间VTE的风险识别能力。

Caprini评分能够整合年龄、基础疾病、既往VTE、手术及活动受限等传统危险因素^[3],但对术后凝血纤溶状态、营养状态及实际手术创伤程度

的反映相对有限。本研究中,术前与术后Caprini评分模型的AUC差异无统计学意义,提示单纯更新Caprini总分所带来的增量预测信息有限。近年来,已有多项研究针对脊柱手术后VTE建立专科预测模型。Kong等^[8]、He等^[9]、Li等^[10]及Wu等^[11]分别从一般临床资料、凝血指标及不同建模方法评价术后VTE或DVT风险;Heo等^[12]在大规模多节段后路融合患者中比较了多种机器学习方法,Zhao等^[13]和Lv等^[14]则分别针对腰椎融合及创伤性脊柱骨折患者建立预测模型,近期Fu等^[15]进一步对创伤性脊柱骨折术后DVT模型进行了验证。不同研究的人群、结局及筛查策略存在明显差异,模型性能不宜简单横向比较。本研究并非重新建立独立于现有风险评估体系的评分,而是在Caprini评分基础上评价术后动态信息的增量预测价值。

本研究中,年龄、FDP及术中出血量与较高的VTE风险相关,而白蛋白水平升高与较低的VTE风险相关。既往Meta分析及队列研究亦提示,高龄、手术时间延长、术中出血量、输血及凝血

指标异常与脊柱手术后 VTE 发生相关^[5,16-19]。近期大样本 Meta 分析^[20]显示,低白蛋白血症与 VTE 风险增加相关,提示营养及全身生理状态可能具有一定的风险识别价值。本研究中白蛋白在完整模型和简化模型中均保留了预测信息,但作为预测模型研究,上述变量主要用于风险预测,不宜据此推断其与 VTE 之间存在直接的因果关系。

FDP 是本研究中需要谨慎解释的指标。既往研究显示,D-二聚体等凝血纤溶指标可用于脊柱手术后 VTE 风险识别^[21];He 等^[9]亦发现 FDP 及其他凝血指标具有预测价值。近期对 VTE 生物标志物的综述^[22]指出,凝血纤溶相关指标具有辅助诊断和风险评估价值,但应结合临床背景综合解释。本研究限定采用术后 24~48 h 内首次检测值,发生 VTE 者仅采用确诊前结果,并进一步进行了剔除 FDP 的敏感性分析。去除 FDP 后,增强模型 10 折交叉验证 AUC 仍为 0.795;与模型 B 的配对比较显示 AUC 差值为 0.028 (95% CI=0.008~0.049, $P=0.006$)。因此,增强模型的预测能力并非完全由 FDP 驱动,但 FDP 能够提供一定的增量预测信息。鉴于 FDP 异常本身亦可能影响影像学检查决策,本研究更适宜将其解释为术后早期风险预测指标,而非独立的因果危险因素。

本研究住院期间总体 VTE 发生率为 10.34%,其解释需要结合结局定义和真实世界诊疗流程。既往研究^[23-26]报道的脊柱手术后 VTE 发生率差异较大,受患者构成、手术类型、观察时间及影像学筛查强度等因素影响。本研究未对全部患者实施统一影像学筛查,而是根据患者临床表现、既往危险因素、凝血纤溶指标及临床医师判断选择性实施影像学检查。因此,本研究中 VTE 发生率 10.34% 反映的是常规临床诊疗背景下发现的住院期间总体 VTE 发生率,不能与仅记录症状性 VTE 或采用统一筛查策略的研究直接比较。不同患者接受影像学检查概率不一致亦可能导致无症状 VTE 检出机会不同,从而产生一定检出偏倚。

围手术期预防措施同样可能影响 VTE 发生。本研究 96.9% 的患者具有间歇充气加压机械预防记录,药物预防则根据患者 VTE 风险、术后止血情况及椎管内血肿风险个体化实施。国内近期共识^[4]强调,应综合血栓和出血风险实施动态、分层预防;脊柱外科相关指南、Meta 分析及队列研究^[6-7,27-32]亦表明,药物预防的实施需要权衡 VTE 减

少与术后出血或椎管内血肿风险。因此,本研究模型反映的是现有围手术期预防策略背景下的残余 VTE 风险,而不能用于评价某种预防措施本身的因果效应。模型 B 适用于临床资料较完整时的风险评估,模型 C 仅包括术后 Caprini 评分、年龄、白蛋白和 FDP,在减少变量数量的同时保持了与模型 B 相近的预测性能,更便于床旁快速评估及在线工具应用。考虑到惩罚回归系数收缩可能影响预测概率的校准,本研究未将 LASSO 惩罚系数用于个体风险计算,而仅将 LASSO 作为候选变量稳定性的辅助分析。模型预测概率及 Youden 指数确定的截断值仅用于辅助风险分层,不应作为单独启动影像学检查、药物预防或抗凝治疗的依据。

本研究仍存在一定局限。首先,本研究为单中心回顾性研究,尽管采用 Bootstrap 重抽样和 10 折交叉验证进行了内部验证,但尚缺乏独立外部验证,其不同患者构成、手术类型及基线 VTE 风险人群中的适用性仍需进一步评价^[33];同时,1 606 例结构化记录中 98 例未进入成人主要分析集,仍可能产生一定选择偏倚。其次,VTE 结局来源于真实世界临床诊疗过程,患者接受影像学检查的概率并不完全一致,历史数据亦不能可靠区分症状驱动检查与主动筛查,因而无法完全排除或准确量化检出偏倚,尤其是 FDP 等指标可能同时影响检查决策。第三,本研究以术后住院期间总体 VTE 为结局,现有资料不能稳定区分症状性与无症状性 VTE、近端与远端 DVT,以及 DVT 与 PE 亚型,也未覆盖出院后迟发性 VTE。第四,药物预防以及糖尿病、外周血管病变等部分合并症缺乏统一、可靠的结构化记录,可能存在残余混杂。后续研究需在独立、多中心队列中进行外部验证,必要时根据验证结果进行模型再校准,并进一步评价其对临床决策及患者结局的实际增益。

术后 Caprini 评分对脊柱手术患者住院期间 VTE 具有基础预测价值。联合年龄、FDP、白蛋白及手术创伤负荷相关信息构建的模型可进一步提高风险识别能力,完整模型和简化模型均显示出较好的内部区分度和校准表现。在线 Web 工具可用于辅助术后 VTE 风险分层,但模型仍需在独立、多中心队列中开展外部验证。

作者贡献声明:王康韬负责研究设计、数据整理与

分析、模型构建、结果解释及论文撰写;ALI Muhammad Kashif参与数据整理、结果解释及论文修改;潘柏宏参与临床资料整理、数据核查及论文修改;欧阳洋负责研究设计、研究监督、结果解释及论文审阅与修订。所有作者均阅读并同意最终稿。

利益冲突:所有作者均声明不存在利益冲突。

参考文献

- [1] Lutsey PL, Zakai NA. Epidemiology and prevention of venous thromboembolism[J]. *Nat Rev Cardiol*, 2023, 20(4):248–262. doi: [10.1038/s41569-022-00787-6](https://doi.org/10.1038/s41569-022-00787-6).
- [2] Bartlett MA, Mauck KF, Stephenson CR, et al. Perioperative venous thromboembolism prophylaxis[J]. *Mayo Clin Proc*, 2020, 95(12):2775–2798. doi: [10.1016/j.mayocp.2020.06.015](https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2020.06.015).
- [3] Golemi I, Salazar Adum JP, Tafur A, et al. Venous thromboembolism prophylaxis using the Caprini score[J]. *Dis Mon*, 2019, 65(8):249–298. doi: [10.1016/j.disamonth.2018.12.005](https://doi.org/10.1016/j.disamonth.2018.12.005).
- [4] 湖南VTE防治联盟,湖南省药理学学会血栓与止血药物专业委员会. 静脉血栓栓塞症预防与治疗湖南专家共识[J]. *中国普通外科杂志*, 2026, 35(6): 1075–1091. doi: [10.7659/j.issn.1005-6947.260194](https://doi.org/10.7659/j.issn.1005-6947.260194).
Hunan VTE Prevention and Control Alliance, Special Committee of Thrombosis and Hemostatic Drugs of Hunan Pharmacological Society. Hunan expert consensus on the prevention and treatment of venous thromboembolism[J]. *China Journal of General Surgery*, 2026, 35(6):1075–1091. doi: [10.7659/j.issn.1005-6947.260194](https://doi.org/10.7659/j.issn.1005-6947.260194).
- [5] Zhang L, Cao H, Chen Y, et al. Risk factors for venous thromboembolism following spinal surgery: a meta-analysis[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2020, 99(29): e20954. doi: [10.1097/MD.00000000000020954](https://doi.org/10.1097/MD.00000000000020954).
- [6] Zuckerman SL, Berven S, Streiff MB, et al. Management of anticoagulation/antiplatelet medication and venous thromboembolism prophylaxis in elective spine surgery: concise clinical recommendations based on a modified Delphi process[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2023, 48(5): 301–309. doi: [10.1097/BRS.0000000000004540](https://doi.org/10.1097/BRS.0000000000004540).
- [7] Rahmani R, Eaddy S, Stegelmann SD, et al. Chemical prophylaxis and venous thromboembolism following elective spinal surgery: a systematic review and meta-analysis[J]. *N Am Spine Soc J*, 2024, 17:100295. doi: [10.1016/j.xnsj.2023.100295](https://doi.org/10.1016/j.xnsj.2023.100295).
- [8] Kong WQ, Shao C, Du YK, et al. Nomogram for predicting venous thromboembolism after spinal surgery[J]. *Eur Spine J*, 2024, 33(3): 1098–1108. doi: [10.1007/s00586-023-08043-2](https://doi.org/10.1007/s00586-023-08043-2).
- [9] He Y, Wang Z, Zheng X, et al. Construction of nomogram model for risk of venous thromboembolism after spine surgery based on thromboelastography and coagulation indices[J]. *Front Med (Lausanne)*, 2024, 11:1486190. doi: [10.3389/fmed.2024.1486190](https://doi.org/10.3389/fmed.2024.1486190).
- [10] Li X, Ma J, Xue L, et al. Nomogram to assess the risk of deep venous thrombosis after posterior lumbar fusion: a retrospective study[J]. *Global Spine J*, 2025, 15(4): 2169–2175. doi: [10.1177/21925682241289119](https://doi.org/10.1177/21925682241289119).
- [11] Wu X, Wang Z, Zheng L, et al. Construction and verification of a machine learning-based prediction model of deep vein thrombosis formation after spinal surgery[J]. *Int J Med Inform*, 2024, 192: 105609. doi: [10.1016/j.ijmedinf.2024.105609](https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2024.105609).
- [12] Heo KY, Rajan PV, Khawaja S, et al. Machine learning approach to predict venous thromboembolism among patients undergoing multi-level spinal posterior instrumented fusion[J]. *J Spine Surg*, 2024, 10(2):214–223. doi: [10.21037/jss-24-8](https://doi.org/10.21037/jss-24-8).
- [13] Zhao Y, Kong X, Song K, et al. Analysis of risk factors and establishment of prediction model for lower extremity deep vein thrombosis after lumbar fusion surgery[J]. *BMC Surg*, 2024, 24(1): 392. doi: [10.1186/s12893-024-02689-5](https://doi.org/10.1186/s12893-024-02689-5).
- [14] Lv B, Wang H, Zhang Z, et al. Nomogram for predicting postoperative deep vein thrombosis in patients with spinal fractures caused by high-energy injuries[J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2024, 144(1):171–177. doi: [10.1007/s00402-023-05085-5](https://doi.org/10.1007/s00402-023-05085-5).
- [15] Fu G, Wang Y, Tan D, et al. Development and validation of a nomogram for predicting postoperative lower extremity deep vein thrombosis in patients with traumatic spinal fractures: a retrospective study[J]. *PeerJ*, 2026, 14: e21184. doi: [10.7717/peerj.21184](https://doi.org/10.7717/peerj.21184).
- [16] Wang T, Yang SD, Huang WZ, et al. Factors predicting venous thromboembolism after spine surgery[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2016, 95(52):e5776. doi: [10.1097/MD.0000000000005776](https://doi.org/10.1097/MD.0000000000005776).
- [17] Bouyer B, Rudnichi A, Dray-Spira R, et al. Thromboembolic risk after lumbar spine surgery: a cohort study on 325 000 French patients[J]. *J Thromb Haemost*, 2018, 16(8): 1537–1545. doi: [10.1111/jth.14205](https://doi.org/10.1111/jth.14205).
- [18] McLynn RP, Diaz-Collado PJ, Ottesen TD, et al. Risk factors and pharmacologic prophylaxis for venous thromboembolism in elective spine surgery[J]. *Spine J*, 2018, 18(6): 970–978. doi: [10.1016/j.spinee.2017.10.013](https://doi.org/10.1016/j.spinee.2017.10.013).
- [19] Piper K, Algattas H, DeAndrea-Lazarus IA, et al. Risk factors associated with venous thromboembolism in patients undergoing spine surgery[J]. *J Neurosurg Spine*, 2017, 26(1): 90–96. doi: [10.3171/2016.6.SPINE1656](https://doi.org/10.3171/2016.6.SPINE1656).
- [20] Valeriani E, Pannunzio A, Palumbo IM, et al. Risk of venous thromboembolism and arterial events in patients with hypoalbuminemia: a comprehensive meta-analysis of more than

- 2 million patients[J]. *J Thromb Haemost*, 2024, 22(10):2823–2833. doi:10.1016/j.jtha.2024.06.018.
- [21] Inoue H, Watanabe H, Okami H, et al. D-dimer predicts pulmonary embolism after low-risk spine surgery[J]. *Spine Surg Relat Res*, 2018, 2(2):113–120. doi:10.22603/ssrr.2017-0054.
- [22] 陈可, 胡先宇, 李文东, 等. 静脉血栓栓塞症生物标志物的研究进展与临床应用[J]. *中国普通外科杂志*, 2026, 35(6):1239–1250. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.250580.
- Chen K, Hu XY, Li WD, et al. Advances in biomarkers for venous thromboembolism: research progress and clinical applications[J]. *China Journal of General Surgery*, 2026, 35(6):1239–1250. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.250580.
- [23] Takahashi H, Yokoyama Y, Iida Y, et al. Incidence of venous thromboembolism after spine surgery[J]. *J Orthop Sci*, 2012, 17(2):114–117. doi:10.1007/s00776-011-0188-2.
- [24] Glotzbecker MP, Bono CM, Wood KB, et al. Thromboembolic disease in spinal surgery: a systematic review[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2009, 34(3):291–303. doi:10.1097/BRS.0b013e318195601d.
- [25] Uehara M, Ikegami S, Oba H, et al. Frequency and associated factors of venous thromboembolism in cervical spine surgery[J]. *Int J Spine Surg*, 2024, 18(5):457–461. doi:10.14444/8624.
- [26] Jung B, Ngan A, Song J, et al. Rates of venous thromboembolism and mortality have not improved in elective cervical spine surgery from 2012 to 2021[J]. *Clin Spine Surg*, 2026, 39(5):E248-E254. doi:10.1097/bsd.0000000000001858.
- [27] Lambrechts MJ, Toci GR, Issa TZ, et al. Immediate vs delayed venous thromboembolism prophylaxis following spine surgery: increased rate of unplanned reoperation for postoperative hematoma with immediate prophylaxis[J]. *Spine J*, 2024, 24(11):2019–2025. doi:10.1016/j.spinee.2024.06.568.
- [28] Muralidharan A, Gong DC, Baumann AN, et al. Venous thromboembolism chemoprophylaxis is not supported following elective spine surgery: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *J Spine Surg*, 2025, 11(2):242–255. doi:10.21037/jss-24-162.
- [29] Crawford AM, Striano BM, Schoenfeld AJ, et al. Prophylactic subcutaneous heparin is not associated with increased rates of hematoma, pulmonary embolism, or deep vein thrombosis following lumbar fusion: a multi-institutional, propensity score-matched analysis of 3106 patients[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2026, 51(6):377–383. doi:10.1097/BRS.0000000000005607.
- [30] Kepler CK, McKenzie J, Kreitz T, et al. Venous thromboembolism prophylaxis in spine surgery[J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2018, 26(14):489–500. doi:10.5435/jaaos-d-17-00561.
- [31] Alvarado AM, Porto GBF, Wessell J, et al. Venous thromboprophylaxis in spine surgery[J]. *Global Spine J*, 2020, 10(1_suppl):65S–70S. doi:10.1177/2192568219858307.
- [32] Eskildsen SM, Moll S, Lim MR. An algorithmic approach to venous thromboembolism prophylaxis in spine surgery[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2015, 28(8):275–281. doi:10.1097/BSD.0000000000000321.
- [33] Collins GS, Reitsma JB, Altman DG, et al. Transparent Reporting of a multivariable prediction model for Individual Prognosis or Diagnosis (TRIPOD): the TRIPOD statement[J]. *Ann Intern Med*, 2015, 162(1):55–63. doi:10.7326/m14-0697.
- (本文编辑 熊杨)

本文引用格式:王康韬, ALI Muhammad Kashif, 潘柏宏, 等. 基于术后Caprini评分的脊柱手术患者住院期间静脉血栓栓塞增强预测模型构建及内部验证[J]. *中国普通外科杂志*, 2026, 35(8):1632–1642. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.260360

Cite this article as: Wang KT, Ali Muhammad Kashif, Pan BH, et al. Development and internal validation of an enhanced model for predicting in-hospital venous thromboembolism after spine surgery based on the postoperative Caprini score[J]. *Chin J Gen Surg*, 2026, 35(8):1632–1642. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.260360