

基于极端梯度提升算法的肝细胞癌术后胆漏预测模型构建与决策曲线分析

王佳乐, 任定宇, 凌克旺, 童朝刚

安徽医科大学第四附属医院肝胆外科, 安徽 合肥

收稿日期: 2026年4月7日; 录用日期: 2026年4月28日; 发布日期: 2026年5月8日

摘要

目的: 基于极端梯度提升(XGBoost)算法构建肝细胞癌(HCC)根治性肝切除术后胆漏风险预测模型, 结合决策曲线分析(DCA)验证临床应用价值, 为围手术期高危患者精准识别与分层管理提供量化依据。方法: 采用回顾性队列研究设计, 收集2015年12月至2025年12月350例HCC根治性肝切除患者临床资料, 依据ISGLS标准分为胆漏组(42例)与非胆漏组(308例)。经单因素分析和LASSO回归降维筛选关键变量, 按7:3分为训练集(245例)与验证集(105例), 构建XGBoost模型并五折交叉验证优化超参数。与LR、RF、GBM模型对比判别能力与临床净获益, 以AUC、准确率、灵敏度、特异度评价判别能力, 校准曲线与Brier评分验证校准度, DCA分析临床净获益, SHAP值解析特征重要度与交互效应。结果: 350例HCC患者术后胆漏发生率12.0%, 单因素联合LASSO筛选出9个关键变量。XGBoost模型训练集与验证集AUC分别为0.908、0.849, 显著高于LR(0.807、0.763)、RF(0.872、0.817)及GBM(0.886、0.831); 验证集准确率、灵敏度、特异度分别为0.848、0.786、0.854, Brier评分0.11, 校准曲线显示预测概率与真实发生率高度一致。DCA显示0.05~0.60风险阈值范围内XGBoost净获益持续高于LR及两种极端策略。SHAP分析表明大范围肝切除、胆道重建、术中失血量为三大核心危险因素, 且存在协同交互效应。结论: 基于XGBoost算法构建的HCC术后胆漏预测模型具有优异的判别能力与校准度, 其临床净获益显著, 可有效实现术前、术中对胆漏高危患者的精准识别, 为围手术期手术策略优化、血流动力学管理、肝功能保护等干预措施的制定提供了靶向方向, 具有重要的临床转化与应用价值。

关键词

肝细胞癌, 肝切除, 术后胆漏, 极端梯度提升算法, 风险预测模型, 决策曲线分析, SHAP值

Prediction Model Construction and Decision Curve Analysis of Postoperative Bile Leakage in Hepatocellular Carcinoma Based on Extreme Gradient Boosting Algorithm

Jiale Wang, Dingyu Ren, Kewang Ling, Chaogang Tong

Department of Hepatobiliary Surgery, The Fourth Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Hefei Anhui

Received: April 7, 2026; accepted: April 28, 2026; published: May 8, 2026

Abstract

Objective: To develop a predictive model for the risk of bile leakage following curative hepatectomy for hepatocellular carcinoma (HCC) using the Extreme Gradient Boosting (XGBoost) algorithm, to validate its clinical utility through decision curve analysis (DCA), and to provide quantitative evidence for the precise identification and stratified management of high-risk patients during the perioperative period. **Methods:** A retrospective cohort study design was employed. Clinical data were collected from 350 patients who underwent curative hepatectomy for HCC between December 2015 and December 2025. Patients were classified into a bile leak group (42 cases) and a non-bile leak group (308 cases) according to ISGLS criteria. Key variables were screened through univariate analysis and LASSO regression for dimensionality reduction. The dataset was split 7:3 into a training set (245 cases) and a validation set (105 cases), and an XGBoost model was constructed with five-fold cross-validation to optimize hyperparameters. The discriminatory performance and clinical net benefit were compared with those of LR, RF, and GBM models. Discriminatory performance was evaluated using AUC, accuracy, sensitivity, and specificity; calibration was verified using ROC curves and Brier scores; clinical net benefit was analyzed using DCA; and feature importance and interaction effects were interpreted using SHAP values. **Results:** The incidence of postoperative bile leakage among 350 HCC patients was 12.0%. Univariate analysis combined with LASSO identified 9 key variables. The AUC values for the XGBoost model on the training set and validation set were 0.908 and 0.849, respectively, which were significantly higher than those of LR (0.807, 0.763), RF (0.872, 0.817), and GBM (0.886, 0.831); the validation set accuracy, sensitivity, and specificity were 0.848, 0.786, and 0.854, respectively, with a Brier score of 0.11. The calibration curve demonstrated high consistency between predicted probability and actual incidence. DCA analysis showed that within the risk threshold range of 0.05~0.60, the net benefit of XGBoost consistently exceeded that of LR and the two extreme strategies. SHAP analysis indicated that extensive liver resection, biliary reconstruction, and intraoperative blood loss were the three core risk factors, with synergistic interactions among them. **Conclusion:** The postoperative bile leak prediction model for HCC, constructed using the XGBoost algorithm, demonstrates excellent discriminatory power and calibration. It offers significant clinical net benefit and can effectively identify high-risk patients for bile leaks before and during surgery. This model provides a targeted direction for formulating perioperative interventions, including optimization of surgical strategies, hemodynamic management, and liver function protection, and holds significant clinical translation and application value.

Keywords

Hepatocellular Carcinoma, Hepatectomy, Postoperative Bile Leakage, Extreme Gradient Boosting Algorithm, Risk Prediction Model, Decision Curve Analysis, SHAP Value

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

肝细胞癌是我国高发的恶性肿瘤之一，根治性肝切除术仍是中早期患者获得长期生存的核心手段[1]。

但肝切除手术操作精细、解剖复杂，且多合并肝硬化、肝功能储备不足等问题，术后并发症发生率居高不下，其中胆漏是最具代表性的棘手并发症之一[2]。根据 ISGLS 诊断标准，肝切除术后胆漏发生率约 4%~12%，在大范围肝切除、胆道重建等复杂术中可升至 20% 以上，其发生可诱发胆汁性腹膜炎、腹腔脓肿等继发问题，显著延长住院时间、增加医疗成本，甚至延误后续综合治疗，严重影响患者短期预后与长期生存[3] [4]。

目前 HCC 术后胆漏风险评估多依赖临床经验，缺乏系统量化工具，难以实现高危患者早期预警[5]。传统统计模型(如 LR)虽可解释性强，但受限线性假设，对多因素驱动事件的预测效能有限[6]。机器学习算法凭借复杂数据处理能力在风险预测领域广泛应用，其中 XGBoost 在特征筛选及非线性关系挖掘方面优势显著，在肝切除术后肝功能衰竭、胰腺癌术后出血等并发症预测中表现优于传统模型[7] [8]。现有研究虽尝试将机器学习应用于肝切除术后胆漏预测，但多存在样本量小、变量不全、验证不充分等问题，且缺乏临床净获益评估，难以满足精准管理需求[9]。决策曲线分析可量化不同风险阈值下的净获益，直观反映模型对临床决策的指导价值，弥补了传统效能指标仅关注判别能力的局限[10]。此外，机器学习模型的“黑箱”特性限制了其临床推广，而 SHAP 值可从全局与局部层面解析特征重要度及边际效应，为模型可解释性提供支撑[11]。基于此，本研究构建 XGBoost 术后胆漏预测模型并验证性能，结合 SHAP 解析模型规律，旨在为 HCC 术后胆漏的精准预警与个体化管理提供量化工具，推动围手术期风险评估的智能化发展。

2. 资料与方法

2.1. 研究对象

回顾性收集 2015 年 12 月至 2025 年 12 月在安徽医科大学第一附属医院肝胆胰外科行根治性肝切除的 HCC 患者临床资料。纳入标准：① 年龄 18~80 岁；② 术前经影像学检查或术后病理证实为肝细胞癌；③ 行根治性肝切除术，手术切缘病理检查阴性；④ 术前肝功能 Child-Pugh 分级为 A 或 B 级，预留肝体积满足手术安全要求；⑤ 围手术期临床资料、手术记录及术后随访信息完整。排除标准：① 合并其他原发性恶性肿瘤或肝内转移性肿瘤；② 同期合并胆总管结石、严重胆道感染等影响胆道解剖及胆汁引流的疾病；③ 既往有大范围肝切除或胆道重建手术史；④ 术前存在胆漏或腹腔内胆汁性积液；⑤ 围手术期 7 d 内死亡或因非手术相关原因出院；⑥ 临床关键变量缺失比例 > 20% 且无法补全。

2.2. 变量定义与资料收集

通过医院电子病历系统及手术麻醉系统收集患者多维度临床资料：① 一般人口学与基础疾病变量：性别、年龄、体质指数(BMI)、吸烟、饮酒史、高血压、糖尿病等；② 术前实验室指标：血常规、肝功能、凝血功能、Child-Pugh 分级；③ 肿瘤学特征：肿瘤最大径、肿瘤个数、肿瘤部位、肝硬化程度等；④ 术中相关指标：肝切除范围、肝门部淋巴结清扫、胆道重建、手术时间、术中失血量、术中中心静脉压(CVP)水平；⑤ 术后早期指标：术后 24~72 h 引流液量、引流液胆红素浓度、胆汁性腹膜炎表现、腹腔脓肿/积液发生情况。主要结局指标为术后胆漏发生情况，依据 ISGLS 诊断标准判定：术后第 3 天及以后引流液胆红素浓度 \geq 同期血清胆红素浓度的 3 倍，或因怀疑胆汁性腹膜炎、腹腔胆汁性积液需行经皮穿刺引流、介入治疗或再次手术者。

2.3. 数据清洗、划分、特征筛选与统计学方法

数据清洗：连续变量缺失 < 10% 者以中位数填补，分类变量以众数填补；异常值进行合理性判断与截断；偏态分布变量作对数转换。按 7:3 随机分为训练集与验证集，行基线平衡性检验。以术后胆漏为因

变量行单因素分析, 将 $P < 0.05$ 变量纳入候选特征集, 采用 LASSO 回归进一步降维筛选, 经 10 折交叉验证选择最优 λ , 保留非零系数变量作为关键特征, 以降低多重共线性、减少过拟合、提升泛化能力。以 SPSS 27.0 软件进行分析, 计量资料正态分布以 $(\bar{x} \pm s)$ 表示, 非正态分布以中位数(四分位数)表示; 计数资料以例数(百分比)表示。机器学习建模、模型性能评估及可解释性分析均在 Python 3.X 环境下完成。所有统计检验均为双侧检验, $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2.4. XGBoost 模型构建与优化

基于 LASSO 筛选特征, 在 Python 3.X 环境下利用 xgboost、scikit-learn 库构建 XGBoost 模型。采用五折交叉验证结合网格搜索优化超参数, 以训练集平均 AUC 最大为目标, 兼顾灵敏度、特异度与准确率。超参数搜索空间设定为: 学习率(learning_rate)在[0.01, 0.05, 0.1, 0.2]中选取, 树数目(n_estimators)在[50, 100, 200, 300]中选取, 最大树深度(max_depth)在[3, 5, 7, 9]中选取, 子采样率(subsample)和列采样率(colsample_bytree)均在[0.6, 0.8, 1.0]中选取, L1 正则化强度(alpha)和 L2 正则化强度(lambda)均在[0, 0.1, 1, 10]中选取。同步构建 LR、RF、GBM 模型进行对比: LR 采用逐步回归; RF、GBM 采用相同优化策略。所有模型以最优超参数组合确定。

2.5. 模型性能评估与可解释性分析

分别计算 XGBoost 与 LR 模型在训练集和验证集中的 AUC、准确率、灵敏度、特异度、阳性预测值、阴性预测值, 绘制 ROC 曲线比较判别能力。绘制验证集 XGBoost 校准曲线, 计算 Brier 评分(越接近 0 校准越好), 采用 Hosmer-Lemeshow 检验验证拟合效果($P > 0.05$ 提示拟合良好)。绘制 XGBoost、LR、RF、GBM 及“全部干预”“均不干预”策略的决策曲线, 计算不同风险阈值下的临床净获益, 评估模型临床应用价值。采用特征重要度评分量化 XGBoost 模型预测结果的贡献程度; 绘制 SHAP 汇总图与特征依赖图, 明确各变量对胆漏发生的影响, 并利用 SHAP 交互作用值深入分析核心危险因素之间的协同交互效应, 提升模型的临床可解释性。

3. 结果

3.1. 研究对象基线资料与样本平衡性

本研究纳入 350 例 HCC 根治性肝切除患者, 男性 192 例, 女性 158 例, 中位年龄 58 (31~79) 岁, 术后胆漏 42 例(12.0%)。按 7:3 分为训练集 245 例(胆漏 29 例)与验证集 105 例(胆漏 13 例), 两组基线资料差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$, 表 1), 提示样本同质性良好, 可用于模型构建与验证。

Table 1. Comparison of baseline patient data between the training and validation sets

表 1. 训练集与验证集患者基线资料比较

相关资料	训练集(n = 245)	验证集(n = 105)	统计值	P 值
性别 - 男	134 (54.69%)	58 (55.24%)	$\chi^2 = 0.009$	0.992
性别 - 女	111 (45.31%)	47 (44.76%)	-	-
年龄(岁)	57.89 \pm 9.12	59.23 \pm 8.87	t = -1.132	0.258
BMI (kg/m ²)	24.12 \pm 2.87	24.08 \pm 2.71	t = 0.145	0.885
吸烟史 - 有	75 (30.61%)	31 (29.52%)	$\chi^2 = 0.038$	0.845
吸烟史 - 无	170 (69.39%)	74 (70.48%)	-	-
饮酒史 - 有	59 (24.08%)	26 (24.76%)	$\chi^2 = 0.023$	0.879
饮酒史 - 无	186 (75.92%)	79 (75.24%)	-	-

续表

高血压 - 有	72 (29.39%)	30 (28.57%)	$\chi^2 = 0.031$	0.860
高血压 - 无	173 (70.61%)	75 (71.43%)	-	-
糖尿病 - 有	41 (16.73%)	17 (16.19%)	$\chi^2 = 0.018$	0.893
糖尿病 - 无	204 (83.27%)	88 (83.81%)	-	-
肝硬化 - 有	135 (55.10%)	56 (53.33%)	$\chi^2 = 0.127$	0.722
肝硬化 - 无	110 (44.90%)	49 (46.67%)	-	-
总胆红素($\mu\text{mol/L}$)	18.07 \pm 6.59	18.25 \pm 6.63	t = -0.228	0.820
凝血酶原时间(s)	12.85 \pm 1.17	12.93 \pm 1.11	t = -0.512	0.609
Child-Pugh A 级	211 (86.12%)	90 (85.71%)	$\chi^2 = 0.012$	0.913
Child-Pugh B 级	34 (13.88%)	15 (14.29%)	-	-
大范围肝切除	51 (20.82%)	23 (21.90%)	$\chi^2 = 0.087$	0.768
小中范围肝切除	194 (79.18%)	82 (78.10%)	-	-
术中失血量(mL)	426.89 \pm 207.56	421.34 \pm 205.12	t = 0.209	0.835
术后胆漏 - 是	29 (11.84%)	13 (12.38%)	$\chi^2 = 0.027$	0.869
术后胆漏 - 否	216 (88.16%)	92 (87.62%)	-	-

3.2. 术后胆漏相关单因素分析

单因素分析显示,胆漏组与非胆漏组在 BMI、Child-Pugh 分级、术前总胆红素、凝血酶原时间、肝切除范围、肝门部淋巴结清扫、胆道重建、术中失血量、术中 CVP 控制水平等方面差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$, 表 2),性别等方面差异无统计学意义(均 $P > 0.05$, 表 2)。

Table 2. Univariate analysis of clinical indicators in patients with and without bile leakage

表 2. 胆漏组与非胆漏组患者临床指标单因素分析

指标	胆漏组(n = 42)	非胆漏组(n = 308)	统计值	P 值
性别 - 男	18 (42.86%)	174 (56.49%)	$\chi^2 = 2.315$	0.128
性别 - 女	24 (57.14%)	134 (43.51%)	-	-
年龄(岁)	59.38 \pm 8.67	58.21 \pm 9.08	t = 0.723	0.470
BMI (kg/m^2)	26.39 \pm 2.57	23.72 \pm 2.71	t = 5.872	<0.001
Child-Pugh B 级	15 (35.71%)	34 (11.04%)	$\chi^2 = 18.762$	<0.001
Child-Pugh 非 B 级	27 (64.29%)	274 (88.96%)	-	-
总胆红素($\mu\text{mol/L}$)	20.87 \pm 7.31	17.76 \pm 6.32	t = 2.415	0.016
凝血酶原时间(s)	13.58 \pm 1.02	12.75 \pm 1.15	t = 4.218	<0.001
大范围肝切除	20 (47.62%)	54 (17.53%)	$\chi^2 = 16.893$	<0.001
非大肝切除范围	22 (52.38%)	254 (82.47%)	-	-
肝门部淋巴结清扫 - 是	12 (28.57%)	38 (12.34%)	$\chi^2 = 6.217$	0.013
肝门部淋巴结清扫 - 否	30 (71.43%)	270 (87.66%)	-	-
胆道重建 - 是	11 (26.19%)	13 (4.22%)	$\chi^2 = 25.384$	<0.001
胆道重建 - 否	31 (73.81%)	295 (95.78%)	-	-

续表

术中失血量(mL)	581.37 ± 185.24	398.76 ± 202.15	t = 5.129	<0.001
术中 CVP 控制偏高	20 (47.62%)	72 (23.38%)	$\chi^2 = 10.125$	0.001
术中 CVP 控制正常	22 (52.38%)	236 (76.62%)	-	-

3.3. LASSO 回归特征筛选结果

将单因素分析 $P < 0.05$ 的变量纳入 LASSO 回归, 经 10 折交叉验证确定最优惩罚参数 λ 。随着 λ 增大, 9 个变量系数始终保持非零(图 1), 确定最优 λ 值(图 2), 最终筛选出 BMI 偏高、Child-Pugh 分级较高、术前总胆红素升高、凝血酶原时间延长、大范围肝切除、肝门部淋巴结清扫、胆道重建、术中失血量大、术中 CVP 偏高 9 个关键变量作为建模特征集。

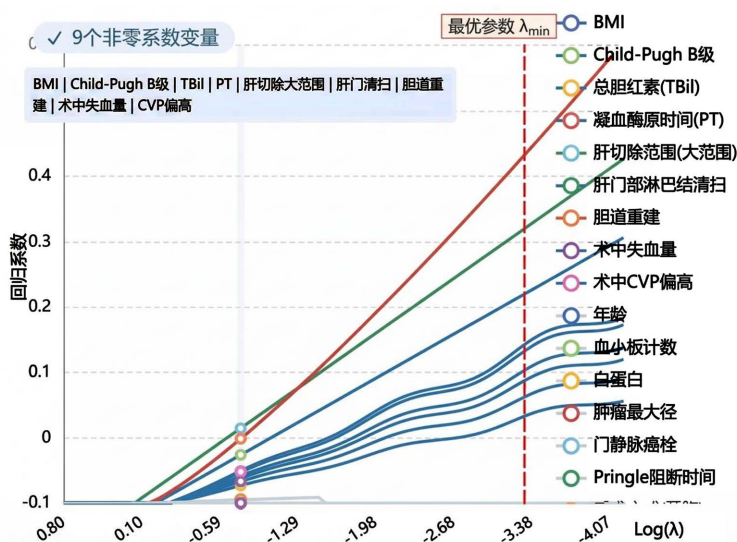


Figure 1. LASSO regression coefficient shrinkage trajectory plot
图 1. LASSO 回归变量系数收缩轨迹图

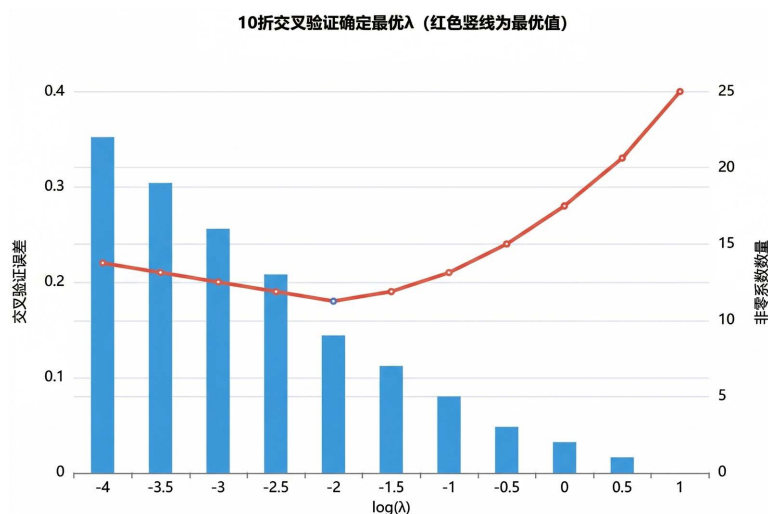


Figure 2. LASSO regression 10-fold cross-validation error curve
图 2. LASSO 回归 10 折交叉验证误差曲线

3.4. XGBoost 模型与 LR 模型判别能力比较

结果表明 XGBoost 模型在训练集和验证集中均优于其他模型, 具有良好的泛化能力(表 3、图 3、图 4)。

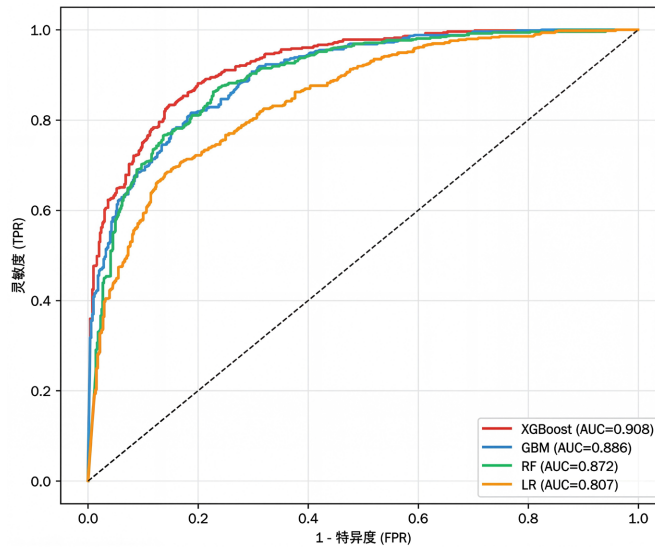


Figure 3. ROC curves for each model on the training set

图 3. 训练集各模型 ROC 曲线

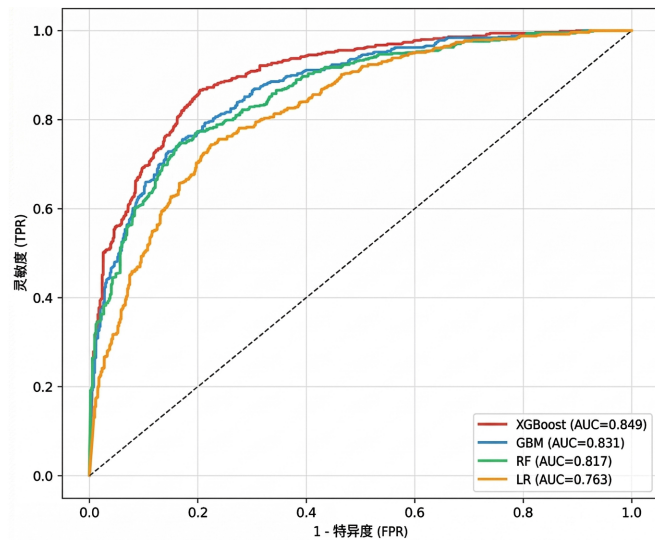


Figure 4. ROC curves for each model on the validation set

图 4. 验证集各模型 ROC 曲线

Table 3. Comparison of discrimination metrics between XGBoost and Logistic Regression models

表 3. XGBoost 与 LR 模型判别能力指标比较

模型	数据集	AUC	准确率(%)	灵敏度(%)	特异度(%)	阳性预测值(%)	阴性预测值(%)
LR	训练集	0.807	77.9	68.9	78.7	34.2	94.1
LR	验证集	0.763	75.7	61.5	77.2	28.5	93.5
XGBoost	训练集	0.908	87.3	86.2	87.5	52.1	97.3
XGBoost	验证集	0.849	84.8	78.6	85.4	44.7	96.7

3.5. XGBoost 模型校准度分析

XGBoost 模型验证集校准曲线显示，预测概率与实际发生率在 0~0.6 区间高度一致，0.6~1.0 区间轻微偏离(图 5)。Brier 评分 0.11，Hosmer-Lemeshow 检验 $P = 0.695 > 0.05$ ，提示模型校准度良好，预测概率可靠。

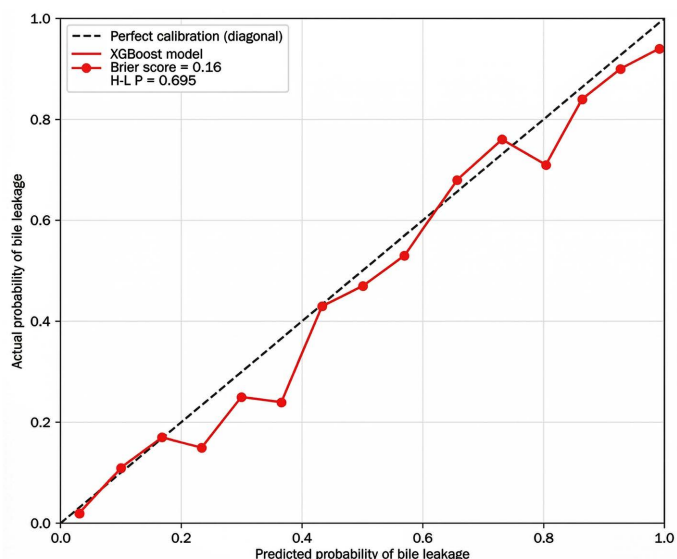


Figure 5. Calibration curve of the XGBoost model on the validation set
图 5. XGBoost 模型在验证集的校准曲线

3.6. 模型临床净获益的决策曲线分析

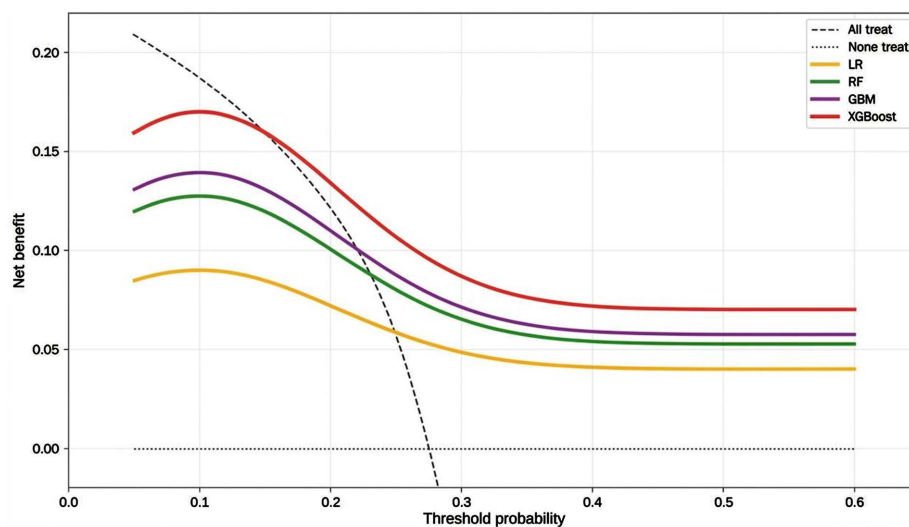


Figure 6. Decision Curve Analysis (DCA) of each model on the validation set
图 6. 各模型在验证集的决策曲线分析(DCA)

DCA 显示，在 0.05~0.60 临床可接受风险阈值范围内，XGBoost 决策曲线始终位于 LR、GBM、RF 及“全部干预”“均不干预”策略上方(图 6)。风险阈值 0.10 时 XGBoost 净获益达峰值 0.17，显著高于 LR 的 0.09；0.05~0.60 区间内 XGBoost 净获益从 0.07 升至 0.17 后缓降，始终高于其他模型，提示该模型

指导临床干预可获得更高净获益，有效减少过度干预与漏判。

3.7. XGBoost 模型可解释性分析

3.7.1. 特征重要度

重要度评分结果显示，大范围肝切除、胆道重建、术中失血量为影响 HCC 术后胆漏发生的前三位核心危险因素(表 4)。特征重要度条形图直观反映了各变量对模型预测结果的贡献程度(图 7)。

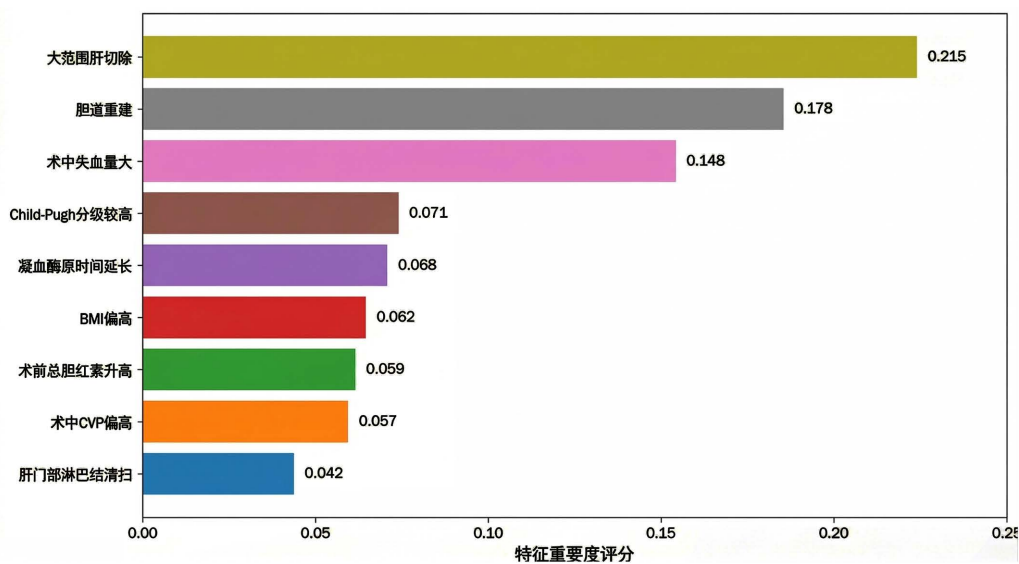


Figure 7. Bar chart of feature importance for the XGBoost model

图 7. XGBoost 模型特征重要度条形图

Table 4. Ranking of feature importance for key variables in the XGBoost model

表 4. XGBoost 模型关键变量特征重要度排名

排名	变量名称	重要度评分
1	大范围肝切除	0.215
2	胆道重建	0.178
3	术中失血量	0.148
4	术中 CVP	0.118
5	Child-Pugh 分级	0.107
6	术前总胆红素	0.092
7	凝血酶原时间	0.085
8	BMI 偏高	0.078
9	肝门部淋巴结清扫	0.070

3.7.2. SHAP 值分析

SHAP 汇总图显示，大范围肝切除、胆道重建等变量 SHAP 值为正且数值较大，提示为胆漏发生的强危险因素；Child-Pugh A 级、术中 CVP 正常等变量 SHAP 值为负，提示为保护因素(图 8)。SHAP 特征依赖图显示，术中失血量 > 500 mL 时 SHAP 值呈指数级上升，胆漏风险显著增加(图 9)。

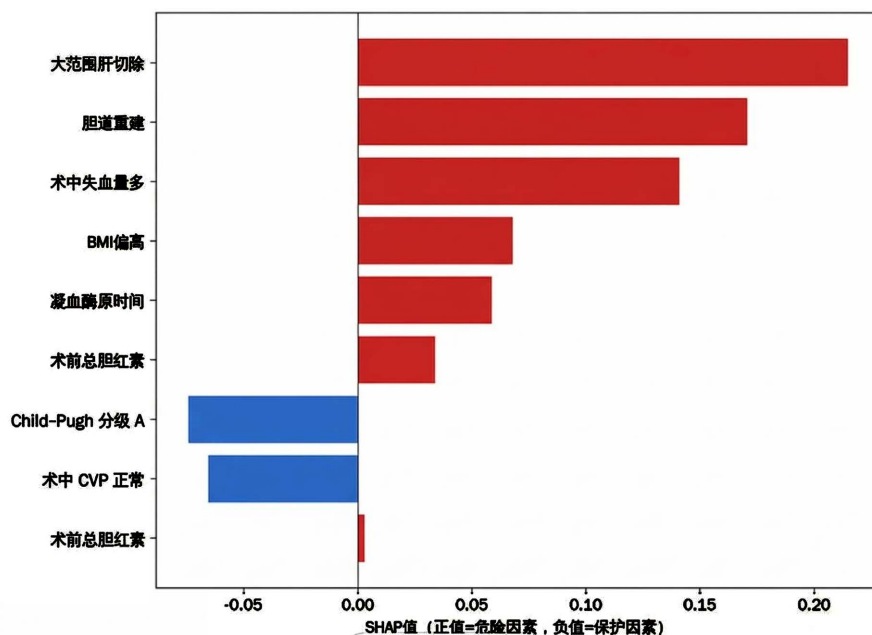


Figure 8. SHAP summary plot of XGBoost model

图 8. XGBoost 模型 SHAP 汇总图

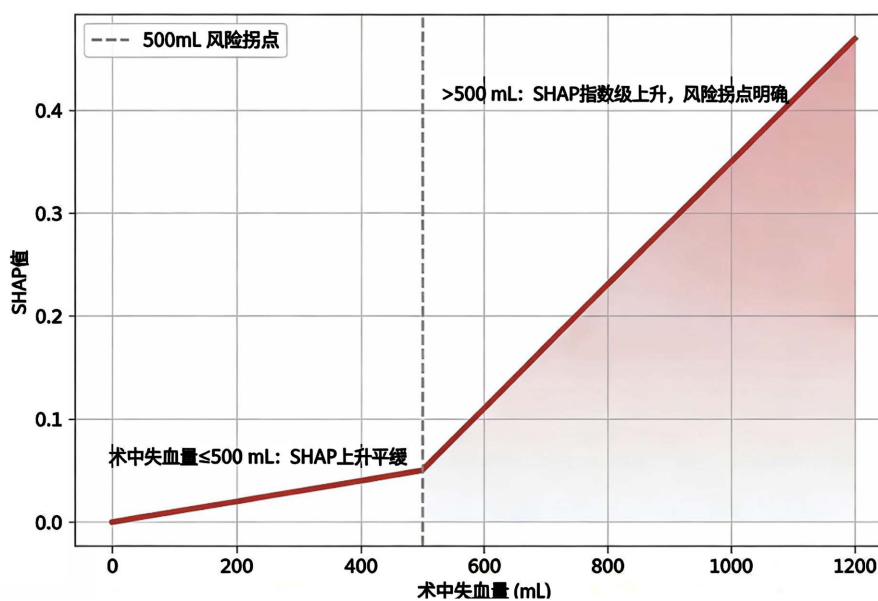


Figure 9. SHAP feature dependencies of core variables in the XGBoost model

图 9. XGBoost 模型核心变量 SHAP 特征依赖

4. 讨论

肝细胞癌根治性肝切除术后胆漏发生机制复杂，精准识别并个体化干预是降低其发生率的关键[12]。本研究构建 XGBoost 预测模型，经验证具有优异的判别能力、校准度与临床净获益，结合 SHAP 值解析核心危险因素，为围手术期管理提供量化依据[13] [14]。

本研究 HCC 患者术后胆漏发生率 12.0%，与国内外报道基本一致[15] [16]，提示胆漏仍是肝切除术后常见并发症，需加强风险防控。单因素联合 LASSO 筛选的关键变量全面反映胆漏多因素特征，LASSO

有效解决了多重共线性，提升了模型泛化能力[17]。本研究结果提示 XGBoost 模型判别能力显著优于其他模型，这与其算法特性密切相关：通过集成多棵决策树捕捉非线性关系与高维交互效应，结合正则化与五折交叉验证有效避免过拟合，更适合处理临床多因素驱动的并发症预测问题[18]。特征重要度与 SHAP 值解析显示，大范围肝切除、胆道重建、术中失血量为影响 HCC 术后胆漏的三大核心危险因素[19]。大范围肝切除重要度最高，因半肝及以上切除导致肝内胆管分支离断增多、切缘暴露扩大，胆管损伤风险显著增加[19]；胆道重建为第二大危险因素，吻合口愈合不良、漏液风险高，且手术难度大易损伤周围胆管分支[20][21]；术中失血量过多导致组织灌注下降、胆管断端修复愈合受影响，同时凝血功能受抑加剧渗胆[22]。

基于本研究结果可构建风险阈值分层管理路径。DCA 显示最佳风险阈值为 0.10，据此建议：低风险组(概率 < 0.10)按标准流程管理；高风险组(≥ 0.10)实施升级干预，包括术前优化肝功能、纠正凝血异常，术中精细解剖、控制 CVP、减少失血，术后延长引流、监测胆红素、早期使用生长抑素、强化营养与感染防控，必要时尽早穿刺引流或再手术[23]，实现从预测到决策的转化。未来可将模型封装为 Web 风险计算器，输入 9 项指标即可输出风险概率与管理建议，并基于 SHAP 探索构建简易评分系统或列线图，提升临床可及性。

本研究局限性：① 单中心回顾性研究，10 年时间跨度内手术技术与管理理念变化可能引入历史偏倚，样本量虽满足建模但可能存在选择偏倚，需多中心前瞻性研究验证外部有效性；② 未纳入术后护理、营养状况等因素，后续可丰富变量维度提升预测效能；③ 两步法特征筛选(单因素 + P 值阈值)可能遗漏联合预测效力显著的变量，未来可采用一体化正则化方法；④ 模型尚未开发为临床实用软件，后续需转化为便捷应用系统提升可操作性。

综上所述，基于 XGBoost 构建的 HCC 根治性肝切除术后胆漏预测模型是有效的辅助决策工具，可实现术前、术中对高危患者的精准识别。大范围肝切除、胆道重建、术中失血量为术后胆漏的核心危险因素，模型解析结果为手术策略优化、血流动力学管理、肝功能保护等干预措施提供靶向方向。该模型为 HCC 术后胆漏精准预警与个体化管理提供科学可行的量化工具，具有重要临床转化价值，但其广泛应用尚需多中心前瞻性研究进一步验证完善。

声明

研究方案经本院伦理委员会审批通过(伦理批准号：KYXM-202407-019)，符合《赫尔辛基宣言》相关要求。因本研究为回顾性分析，已免除患者再次签署知情同意，对所有资料严格匿名化处理，仅用于科学研究。

参考文献

- [1] Malik, A.K., Geh, D., Jeffrey Evans, T.R., Chow, P.K.H., Mann, D.A. and White, S.A. (2026) Improving Surgical Treatments for Hepatocellular Carcinoma. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, **23**, 208-226. <https://doi.org/10.1038/s41575-025-01143-y>
- [2] Shen, Y., Hu, Y., Xu, J., Zhu, S., Cai, L., Wu, Y., et al. (2025) Incidence, Risk Factors, Outcomes, and Prediction Model of Surgical Site Infection after Hepatectomy for Hepatocellular Carcinoma: A Multicenter Cohort Study. *European Journal of Surgical Oncology*, **51**, 109486. <https://doi.org/10.1016/j.ejso.2024.109486>
- [3] 徐若翔, 曾智明, 朱广志, 等. 肝细胞癌 AASLD (2023 年版)、NCCN (2024 年版)、ASCO (2024 年版)指南和中国《原发性肝癌诊疗指南(2024 年版)》更新解读[J]. 中国普外基础与临床杂志, 2025, 32(2): 184-191.
- [4] Rahbari, N.N., Garden, O.J., Padbury, R., Brooke-Smith, M., Crawford, M., Adam, R., et al. (2011) Posthepatectomy Liver Failure: A Definition and Grading by the International Study Group of Liver Surgery (ISGLS). *Surgery*, **149**, 713-724. <https://doi.org/10.1016/j.surg.2010.10.001>
- [5] Sadamori, H., Yagi, T., Matsuda, H., Shinoura, S., Umeda, Y., Yoshida, R., et al. (2010) Risk Factors for Major

- Morbidity after Hepatectomy for Hepatocellular Carcinoma in 293 Recent Cases. *Journal of Hepato-Biliary-Pancreatic Sciences*, **17**, 709-718. <https://doi.org/10.1007/s00534-010-0275-3>
- [6] Sliwinski, S., Heil, J., Franz, J., El Youzouri, H., Heise, M., Bechstein, W.O., *et al.* (2023) A Critical Appraisal of the ISGLS Definition of Biliary Leakage after Liver Resection. *Langenbeck's Archives of Surgery*, **408**, Article No. 77. <https://doi.org/10.1007/s00423-022-02746-8>
- [7] Altaf, A., Munir, M.M., Khan, M.M.M., Rashid, Z., Khalil, M., Guglielmi, A., *et al.* (2025) Machine Learning Based Prediction Model for Bile Leak Following Hepatectomy for Liver Cancer. *HPB*, **27**, 489-501. <https://doi.org/10.1016/j.hpb.2024.12.015>
- [8] Zwirner, S., Abu Rmilah, A.A., Klotz, S., Pfaffenroth, B., Kloevckorn, P., Moschopoulou, A.A., *et al.* (2024) First-in-Class MKK4 Inhibitors Enhance Liver Regeneration and Prevent Liver Failure. *Cell*, **187**, 1666-1684.e26. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2024.02.023>
- [9] Tashiro, H., Onoe, T., Tanimine, N., Tazuma, S., Shibata, Y., Sudo, T., *et al.* (2024) Utility of Machine Learning in the Prediction of Post-Hepatectomy Liver Failure in Liver Cancer. *Journal of Hepatocellular Carcinoma*, **11**, 1323-1330. <https://doi.org/10.2147/jhc.s451025>
- [10] Li, H., Chen, S., Lu, L., Hu, X., Lin, S. and Zhu, L. (2022) Decision Curve Analysis to Identify Optimal Candidates of Liver Resection for Intermediate-Stage Hepatocellular Carcinoma with Hepatitis B Cirrhosis: A Cohort Study. *Medicine*, **101**, e31325. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000031325>
- [11] Qi, X., Wang, S., Fang, C., Jia, J., Lin, L. and Yuan, T. (2025) Machine Learning and SHAP Value Interpretation for Predicting Comorbidity of Cardiovascular Disease and Cancer with Dietary Antioxidants. *Redox Biology*, **79**, Article ID: 103470. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2024.103470>
- [12] Xue, S., Wang, H., Chen, X. and Zeng, Y. (2023) Risk Factors of Postoperative Bile Leakage after Liver Resection: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Cancer Medicine*, **12**, 14922-14936. <https://doi.org/10.1002/cam4.6128>
- [13] Zhang, X., Gavalda, R. and Baixeries, J. (2022) Interpretable Prediction of Mortality in Liver Transplant Recipients Based on Machine Learning. *Computers in Biology and Medicine*, **151**, Article ID: 106188. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2022.106188>
- [14] Sadamori, H., Yagi, T., Shinoura, S., Umeda, Y., Yoshida, R., Satoh, D., *et al.* (2013) Risk Factors for Organ/Space Surgical Site Infection after Hepatectomy for Hepatocellular Carcinoma in 359 Recent Cases. *Journal of Hepato-Biliary-Pancreatic Sciences*, **20**, 186-196. <https://doi.org/10.1007/s00534-011-0503-5>
- [15] Tan, L., Liu, F., Liu, Z. and Xiao, J. (2021) Meta-Analysis of Risk Factors for Bile Leakage after Hepatectomy without Biliary Reconstruction. *Frontiers in Surgery*, **8**, Article ID: 764211. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2021.764211>
- [16] Vienet, J., Labgaa, I., Duran, R., Godat, S., Blanc, C., Uldry, E., *et al.* (2025) Incidence and Risk Factors of Biliary Leaks after Partial Hepatectomy within an Enhanced Recovery Perioperative Pathway: A Single-Center Retrospective Cohort Study. *Langenbeck's Archives of Surgery*, **410**, Article No. 104. <https://doi.org/10.1007/s00423-025-03677-w>
- [17] Li, W., Chang, C., Kundu, S. and Long, Q. (2024) Accounting for Network Noise in Graph-Guided Bayesian Modeling of Structured High-Dimensional Data. *Biometrics*, **80**, ujae012. <https://doi.org/10.1093/biomtc/ujae012>
- [18] 刘小峰, 洪智文, 陈芳, 等. XGBoost 模型与 Logistic 回归模型预测儿童 TBTB 合并 MPP 的价值[J]. 华夏医学, 2024, 37(5): 55-61.
- [19] Mahamid, A. (2026) Correspondence: "Impact of Post-Hepatectomy Liver Failure on Recurrence Following Major Hepatectomy for Colorectal Cancer Liver Metastases". *HPB*, **28**, Article No. 596. <https://doi.org/10.1016/j.hpb.2025.12.020>
- [20] Scholz, C., Hoppe-Lotichius, M., Weinmann, A., Foerster, F., Bartsch, F. and Lang, H. (2025) Performance of Major Liver Resection for Gallbladder Cancer—A Western Retrospective Single Center Cohort Study. *Hepatobiliary Surgery and Nutrition*, **14**, 914-926. <https://doi.org/10.21037/hbsn-24-440>
- [21] Cauchy, F., Fuks, D., Nomi, T., Schwarz, L., Belgaumkar, A., Scatton, O., *et al.* (2015) Incidence, Risk Factors and Consequences of Bile Leakage Following Laparoscopic Major Hepatectomy. *Surgical Endoscopy*, **30**, 3709-3719. <https://doi.org/10.1007/s00464-015-4666-z>
- [22] Altaf, A., Akabane, M., Khalil, M., Rashid, Z., Zindani, S., Kawashima, J., *et al.* (2025) Impact of Intraoperative Blood Loss on Postoperative Morbidity after Liver Resection for Primary and Secondary Liver Cancer. *HPB*, **27**, 660-669. <https://doi.org/10.1016/j.hpb.2025.01.010>
- [23] Junrungsee, S., Vipudhamorn, W., Lapisatepun, W., Thepbunchonchai, A., Chotirosniramit, A., Lapisatepun, W., *et al.* (2025) Portal Flow Modulation by Splenic Artery Ligation to Prevent Posthepatectomy Liver Failure: A Randomized Controlled Trial. *Surgery*, **185**, Article ID: 109351. <https://doi.org/10.1016/j.surg.2025.109351>