



doi:10.7659/j.issn.1005-6947.260122
http://dx.doi.org/10.7659/j.issn.1005-6947.260122
China Journal of General Surgery, 2026, 35(3):480-487.

· 专题研究 ·

多算法机器学习模型在胰十二指肠切除术后胰瘘风险预测中的构建与比较

王珂璇, 金晓灵

(东南大学附属中大医院 肝胆胰中心, 江苏 南京 210000)

摘要

背景与目的: 胰十二指肠切除术 (PD) 后临床相关性术后胰瘘 (CR-POPF) 是影响患者预后的关键并发症之一。传统风险评估模型在复杂非线性关系处理方面存在局限。本研究旨在筛选 CR-POPF 的独立危险因素, 并基于多种机器学习算法构建与比较预测模型, 以提高风险评估的准确率。

方法: 回顾性纳入 2016 年 1 月—2025 年 12 月东南大学附属中大医院行 PD 的 334 例患者。采用单因素及多因素 Logistic 回归筛选 CR-POPF 独立危险因素。按照 7:3 比例随机分为训练集和验证集, 基于 Logistic 回归 (LR)、人工神经网络 (ANN)、决策树 (DT)、随机森林 (RF) 及支持向量机 (SVM) 构建预测模型。通过受试者工作特征曲线下面积 (AUC)、敏感度、特异度、阳性预测值、阴性预测值、*F1* 值及准确度评估模型性能。

结果: 多因素分析显示, 体质量指数升高 (*OR*=1.167)、糖尿病 (*OR*=3.826)、高血压 (*OR*=2.232)、腹部手术史 (*OR*=2.599)、术前白蛋白降低 (*OR*=0.625)、术后白细胞升高 (*OR*=1.091) 及胰腺来源病变 (*OR*=2.945) 为 CR-POPF 的独立危险因素 (均 *P*<0.05)。模型比较结果显示, ANN 模型表现最佳, 其 AUC 为 0.866, 敏感度 0.745, 特异度 0.914, *F1* 值 0.768, 整体预测效能优于其他模型。

结论: PD 术后 CR-POPF 的发生与多种临床因素相关。基于 ANN 构建的预测模型具有较高判别能力, 可用于高危患者的早期识别及个体化干预, 对提高手术安全性和改善预后具有潜在临床价值。

关键词

胰十二指肠切除术; 胰瘘; 机器学习; 危险因素
中图分类号: R657.5

Construction and comparison of multi-algorithm machine learning models for predicting postoperative pancreatic fistula after pancreaticoduodenectomy

WANG Kexuan, JIN Xiaoling

(Hepatobiliary and Pancreatic Center, Zhongda Hospital, Southeast University, Nanjing 210000, China)

Abstract

Background and Aims: Clinically relevant postoperative pancreatic fistula (CR-POPF) remains a major complication after pancreaticoduodenectomy (PD), significantly affecting patient outcomes.

基金项目: 东南大学附属中大医院护理科研课题 (KJZC-HL-202417); 国家临床重点专科建设基金资助项目。

收稿日期: 2026-03-06; **修订日期:** 2026-03-23。

作者简介: 王珂璇, 东南大学附属中大医院护师, 主要从事肝胆胰外科疾病方面的研究。

通信作者: 金晓灵, Email: 13951872686@163.com

Conventional risk models have limitations in capturing complex nonlinear relationships. This study aimed to identify independent risk factors for CR-POPF and to develop and compare multiple machine learning-based prediction models.

Methods: A total of 334 patients who underwent PD at the Hepatobiliary and Pancreatic Center of Zhongda Hospital, Southeast University between January 2016 and December 2025 were retrospectively analyzed. Independent risk factors were identified using univariate and multivariate logistic regression analyses. The dataset was randomly divided into training and validation sets at a 7:3 ratio. Prediction models were developed using Logistic regression (LR), artificial neural network (ANN), decision tree (DT), random forest (RF), and support vector machine (SVM). Model performance was evaluated using AUC, sensitivity, specificity, positive predictive value, negative predictive value, *F1*-score, and accuracy.

Results: Multivariate analysis identified increased BMI (*OR*=1.167), diabetes mellitus (*OR*=3.826), hypertension (*OR*=2.232), history of abdominal surgery (*OR*=2.599), lower preoperative albumin (*OR*=0.625), elevated postoperative white blood cell count (*OR*=1.091), and pancreatic-origin lesions (*OR*=2.945) as independent risk factors for CR-POPF (all *P*<0.05). Among the models, the ANN model demonstrated superior performance, with an AUC of 0.866, sensitivity of 0.745, specificity of 0.914, and *F1*-score of 0.768.

Conclusion: CR-POPF after PD is influenced by multiple clinical factors. The ANN-based model shows strong predictive performance and may serve as a valuable tool for early identification of high-risk patients and implementation of individualized interventions.

Key words

Pancreaticoduodenectomy; Pancreatic Fistula; Machine Learning; Risk Factor

CLC number: R657.5

胰十二指肠切除术 (pancreaticoduodenectomy, PD) 是针对十二指肠恶性肿瘤、胆管癌、胰头癌及壶腹癌的首选治疗方式^[1]。临床相关性术后胰瘘 (clinically relevant postoperative pancreatic fistula, CR-POPF) 是 PD 术后最严重的并发症之一^[2], 发生率约为 3%~45%^[3], 常与术后出血、腹腔感染、多器官功能衰竭及不良预后相关^[4]。故临床上需开发出可用于术前或术中评估患者发生 CR-POPF 的预测模型, 医护人员提前采取干预措施, 使患者受益。

目前针对 PD 术后围手术期并发症及相关风险预测领域, 胰瘘风险评分 (fistula risk score, FRS) 作为经典精简风险评估模型, 已在临床围手术期风险分层中得到一定应用, 为临床快速评估患者手术风险提供了便捷工具^[5]。但此类传统精简模型的模型变量筛选与风险拟合模式较为固定, 难以充分挖掘临床数据中复杂非线性关系与多因素交互作用, 在围手术期遗漏风险的精准预测效能上存在一定局限^[6]。相较于传统统计建模, 机器学习算法 (machine learning, ML) 依托高维临床数据开展自适应学习, 可精准估算事件发生风险、锁定

高风险人群, 在此基础上给予相应的预防措施, 可基于最低成本使干预效果最大化^[7]。近年来, 国内外已有学者构建预测患者 CR-POPF 风险的预测模型, 但各模型质量不一。本研究采用多种算法进行模型构建, 旨在构建出最优模型便于临床工作者使用。

1 资料与方法

1.1 研究对象

采用横断面回顾性研究方法, 选取东南大学附属中大医院肝胆胰中心 2016 年 1 月—2025 年 12 月行 PD 手术的 334 例患者。参照 2016 版国际胰腺外科小组定义的标准^[8], 术后 ≥3 d 后腹腔引流管仍有液体流出, 且其淀粉酶浓度高于血清淀粉酶 3 倍正常值上限即可诊断为 CR-POPF, 分为 A、B、C 级。纳入标准: (1) 于本院行 PD 治疗; (2) CT 影像学、实验室指标、引流液淀粉酶水平等临床资料完整; (3) 年龄 ≥18 岁; (4) 知情同意, 自愿参与本研究。排除标准: (1) 全胰切除; (2) 合并其他脏

器功能不全、急慢性感染性疾病。334例患者中,发生CR-POPF的171例(CR-POPF组),未发生CR-POPF的163例(无CR-POPF组)。本研究获得东南大学附属中大医院伦理委员会审查(批件号:2025ZDSYLL258-P01)。

1.2 资料收集

通过HIS系统回顾性收集患者信息;通过系统文献回顾确定患者发生CR-POPF的可能影响因素,包括患者的一般资料、病情资料、手术相关信息、实验室指标和病理结果。

1.3 统计学处理

应用Excel 2016进行录入。使用SPSS 26.0软件进行缺失值处理和特征变量筛选。数据缺失比例>15%的自变量直接剔除,数据缺失比例<15%的变量应用回归估计法插补数据缺失值。采用分层随机抽样方法按7:3比例划分为训练集与验证集。训练集共234例(病例组120例,对照组114例),验证集共100例(病例组51例,对照组49例)。训练集与验证集中病例组与对照组构成比均衡,具有可比性。训练集数据使用R 4.3.0软件构建五种

ML模型,分别为逻辑回归(Logistic regression, LR)模型、人工神经网络(artificial neural network, ANN)模型、决策树(decision trees, DT)模型、随机森林(random forest, RF)模型、支持向量机(support vector machine, SVM)模型。通过验证集模型的受试者工作特征(receiver operator characteristic, ROC)曲线下面积(area under the curve, AUC)、混淆矩阵中的准确率、敏感度、特异度、阳性预测值、阴性预测值、*FI*值判断模型的性能及效果;双侧检验,检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 PD术后患者发生CR-POPF单因素分析

单因素分析结果显示,患者的年龄、体质量指数(BMI)、是否患有糖尿病、高血压、是否有腹部手术史、术前白蛋白值、术前白细胞值、术后白细胞值、术后血小板值、病变部位、病理类型与PD术后患者发生CR-POPF有关(均 $P<0.05$)(表1)。

表1 患者PD术后CR-POPF的单因素分析

Table 1 Univariate analysis of CR-POPF in patients after PD

因素	β	S.E.	Wald	P	OR	95% CI
性别	0.063	0.220	0.083	0.774	1.065	0.692~1.640
年龄	-0.024	0.011	4.525	0.033	0.977	0.956~0.998
BMI	0.156	0.045	11.831	<0.001	1.168	1.069~1.227
糖尿病	1.285	0.244	27.623	<0.001	3.615	2.238~5.837
高血压	0.798	0.228	12.274	<0.001	2.222	1.422~3.473
腹部手术史	0.880	0.264	11.151	0.001	2.411	1.438~4.401
术前黄疸	-0.015	0.221	0.004	0.947	0.985	0.638~1.521
胆道引流	0.023	0.244	0.009	0.925	1.023	0.634~1.652
术中出血量	0.000	0.000	1.520	0.218	1.000	0.999~1.000
术中输血	-0.232	0.230	1.017	0.313	0.793	0.505~1.245
手术时间	0.000	0.001	0.031	0.861	1.000	0.998~1.002
术前丙氨酸氨基转移酶	0.001	0.001	1.465	0.226	1.001	0.999~1.002
术前直接胆红素	-0.002	0.001	1.429	0.232	0.998	0.995~1.001
术前天门冬氨酸转移酶	0.001	0.001	1.649	0.199	1.001	0.999~1.003
术前总胆红素	-0.002	0.001	1.393	0.238	0.998	0.996~1.001
术前白蛋白	-0.453	0.050	82.257	<0.001	0.636	0.577~0.701
术前白细胞值	0.110	0.052	4.440	0.035	1.116	1.008~1.236
术前中性粒细胞绝对值	0.006	0.011	0.302	0.583	1.006	0.984~1.028

注:因病变部位肝曲及无法确定阳性样本仅1例,病理类型十二指肠源性肿瘤样本仅10例,不满足常规统计分析的适用条件,故未纳入本次定量关联性分析,仅作个案处理

Note: Due to the presence of only one case with a lesion located at the hepatic flexure or with indeterminate positivity, and only ten cases of duodenal-origin tumors in the pathological classification, these categories did not meet the requirements for conventional statistical analysis. Therefore, they were excluded from the quantitative association analysis and were treated descriptively as individual cases

表1 患者PD术后CR-POPF的单因素分析(续)

Table 1 Univariate analysis of CR-POPF in patients after PD (continued)

因素	β	S.E.	Wald	P	OR	95% CI
术前单核细胞绝对值	0.012	0.167	0.005	0.944	1.012	0.730~1.403
术后降钙素原	0.005	0.017	0.084	0.773	1.005	0.973~1.038
术后总胆红素	-0.003	0.002	1.999	0.157	0.997	0.994~1.001
术后直接胆红素	-0.003	0.002	2.301	0.129	0.997	0.993~1.001
术后白细胞值	0.054	0.024	5.247	0.022	1.056	1.008~1.106
术后血小板值	0.003	0.002	4.920	0.027	1.003	1.000~1.007
术后中性粒细胞绝对值	0.021	0.020	1.087	0.297	1.021	0.982~1.061
中性粒细胞/淋巴细胞	0.020	0.011	3.136	0.077	1.020	0.998~1.042
CA19-9	0.001	0.001	0.500	0.479	1.000	1.000~1.000
肿瘤直径	-0.058	0.072	0.646	0.421	0.944	0.820~1.087
病变部位(常数项)	-0.261	0.145	3.220	0.073	0.771	—
胰腺	0.954	0.285	11.217	0.001	2.595	1.485~4.535
十二指肠	0.383	0.321	1.425	0.233	1.467	0.782~2.752
壶腹部	0.484	0.686	0.497	0.481	1.622	0.423~6.227
胆总管	1.647	1.127	2.134	0.144	5.190	0.570~47.301
胆囊	0.261	1.422	0.034	0.855	1.298	0.080~21.050
病理类型(常数项)	0.016	0.125	0.016	0.901	1.016	—
胰腺导管腺癌	-0.064	0.337	0.037	0.848	0.938	0.485~1.813
胰腺囊性/低度恶性肿瘤	0.236	0.519	0.206	0.650	1.266	0.458~3.502
胰腺神经内分泌肿瘤	-0.198	0.618	0.102	0.749	0.820	0.244~2.756
胆管下端腺癌	1.371	0.800	2.933	0.087	3.938	0.820~18.905

注:因病变部位肝曲及无法确定阳性样本仅1例,病理类型十二指肠源性肿瘤样本仅10例,不满足常规统计分析的适用条件,故未纳入本次定量关联性分析,仅作个案处理

Note: Due to the presence of only one case with a lesion located at the hepatic flexure or with indeterminate positivity, and only ten cases of duodenal-origin tumors in the pathological classification, these categories did not meet the requirements for conventional statistical analysis. Therefore, they were excluded from the quantitative association analysis and were treated descriptively as individual cases

2.2 PD术后患者发生CR-POPF多因素分析

将单因素分析有统计学意义的变量作为自变量纳入多因素 Logistic 分析,结果显示,患者PD术后发生CR-POPF的独立影响因素共七个,分别为BMI ($OR=1.167$, $95\% CI=1.017\sim1.338$),患有糖尿病 ($OR=3.826$, $95\% CI=1.884\sim7.768$),患有高血压

($OR=2.232$, $95\% CI=1.110\sim4.489$),有腹部手术史 ($OR=2.599$, $95\% CI=1.193\sim5.664$),术前白蛋白 ($OR=0.625$, $95\% CI=0.560\sim0.699$),术后白细胞值 ($OR=1.091$, $95\% CI=1.018\sim1.170$),病变部位 ($OR=2.945$, $95\% CI=1.285\sim3.534$) (表2)。

表2 患者PD术后CR-POPF多因素分析

Table 2 Multivariate analysis of CR-POPF in patients after PD

影响因素	β	S.E.	Wald	P	OR	95% CI
BMI	0.154	0.070	4.866	0.027	1.167	1.017~1.338
糖尿病	1.342	0.361	13.788	<0.001	3.826	1.884~7.768
高血压	0.803	0.356	5.075	0.024	2.232	1.110~4.489
腹部手术史	0.955	0.397	5.774	0.016	2.599	1.193~5.664
术前白蛋白	-0.469	0.057	68.770	<0.001	0.625	0.560~0.699
术后白细胞	0.087	0.036	6.003	0.014	1.091	1.018~1.170
病变部位	0.853	0.184	9.237	0.001	2.945	1.285~3.534

2.3 患者发生CR-POPF的预测模型构建与验证

基于训练集数据选择五种ML模型进行构建，五种模型的ROC曲线见图1。五种模型的AUC值、

敏感度、特异度、阳性预测值、阴性预测值、*F1*值和准确度汇总于表3，ANN模型的综合评价指标优于其他模型。

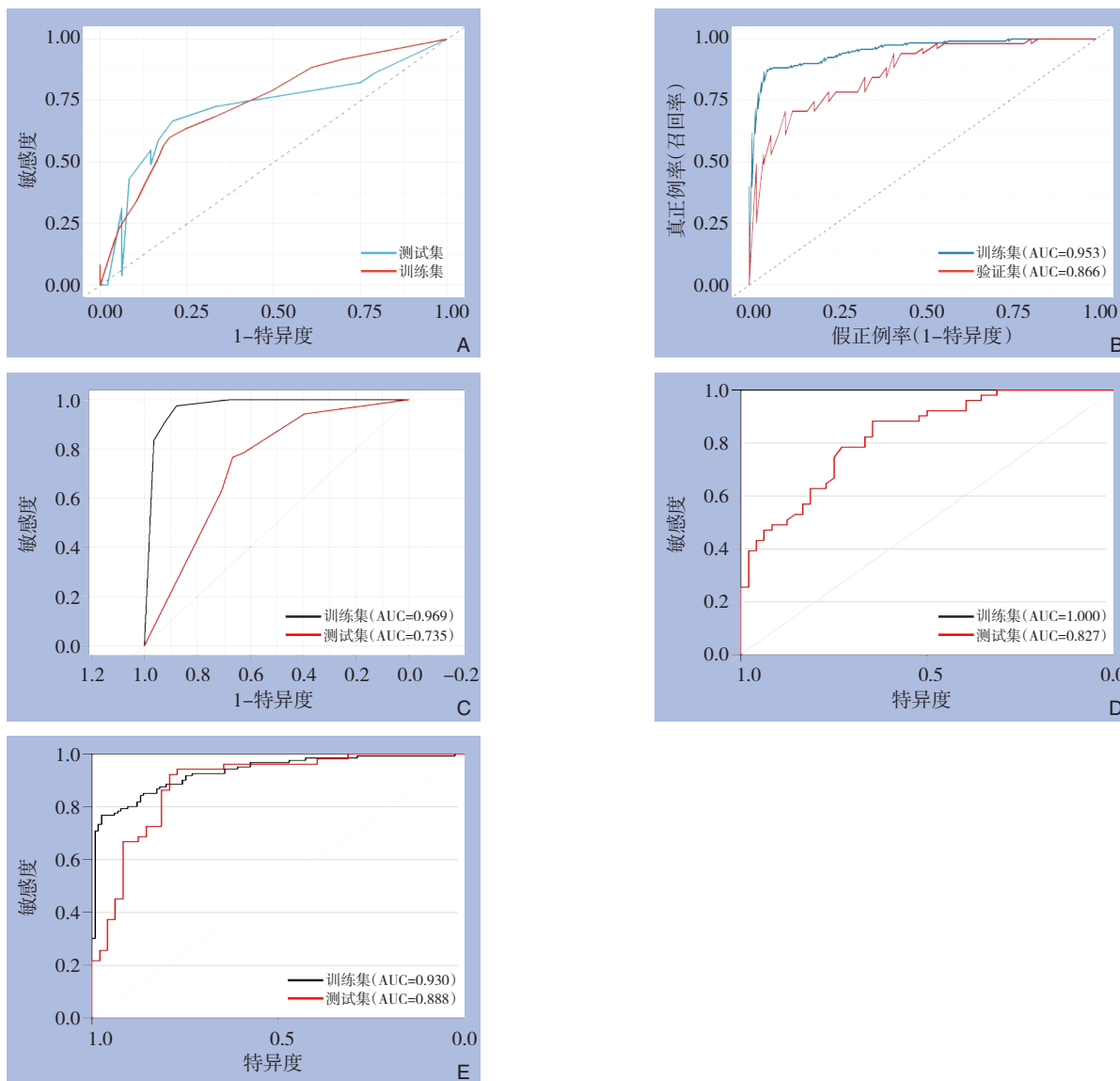


图1 五种模型的ROC曲线 A: LR模型; B: ANN模型; C: DT模型; D: RF模型; E: SVM模型

Figure 1 ROC curves of five models A: LR; B: ANN; C: DT; D: RF; E: SVM

表3 五种预测模型评价指标

Table 3 Performance metrics of five prediction models

模型	AUC	敏感度	特异度	阳性预测值	阴性预测值	<i>F1</i> 值	准确度(95% CI)
LR模型	0.714	0.667	0.792	0.773	0.691	0.716	0.727(0.629-0.812)
ANN模型	0.866	0.745	0.914	0.792	0.745	0.768	0.902(0.858-0.935)
DT模型	0.735	0.784	0.625	0.690	0.732	0.734	0.707(0.607-0.794)
RF模型	0.827	0.784	0.667	0.714	0.744	0.748	0.727(0.629-0.812)
SVM模型	0.888	0.569	0.917	0.879	0.667	0.691	0.737(0.639-0.821)

3 讨论

CR-POPF 常见于 PD 术后,胰液通过非正常途径外漏,腐蚀腹腔内的器官与组织,导致感染出血,延长患者住院时间,增加患者住院期间的治疗费用,严重者可导致患者死亡^[9-10]。因此,识别患者 PD 术后发生 CR-POPF 的危险因素并构建预测模型对患者临床预后具有重要意义。

本研究通过多因素 Logistic 回归分析,明确了 BMI 增高、合并糖尿病、高血压、腹部手术史、术前低白蛋白、术后高白细胞以及胰腺来源病变是 PD 术后发生 CR-POPF 的独立危险因素。这些发现与既有研究相互印证,并为进一步理解 CR-POPF 的病理生理机制及临床预警提供了依据。本研究未纳入既往研究^[11]中提到的胰腺质地、胰管直径等受判读者主观影响较大的影像学资料等影响因素,避免混杂偏倚。

首先,本研究证实了患者营养代谢状态与 CR-POPF 风险密切相关。BMI 升高作为风险因素,与陈国利等^[12]的研究结论一致。其机制可能在于,肥胖患者腹腔内脂肪堆积增加了手术显露与操作的难度,且脂肪组织可能影响胰肠吻合口的愈合质量^[13]。这提示对术前肥胖患者进行体质量管理具有潜在价值,一项大样本研究^[14]也支持术前减重可降低胰瘘风险。同时,本研究发现糖尿病是高风险因素 ($OR=3.826$),这与高血糖环境损害组织修复、抑制免疫功能的病理基础相符^[15]。因此,围手术期严格的血糖控制是减少 CR-POPF 的关键策略^[16]。此外,术前低白蛋白水平 ($OR=0.625$) 也是影响因素之一,这凸显了营养状态的重要性。白蛋白缺乏会阻碍胶原合成与组织修复,并可能加剧组织水肿^[17]。中华医学会肠外肠内营养学分会指南^[18]推荐对术前低白蛋白患者进行营养支持,本研究结果与推荐意见一致。

其次,本研究结果强调了炎症反应在 CR-POPF 发生中的关键作用。术后白细胞计数升高是独立危险因素,这与 Sanchez-Morales 等^[19]的观点一致,即炎症指标升高反映了术后早期的免疫失衡与局部炎症状态。白细胞增多常提示感染或显著炎症反应,后者可延缓创面愈合,并通过水肿压迫影响胰腺残端血供,从而增加胰瘘风险^[20]。这表明,术后密切监测并积极管理炎症反应具有重要意义。

再次,本研究揭示了患者基础疾病与手术史带来的额外风险。高血压被证实为独立危险因素,与专家共识^[21]一致,其机制可能与长期高血压对胰腺微血管的损伤有关,进而影响吻合口愈合^[22]。此外,腹部手术史显著增加风险 ($OR=2.599$),这与多项研究^[3, 23-24]结论相同。既往手术导致的腹腔粘连可能使本次手术解剖困难,并可能影响术后引流效率,从而导致胰液积聚。

最后,关于病变部位,本研究多因素分析表明胰腺来源病变是 CR-POPF 的高风险因素。这很可能是因为胰腺肿瘤切除后,残留的胰腺质地、胰管条件及血供可能较差,直接增加了胰肠吻合的技术难度与失败风险^[25]。程诗博等^[26]构建的预测模型亦将病变部位纳入,并强调了胰腺残端质量的核心作用,本研究结果与此契合,进一步确认了该因素在中国患者群体中的预测价值。

本研究核心在于比较多种 ML 在预测 PD 术后 CR-POPF 风险中的效能,因此未将 FRS 模型纳入直接比较。FRS 适用于快速初筛,而 ML 模型能为高风险或复杂病例提供更精细的评估^[27-28]。当前预测模型众多,但构建思路、指标及效能各异,部分模型的稳定性和实用性有待提高^[7,29]。本研究综合现有研究成果筛选指标,构建并对比了多种模型,最终筛选出最优的 ANN 模型,ANN 模型凭借其强大的非线性拟合与特征学习能力,能通过多层网络自动挖掘数据中的潜在规律与交互模式,更契合 CR-POPF 发生机制复杂的临床特点^[30-31]。同时,ANN 能自适应处理临床数据高维度、分布不均的特性,优化特征权重,从而更准确地揭示指标与风险的内在关联,为本研究提供了更稳定、准确的个体化风险评估工具。

本研究存在若干局限性:首先,作为单中心回顾性研究,可能存在选择偏倚和信息偏倚;其次,因考虑到胰腺质地、胰管直径等影像学指标判读主观性较强,为避免混杂偏倚而未予纳入;最后,模型仅进行了内部验证,缺乏多中心外部数据验证,其泛化能力需进一步证实。未来研究可通过多中心前瞻性设计、完善关键变量收集、并结合模型可解释性分析等途径进一步优化模型,以提升其科学性与临床适用性。

志谢:本文统计方法及模型分析承蒙姜超老师悉心指导与严谨把关,在此致以诚挚谢意。

作者贡献声明:王珂璇负责数据的收集与分析、初稿撰写;金晓灵负责论文的修改与润色。

利益冲突:所有作者均声明不存在利益冲突。

参考文献

- [1] Wang M, Peng B, Liu JH, et al. Practice patterns and perioperative outcomes of laparoscopic pancreaticoduodenectomy in China: a retrospective multicenter analysis of 1029 patients[J]. *Ann Surg*, 2021, 273(1):145–153. doi:10.1097/SLA.0000000000003190.
- [2] 韩序, 王文权, 刘亮. 预防性胆-胰双分流: 胰十二指肠切除术后并发症防控的理念革新与临床转化[J]. *中国普通外科杂志*, 2025, 34(9):1876–1881. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.250479.
Han X, Wang WQ, Liu L. Prophylactic dual biliary-pancreatic diversion: a conceptual and translational innovation in preventing postoperative complications after pancreaticoduodenectomy[J]. *China Journal of General Surgery*, 2025, 34(9): 1876–1881. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.250479.
- [3] Bassi C, Marchegiani G, Dervenis C, et al. The 2016 update of the International Study Group (ISGPS) definition and grading of postoperative pancreatic fistula: 11 Years After[J]. *Surgery*, 2017, 161(3):584–591. doi:10.1016/j.surg.2016.11.014.
- [4] Torres OJM, Moraes-Junior JMA, Fernandes ESM, et al. Surgical management of postoperative grade C pancreatic fistula following pancreatoduodenectomy[J]. *Visc Med*, 2022, 38(4):233–242. doi: 10.1159/000521727.
- [5] Verdeyen N, Gryspeerdt F, Abreu de Carvalho L, et al. A comparison of preoperative predictive scoring systems for postoperative pancreatic fistula after pancreaticoduodenectomy based on a single-center analysis[J]. *J Clin Med*, 2024, 13(11): 3286. doi:10.3390/jcm13113286.
- [6] Limbu Y, Acharya BP, Raut S, et al. Validation of the updated alternate fistula risk score for prediction of postoperative pancreatic fistula after pancreatoduodenectomy[J]. *JGH Open*, 2024, 8(11): e70053. doi:10.1002/jgh3.70053.
- [7] 张丹阳, 雷鹏, 张宇波, 等. 胰十二指肠切除术后临床相关胰瘘风险预测模型构建及验证[J]. *中国普通外科杂志*, 2024, 33(3):366–375. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2024.03.007.
Zhang DY, Lei P, Zhang YB, et al. Construction and validation of a risk prediction model for clinically relevant pancreatic fistula after pancreaticoduodenectomy[J]. *China Journal of General Surgery*, 2024, 33(3):366–375. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2024.03.007.
- [8] Schuh F, Mihaljevic AL, Probst P, et al. A simple classification of pancreatic duct size and texture predicts postoperative pancreatic fistula: a classification of the international study group of pancreatic surgery[J]. *Ann Surg*, 2023, 277(3): e597–e608. doi: 10.1097/SLA.0000000000004855.
- [9] Chui JN, Sahni S, Samra JS, et al. Postoperative pancreatitis and pancreatic fistulae: a review of current evidence[J]. *HPB (Oxford)*, 2023, 25(9):1011–1021. doi:10.1016/j.hpb.2023.05.007.
- [10] 曹雨, 张修平, 刘荣. 机器人胰腺手术国际共识指南(2023版)进展与思考[J]. *中国普通外科杂志*, 2024, 33(9):1406–1413. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.2024.09.007.
Cao Y, Zhang XP, Liu R. Advancements and deliberation on the international consensus guidelines on robotic pancreatic surgery (2023 edition)[J]. *China Journal of General Surgery*, 2024, 33(9): 1406–1413. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2024.09.007.
- [11] 陈泳松, 陈海洋, 刘希. 远端胰腺切除术后胰瘘的影响因素及预测模型的验证[J]. *四川医学*, 2025, 46(2):178–182. doi:10.16252/j.cnki.issn1004-0501-2025.02.012.
Chen YS, Chen HY, Liu X. Influencing factors of pancreatic fistula after distal pancreatectomy and validation of prediction model[J]. *Sichuan Medical Journal*, 2025, 46(2): 178–182. doi: 10.16252/j.cnki.issn1004-0501-2025.02.012.
- [12] 陈国利, 郑志方, 胡文靖, 等. 双针全层肠肠吻合术在腹腔镜胰十二指肠切除手术中的效果及对术后胰瘘发生率、围术期死亡率的影响[J]. *中国临床医生杂志*, 2022, 50(12):1421–1424. doi: 10.3969/j.issn.2095-8552.2022.12.010.
Chen GL, Zheng ZF, Hu WJ, et al. Effect of double-needle full-thickness pancreatic enterotomy in laparoscopic pancreaticoduodenectomy and its effect on the incidence of postoperative pancreatic fistula and perioperative mortality[J]. *Chinese Journal of Clinicians*, 2022, 50(12): 1421–1424. doi: 10.3969/j.issn.2095-8552.2022.12.010.
- [13] Tang T, Tan Y, Xiao B, et al. Influence of body mass index on perioperative outcomes following pancreaticoduodenectomy[J]. *J Laparoendosc Adv Surg Tech*, 2021, 31(9):999–1005. doi:10.1089/lap.2020.0703.
- [14] Sun J, Hwang J, Fredette JD, et al. Preoperative weight loss and postoperative pancreatic fistula risk affected by body mass index: a National Surgical Quality Improvement Program study[J]. *J Gastrointest Surg*, 2025, 29(9): 102157. doi: 10.1016/j.gassur.2025.102157.
- [15] de Kalbermatten S, Martin D, Uldry E, et al. Impact of diabetes mellitus on postoperative complications in patients undergoing pancreatic surgery[J]. *HPB (Oxford)*, 2025, 27(4): 530–537. doi: 10.1016/j.hpb.2024.12.020.
- [16] 任义伟, 胡佳阳, 郭世伟, 等. 胰十二指肠切除术后胰瘘相关危险因素及预测模型的研究进展[J]. *中华胰腺病杂志*, 2023, 23(4): 313–317. doi:10.3760/cma.j.cn115667-20230105-00003.
Ren YW, Hu JY, Guo SW, et al. Research progress on risk factors and prediction models of pancreatic fistula after pancreaticoduodenectomy[J]. *Chinese Journal of Pancreatology*,

- 2023, 23(4): 313–317. doi: [10.3760/cma.j.cn115667-20230105-00003](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn115667-20230105-00003).
- [17] Gaspar-Figueiredo S, Labгаа I, Demartines N, et al. Assessment of the predictive value of preoperative serum albumin and postoperative albumin drop (Δ Alb) for complications after pancreas surgery: a single-center cross-sectional study[J]. *J Clin Med*, 2023, 12(3):972. doi:[10.3390/jcm12030972](https://doi.org/10.3390/jcm12030972).
- [18] 中华医学会肠外肠内营养学分会, 中华医学会外科学分会胰腺外科学组. 胰腺外科围手术期全程化营养管理指南(2025版)[J]. *中华消化外科杂志*, 2025, 24(11):1353–1372. doi:[10.3760/cma.j.cn115610-20251002-00615](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn115610-20251002-00615).
Chinese Society of Parenteral and Enteral Nutrition, Chinese Pancreatic Surgery Association. Guideline for perioperative whole-course nutrition management in pancreatic surgery (2025 edition) [J]. *Chinese Journal of Digestive Surgery*, 2025, 24(11): 1353–1372. doi:[10.3760/cma.j.cn115610-20251002-00615](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn115610-20251002-00615).
- [19] Sánchez-Morales GE, Cisneros-Correa J, Lanzagorta-Ortega D, et al. Neutrophil-to-lymphocyte ratio and platelet-to-lymphocyte ratio on postoperative day three as a biochemical predictor of clinically significant pancreatic fistula in patients undergoing distal pancreatectomy[J]. *Rev Gastroenterol Mex (Engl Ed)*, 2024, 89(1): 42–51. doi:[10.1016/j.rgmexn.2023.03.004](https://doi.org/10.1016/j.rgmexn.2023.03.004).
- [20] Zhang B, Yuan Q, Li S, et al. Risk factors of clinically relevant postoperative pancreatic fistula after pancreaticoduodenectomy: a systematic review and meta-analysis[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2022, 101(26):e29757. doi:[10.1097/MD.00000000000029757](https://doi.org/10.1097/MD.00000000000029757).
- [21] 中华医学会外科学分会胰腺外科学组, 中国研究型医院学会胰腺病专业委员会, 中华外科杂志编辑部. 胰腺术后外科常见并发症诊治及预防的专家共识(2017)[J]. *中华外科杂志*, 2017, 55(5): 328–334. doi:[10.3760/cma.j.issn.0529-5815.2017.05.003](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0529-5815.2017.05.003).
Study Group of Pancreatic Surgery in Chinese Society of Surgery of Chinese Medical Association, Pancreatic Disease Committee of Chinese Research Hospital Association, Editorial Board of Chinese Journal of Surgery. A consensus statement on the diagnosis, treatment, and prevention of common complications after pancreatic surgery (2017)[J]. *Chinese Journal of Surgery*, 2017, 55(5):328–334. doi:[10.3760/cma.j.issn.0529-5815.2017.05.003](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0529-5815.2017.05.003).
- [22] Lin JJ, Conroy PC, Romero-Hernandez F, et al. Hypertension requiring medication use: a silent predictor of poor outcomes after pancreaticoduodenectomy[J]. *J Gastrointest Surg*, 2023, 27(2):328–336. doi:[10.1007/s11605-022-05577-6](https://doi.org/10.1007/s11605-022-05577-6).
- [23] Zheng KL, Yin XY, Gu HY, et al. Impact of previous upper/lower abdominal surgery on pancreatic surgical outcomes and complications: a propensity score matching study[J]. *Langenbecks Arch Surg*, 2022, 407(4): 1517–1524. doi: [10.1007/s00423-022-02494-9](https://doi.org/10.1007/s00423-022-02494-9).
- [24] Pande R, Halle-Smith JM, Phelan L, et al. External validation of postoperative pancreatic fistula prediction scores in pancreaticoduodenectomy: a systematic review and meta-analysis[J]. *HPB (Oxford)*, 2022, 24(3): 287–298. doi: [10.1016/j.hpb.2021.10.006](https://doi.org/10.1016/j.hpb.2021.10.006).
- [25] Xu H, Meng QC, Hua J, et al. Identifying the risk factors for pancreatic fistula after laparoscopic pancreaticoduodenectomy in patients with pancreatic cancer[J]. *World J Gastrointest Surg*, 2024, 16(6):1609–1617. doi:[10.4240/wjgs.v16.i6.1609](https://doi.org/10.4240/wjgs.v16.i6.1609).
- [26] 程诗博, 赵传兵, 吴迺, 等. 基于集成机器学习构建胰十二指肠术后胰瘘风险预测模型及其验证[J]. *中华外科杂志*, 2024, 62(10): 929–937. doi:[10.3760/cma.j.cn112139-20240411-00180](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn112139-20240411-00180).
Cheng SB, Zhao CB, Wu Q, et al. Construction and verification of pancreatic fistula risk prediction model after pancreaticoduodenectomy based on ensemble machine learning[J]. *Chinese Journal of Surgery*, 2024, 62(10): 929–937. doi: [10.3760/cma.j.cn112139-20240411-00180](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn112139-20240411-00180).
- [27] Bedford JP, Redfern OC, O'Brien B, et al. Perioperative risk scores: prediction, pitfalls, and progress[J]. *Curr Opin Anaesthesiol*, 2025, 38(1):30–36. doi:[10.1097/aco.0000000000001445](https://doi.org/10.1097/aco.0000000000001445).
- [28] Kolbinger FR, Bhasker N, Schön F, et al. AutoFRS: an externally validated, annotation-free approach to computational preoperative complication risk stratification in pancreatic surgery - an experimental study[J]. *Int J Surg*, 2025, 111(5): 3212–3223. doi: [10.1097/JS9.0000000000002327](https://doi.org/10.1097/JS9.0000000000002327).
- [29] Mungroop TH, Klompmaker S, Wellner UF, et al. Updated Alternative Fistula Risk Score (ua-FRS) to Include Minimally Invasive Pancreatoduodenectomy: Pan-European Validation[J]. *Ann Surg*, 2021, 273(2): 334–340. doi: [10.1097/SLA.0000000000003234](https://doi.org/10.1097/SLA.0000000000003234).
- [30] Han IW, Cho K, Ryu Y, et al. Risk prediction platform for pancreatic fistula after pancreaticoduodenectomy using artificial intelligence[J]. *World J Gastroenterol*, 2020, 26(30): 4453–4464. doi:[10.3748/wjg.v26.i30.4453](https://doi.org/10.3748/wjg.v26.i30.4453).
- [31] Bonsdorff A, Sallinen V. Prediction of postoperative pancreatic fistula and pancreatitis after pancreaticoduodenectomy or distal pancreatectomy: a review[J]. *Scand J Surg*, 2023, 112(2):126–134. doi:[10.1177/14574969231167781](https://doi.org/10.1177/14574969231167781).

(本文编辑 熊杨)

本文引用格式:王珂璇,金晓灵.多算法机器学习模型在胰十二指肠切除术后胰瘘风险预测中的构建与比较[J].中国普通外科杂志, 2026, 35(3):480–487. doi:[10.7659/j.issn.1005-6947.260122](https://doi.org/10.7659/j.issn.1005-6947.260122)

Cite this article as: Wang KX, Jin XL. Construction and comparison of multi-algorithm machine learning models for predicting postoperative pancreatic fistula after pancreaticoduodenectomy[J]. *Chin J Gen Surg*, 2026, 35(3): 480–487. doi: [10.7659/j.issn.1005-6947.260122](https://doi.org/10.7659/j.issn.1005-6947.260122)