

# 胰十二指肠切除术患者住院期间急性肾损伤 相关临床特征分析及风险识别： 基于MIMIC-IV数据库的回顾性研究

李杰, 罗放\*

重庆医科大学附属第一医院肝胆外科, 重庆

收稿日期: 2026年5月27日; 录用日期: 2026年6月21日; 发布日期: 2026年6月30日

## 摘要

**目的:** 基于公共重症医学数据库MIMIC-IV 2.2, 分析接受胰十二指肠切除术(pancreaticoduodenectomy, PD)患者住院期间急性肾损伤(acute kidney injury, AKI)记录状态的相关临床特征, 并基于logistic回归结果进行探索性风险识别可视化展示。**方法:** 纳入MIMIC-IV 2.2中接受PD的成年ICU患者, PD基于ICD-9/ICD-10-PCS手术编码识别, AKI基于住院期间记录的ICD-9/ICD-10诊断编码定义。提取人口学特征、合并症、严重程度评分、实验室指标及治疗相关变量。采用单因素logistic回归筛选与住院期间AKI记录状态相关的候选变量, 随后采用多因素logistic回归分析独立相关因素。在多因素logistic回归基础上, 探索性绘制列线图, 并采用ROC曲线及AUROC描述当前样本中AKI与非AKI记录状态的表观区分能力。鉴于本研究为回顾性数据库分析, 且部分变量可能与AKI在住院过程中同期发生, 列线图和AUROC仅用于探索性可视化和状态识别描述, 不作为经验证的前瞻性预测模型或临床风险分层工具解释。**结果:** 共纳入PD患者154例, 其中住院期间记录AKI 29例(18.8%)。单因素分析提示年龄、凝血功能指标(INR, PTT)、血钠、SOFA评分、SAPS II评分及脓毒症等与住院期间AKI记录状态存在关联。多因素logistic回归显示, 血管活性药物使用(OR = 3.14, 95% CI: 1.25~7.88, P = 0.015)与脓毒症(OR = 3.27, 95% CI: 1.14~9.36, P = 0.027)为住院期间AKI记录状态的独立相关因素。探索性ROC曲线分析显示, 该logistic回归模型在当前样本中的表观AUROC为0.8116。**结论:** 在MIMIC-IV数据库接受PD的ICU患者中, 脓毒症和血管活性药物使用与住院期间AKI记录状态独立相关, 提示感染负荷、循环不稳定和重症治疗支持需求可能是该人群AKI相关临床表型的重要组成部分。探索性列线图和ROC曲线可直观展示相关变量组合对AKI记录状态的表观区分趋势; 但由于本研究为回顾性数据库分析, AKI依据诊断编码定义, 且未进行内部验证、校准度评价及外部验证, 相关图形不能作为成熟前瞻性预测模型或临床决策工具使用。

## 关键词

胰十二指肠切除术, 急性肾损伤, 相关因素, 探索性风险识别, MIMIC-IV

\*通讯作者。

# Clinical Characteristics and Exploratory Risk Identification for In-Hospital Acute Kidney Injury in Patients Undergoing Pancreaticoduodenectomy: A Retrospective Study Based on the MIMIC-IV Database

Jie Li, Fang Luo\*

Department of Hepatobiliary Surgery, The First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: May 27, 2026; accepted: June 21, 2026; published: June 30, 2026

## Abstract

**Objective:** Based on the public critical care database MIMIC-IV version 2.2, this study aimed to analyze clinical characteristics associated with recorded in-hospital acute kidney injury (AKI) among ICU patients undergoing pancreaticoduodenectomy (PD) and to provide an exploratory visualization of AKI status identification based on logistic regression results. **Methods:** Adult ICU patients who underwent PD in MIMIC-IV 2.2 were included. PD was identified using ICD-9/ICD-10-PCS procedure codes, and AKI was defined according to ICD-9/ICD-10 diagnosis codes recorded during hospitalization. Demographic characteristics, comorbidities, severity scores, laboratory indicators, and treatment-related variables were extracted. Univariate logistic regression was used to screen candidate variables associated with recorded in-hospital AKI, followed by multivariable logistic regression to identify independent associated factors. Based on the multivariable logistic regression model, a nomogram was constructed exploratorily, and a receiver operating characteristic curve analysis with the area under the curve was used to describe the apparent discrimination between recorded AKI and non-AKI status in the current sample. Given the retrospective database-based design and the possibility that some variables occurred concurrently with AKI during hospitalization, the nomogram and AUROC were used only for exploratory visualization and status-identification description rather than as a validated prospective prediction model or clinical risk-stratification tool. **Results:** A total of 154 patients undergoing PD were included, of whom 29 patients had AKI recorded during hospitalization, with an incidence of 18.8%. Univariate analysis suggested that age, coagulation indicators including international normalized ratio (INR) and partial thromboplastin time (PTT), serum sodium, SOFA score, SAPS II score, and sepsis were associated with recorded in-hospital AKI. Multivariable logistic regression showed that vasopressor use (OR = 3.14, 95% CI: 1.25~7.88, P = 0.015) and sepsis (OR = 3.27, 95% CI: 1.14~9.36, P = 0.027) were independently associated with recorded in-hospital AKI. Exploratory ROC analysis showed an apparent AUROC of 0.8116 in the current sample. **Conclusion:** Among ICU patients undergoing PD in the MIMIC-IV database, sepsis and vasopressor use were independently associated with recorded in-hospital AKI, suggesting that infection burden, circulatory instability, and the need for critical care support may be important components of AKI-related clinical phenotypes in this population. The exploratory nomogram and ROC curve visually demonstrated the apparent discrimination of the combined variables for recorded AKI status; however, because of the retrospective database-based design, diagnosis-code-based outcome definition, and lack of internal validation, calibration assessment, and external validation, these graphics should not be interpreted as a mature prospective prediction model or clinical decision-support tool.

## Keywords

### Pancreaticoduodenectomy, Acute Kidney Injury, Associated Factors, Exploratory Risk Identification, MIMIC-IV

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. 前言

胰十二指肠切除术(pancreaticoduodenectomy, PD)是治疗胰头癌、壶腹周围肿瘤、远端胆管癌、十二指肠肿瘤及部分良性复杂病变的重要手术方式,也是普通外科中创伤较大、技术要求较高的复杂腹部手术之一[1][2]。随着高容量中心围手术期管理、麻醉技术和外科技术的进步,PD的围手术期死亡率已明显下降,但术后并发症仍较常见,其中胰瘘、出血、胆瘘、胃排空延迟、感染、营养不良及多器官功能波动等问题仍会影响患者术后恢复[3]。对于术后进入ICU或本身病情较重的患者而言,手术应激、感染负荷、循环不稳定、容量状态变化以及治疗暴露往往叠加存在,使其更容易出现住院期间器官功能异常。

急性肾损伤(acute kidney injury, AKI)是PD患者住院期间需要重点关注的器官功能异常之一。既往PD队列研究显示,PD后AKI与术前肾功能储备、胆红素水平、术中失血、低血压、液体管理及术后并发症等因素有关,并与严重并发症、ICU入住、短期死亡或不良预后相关[4]-[7]。从更广泛的腹部外科和非心脏手术人群来看,术后AKI亦被认为是影响住院时间、肾脏替代治疗需求、医疗资源消耗和远期生存的重要并发症[8][9]。因此,在PD患者中识别AKI相关高危临床表型,对于加强围手术期肾功能监测、优化血流动力学管理和减少潜在肾毒性暴露具有现实意义。

AKI的发生机制具有多因素和多环节特点。KDIGO指南强调AKI应从血清肌酐和尿量变化进行动态识别,但在真实世界数据库研究中,AKI也常通过诊断编码进行识别,二者反映的临床信息并不完全相同[10]。PD患者住院期间AKI可能与围术期容量不足或容量超负荷、低血压或组织灌注不足、脓毒症相关炎症反应、内皮与微循环障碍、免疫代谢重塑、凝血功能异常、电解质及酸碱失衡、基础肾功能储备不足以及血管活性药物、肾毒性药物或造影剂等治疗暴露有关[8]-[13]。其中,脓毒症相关AKI并非单纯由全身低灌注解释,而是涉及炎症介质释放、内皮损伤、肾脏微循环异质性、线粒体和代谢重编程等复杂过程[11][12]。

既往关于PD后AKI的研究多聚焦于术前肾功能、术中失血、液体管理、感染并发症或某一特定围术期暴露,针对重症医学数据库中PD患者住院期间AKI相关因素的系统分析仍相对有限[4]-[7]。实际临床中,PD患者住院期间AKI往往并非由单一因素决定,而是与年龄、合并症、疾病严重程度、炎症反应、凝血与代谢状态以及治疗支持需求等多方面信息相关。因此,整合常规临床变量并总结AKI相关临床特征,有助于从真实世界数据中识别该人群住院期间AKI相关表型,为临床监测和后续研究提供依据。

基于上述背景,本研究基于公开重症医学电子健康记录数据,围绕接受PD的ICU患者住院期间记录的AKI状态开展相关临床特征分析,并进一步基于多因素logistic回归结果进行探索性风险识别可视化展示。鉴于常规医疗数据库中部分变量时间顺序难以完全确认,且本研究AKI主要依据住院期间诊断编码识别,本文不将列线图 and ROC曲线定位为经验证的前瞻性预测工具,而是强调其用于展示住院期间

AKI 记录状态相关临床表型和表观区分趋势, 为后续明确时间窗、结局定义和围术期动态指标的研究提供依据。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 纳入与排除

本研究为基于公共重症医学数据库 MIMIC-IV 2.2 的回顾性观察性研究。MIMIC-IV 由 Beth Israel Deaconess Medical Center 与 MIT Laboratory for Computational Physiology 等机构建设并通过 PhysioNet 平台发布, 数据经去标识化处理, 包含 2008~2019 年间重症监护患者的住院、ICU、实验室、处置、用药、诊断和操作等多维电子健康记录信息[14]。研究者完成相应数据库使用培训并获得访问权限后进行数据提取。由于本研究使用公开去标识化数据库资料, 不涉及可识别个人信息, 通常不需要额外获取个体知情同意。

本研究纳入数据库中接受 PD 的成年患者。纳入标准为: 1) 年龄  $\geq 18$  岁; 2) 手术记录中存在明确的 PD 相关手术编码; 3) 具备住院期间 AKI 诊断判定及主要临床变量所需的资料。排除标准为: 1) 住院时间不足 24 小时; 2) 关键变量缺失率超过 20% 的患者; 3) 同一患者存在多次符合条件住院记录时, 仅纳入第一次符合条件的住院信息。PD 患者按 ICD-9/ICD-10-PCS 手术编码识别, 提取语句包括: `icd_code = '5251'` 或 `icd_code = '5253'` 或 `icd_code = '526'` 或 `icd_code = '527'` 或 `icd_code = '0FTG0ZZ'` 或 `icd_code = '0FTG4ZZ'`。本研究结局为住院期间 ICD-9/ICD-10 诊断编码记录的 AKI; 因此, 本文所称 AKI 反映住院期诊断记录状态, 而非严格基于肌酐和尿量动态变化判定的术后新发 AKI。

### 2.2. 数据提取

提取资料包括人口学特征(年龄、性别、体重等)、围术期或 ICU 严重程度评分(SOFA、SAPS II)、感染相关变量(脓毒症)、凝血功能指标(INR, PT, PTT)、电解质及酸碱指标(钠、钾、氯、钙、镁、酸碱度值、碳酸氢盐、阴离子间隙等)、肾功能及代谢指标(肌酐、尿素氮、乳酸等)、血常规指标(白细胞、血红蛋白、血小板等)以及治疗相关变量(如血管活性药物使用)。治疗相关变量在本文中主要作为住院期间病情严重程度、循环不稳定或治疗暴露的临床替代指标进行解释, 不作直接因果推断。本研究排除缺失率  $> 20\%$  的变量; 其余缺失数据采用多重插补方法处理, 以降低缺失数据造成的偏倚。

### 2.3. 统计方法

分类资料以例数和百分比表示, 组间比较采用卡方检验或 Fisher 精确检验。正态分布的计量资料采用均数  $\pm$  标准差表示, 组间比较采用两独立样本  $t$  检验; 偏态分布的计量资料采用中位数(四分位数间距)表示, 组间比较采用 Mann-Whitney U 检验。

首先进行单因素 logistic 回归分析, 筛选与住院期间 AKI 记录状态相关的候选变量; 随后将具有统计学意义或临床意义明确的变量纳入多因素 logistic 回归模型, 识别住院期间 AKI 记录状态的独立相关因素。logistic 回归结果以 OR 值及其 95% CI 表示。在多因素 logistic 回归分析基础上, 本研究进一步进行探索性风险识别可视化分析。基于最终多因素 logistic 回归模型绘制列线图, 以直观展示各相关因素在住院期间 AKI 记录状态识别中的相对贡献; 同时采用 ROC 曲线及 AUROC 描述该模型在当前样本中区分 AKI 与非 AKI 记录状态的表观能力。需要强调的是, 由于本研究为回顾性数据库分析, 且部分变量可能与 AKI 在住院过程中同期发生, 列线图和 ROC 曲线仅用于探索性展示和表观区分能力描述, 不作为经验证的前瞻性临床预测模型进行解释。因此, 本研究未将 AUROC 作为模型外推性能证据, 也未进行临床应用层面的风险分层评价。

所有统计学分析均使用 R 软件(版本 4.5.1)完成[15]。双侧  $P < 0.05$  认为差异具有统计学意义。

### 3. 结果

#### 3.1. 纳入患者基线特征

本研究最终纳入 PD 患者 154 例, 其中住院期间记录 AKI 29 例, 非 AKI 125 例, AKI 记录比例为 18.8% (29/154)。总体队列中, 患者年龄中位数为 67.47 岁(IQR: 57.29~76.16 岁), 体重中位数为 79.50 kg (IQR: 66.85~89.57 kg)。与非 AKI 组相比, AKI 组年龄略高(69.46 (65.47~80.06)岁 vs. 64.90 (56.31~75.79) 岁,  $P = 0.147$ ), 男性比例更高(72.4% vs. 51.2%,  $P = 0.063$ ), 但差异未达到统计学显著; 两组体重差异亦无统计学意义(81.80 (75.20~89.50) kg vs. 77.70 (64.00~89.60) kg,  $P = 0.212$ ) (表 1)。与非 AKI 组相比, AKI 组白细胞计数(WBC)更高(14.70 (12.20~19.80) vs. 12.30 (9.50~16.80),  $P = 0.022$ ); 肌酐更高(1.40 (0.90~1.70) vs. 0.90 (0.70~1.20),  $P < 0.001$ ), 尿素氮(BUN)更高(21.00 (14.00~33.00) vs. 16.00 (11.00~22.00),  $P = 0.002$ )。凝血指标方面, AKI 组 PTT 更高(33.90 (30.20~39.90) vs. 30.10 (27.60~36.10),  $P = 0.007$ )。电解质及酸碱状态方面, AKI 组血钠更低(137.00 (135.00~140.00) vs. 140.00 (136.00~141.00),  $P = 0.023$ ), 血镁更高(1.90 (1.70~2.00) vs. 1.60 (1.40~1.90),  $P = 0.003$ ), 酸碱度值更低(7.33 (7.25~7.37) vs. 7.38 (7.32~7.41),  $P = 0.002$ ), 碳酸氢盐更低( $20.66 \pm 3.34$  vs.  $22.80 \pm 4.15$ ,  $P = 0.011$ )。此外, AKI 组脓毒症比例更高(34.5% vs. 11.2%,  $P = 0.005$ ), 血管活性药物使用比例更高(51.7% vs. 20.8%,  $P = 0.002$ ) (表 1)。

**Table 1.** Baseline characteristics of patients undergoing pancreaticoduodenectomy

**表 1.** 胰十二指肠切除术患者基线特征表

因素	总体(n = 154)	非 AKI (n = 125)	AKI (n = 29)	P 值
年龄(岁)	67.47 (57.29, 76.16)	64.90 (56.31, 75.79)	69.46 (65.47, 80.06)	0.147
性别(男性), n (%)	85 (55.2)	64 (51.2)	21 (72.4)	0.063
体重(kg)	79.50 (66.85, 89.57)	77.70 (64.00, 89.60)	81.80 (75.20, 89.50)	0.212
心率(次/min)	93.00 (81.25, 108.75)	93.00 (79.00, 109.00)	95.00 (88.00, 106.00)	0.262
血红蛋白(g/dL)	10.55 (9.40, 11.80)	10.60 (9.30, 11.80)	9.90 (9.40, 11.40)	0.250
红细胞计数(RBC, $10^{12}/L$ )	3.49 (3.02, 3.98)	3.50 (3.02, 4.02)	3.46 (3.01, 3.70)	0.223
白细胞计数(WBC, $10^9/L$ )	12.95 (9.70, 17.08)	12.30 (9.50, 16.80)	14.70 (12.20, 19.80)	<b>0.022</b>
血小板计数( $10^9/L$ )	231.50 (160.75, 300.25)	227.00 (164.00, 294.00)	239.00 (160.00, 373.00)	0.462
肌酐(mg/dL)	0.90 (0.70, 1.30)	0.90 (0.70, 1.20)	1.40 (0.90, 1.70)	<b>&lt;0.001</b>
尿素氮(BUN, mg/dL)	16.00 (12.00, 24.00)	16.00 (11.00, 22.00)	21.00 (14.00, 33.00)	<b>0.002</b>
丙氨酸氨基转移酶(ALT, U/L)	103.00 (39.00, 236.75)	105.00 (43.00, 242.00)	54.00 (26.00, 213.00)	0.311
天门冬氨酸氨基转移酶(AST, U/L)	109.50 (58.00, 228.00)	125.00 (76.00, 228.00)	58.00 (31.00, 311.00)	<b>0.042</b>
国际标准化比值(INR)	1.25 (1.20, 1.40)	1.30 (1.20, 1.40)	1.20 (1.20, 1.50)	0.889
凝血酶原时间(PT, s)	14.00 (13.30, 15.10)	14.00 (13.30, 15.00)	14.10 (13.50, 15.70)	0.250
活化部分凝血活酶时间(APTT, s)	31.00 (27.90, 37.38)	30.10 (27.60, 36.10)	33.90 (30.20, 39.90)	<b>0.007</b>
血钠(mmol/L)	139.00 (136.00, 141.00)	140.00 (136.00, 141.00)	137.00 (135.00, 140.00)	<b>0.023</b>
血氯(mmol/L)	107.00 (103.25, 109.00)	107.00 (104.00, 109.00)	106.00 (101.00, 109.00)	0.450
血钙(mg/dL)	8.10 (7.70, 8.50)	8.10 (7.70, 8.50)	8.10 (7.70, 8.50)	0.869

续表

血镁(mg/dL)	1.60 (1.42, 2.00)	1.60 (1.40, 1.90)	1.90 (1.70, 2.00)	<b>0.003</b>
血糖(mg/dL)	150.00 (124.00, 183.00)	148.00 (121.00, 179.00)	152.00 (130.00, 186.00)	0.525
pH	7.37 (7.31, 7.40)	7.38 (7.32, 7.41)	7.33 (7.25, 7.37)	<b>0.002</b>
阴离子间隙(mmol/L)	14.00 (12.00, 17.00)	14.00 (12.00, 17.00)	15.00 (14.00, 21.00)	0.057
碳酸氢根(mmol/L)	22.40 (4.09)	22.80 (4.15)	20.66 (3.34)	<b>0.011</b>
乳酸(mmol/L)	1.80 (1.30, 3.38)	1.80 (1.20, 3.30)	1.60 (1.40, 3.40)	0.757
糖尿病, n (%)	42 (27.3)	31 (24.8)	11 (37.9)	0.230
高血压, n (%)	82 (53.2)	65 (52.0)	17 (58.6)	0.662
肾脏疾病, n (%)	25 (16.2)	18 (14.4)	7 (24.1)	0.316
肝病, n (%)	24 (15.6)	18 (14.4)	6 (20.7)	0.577
SOFA 评分(分)	4.00 (2.00, 6.00)	3.00 (2.00, 6.00)	5.00 (3.00, 7.00)	<b>0.010</b>
SAPS II 评分(分)	36.72 (11.91)	35.99 (11.24)	39.86 (14.24)	0.115
血管活性药物使用, n (%)	41 (26.6)	26 (20.8)	15 (51.7)	<b>0.002</b>
CRRT 治疗, n (%)	6 (3.9)	2 (1.6)	4 (13.8)	<b>0.012</b>
28 天死亡, n (%)	9 (5.8)	5 (4.0)	4 (13.8)	0.113
90 天死亡, n (%)	16 (10.4)	9 (7.2)	7 (24.1)	<b>0.018</b>
365 天死亡, n (%)	40 (26.0)	28 (22.4)	12 (41.4)	0.062
脓毒症, n (%)	24 (15.6)	14 (11.2)	10 (34.5)	<b>0.005</b>

注: 分类变量以 n (%)表示; 连续变量按分布特征以均数 ± 标准差或中位数(四分位数间距)表示。AKI 为住院期间 ICD-9/ICD-10 诊断编码记录的急性肾损伤。

### 3.2. 单因素 Logistic 回归分析

单因素 logistic 回归结果显示, 多项因素与住院期间 AKI 记录存在关联: 年龄(OR = 1.19, 95% CI: 1.04~1.37, P = 0.012)、INR (P = 0.046)、PTT (OR = 1.10, 95% CI: 1.02~1.18, P = 0.014)、血钠(OR = 0.52, 95% CI: 0.29~0.93, P = 0.028)、SOFA 评分(OR = 1.77, 95% CI: 1.05~2.98, P = 0.031)、SAPS II 评分(OR = 0.81, 95% CI: 0.67~0.97, P = 0.026)以及脓毒症(OR = 78.03, 95% CI: 2.55~2392.28, P = 0.013)等(表 2)。其中, 脓毒症的置信区间较宽, 提示该变量在本样本中可能存在稀疏数据或估计不稳定, 结果解释需保持谨慎。

**Table 2.** Univariate logistic regression analysis

**表 2.** 单因素 logistic 回归分析

变量	OR	95%置信区间	P 值
体重(kg)	1.03	0.96~1.10	0.467
年龄(岁)	1.19	1.04~1.37	<b>0.012*</b>
血红蛋白(g/dL)	1.34	0.68~2.65	0.396
白细胞计数(WBC, 10 <sup>9</sup> /L)	0.96	0.81~1.14	0.665
血小板计数(10 <sup>9</sup> /L)	1.00	0.99~1.01	0.729
肌酐(mg/dL)	2.08	0.36~11.86	0.409
尿素氮(BUN, mg/dL)	0.95	0.81~1.10	0.490
丙氨酸氨基转移酶(ALT, U/L)	0.99	0.99~1.00	0.108

续表

天门冬氨酸氨基转移酶(AST, U/L)	1.00	1.00~1.01	0.144
国际标准化比值(INR)	0.00	0.00~8.68	<b>0.046*</b>
凝血酶原时间(PT, s)	2.91	0.82~10.33	0.099
活化部分凝血活酶时间(APTT, s)	1.10	1.02~1.18	<b>0.014*</b>
血钾(mmol/L)	2.68	0.22~32.76	0.477
血钠(mmol/L)	0.52	0.29~0.93	<b>0.028*</b>
血氯(mmol/L)	1.23	0.78~1.95	0.369
血钙(mg/dL)	0.72	0.05~10.53	0.808
血镁(mg/dL)	3.03	0.07~134.88	0.567
血糖(mg/dL)	0.98	0.95~1.02	0.202
pH	0.00	0.00~59.92	0.131
阴离子间隙(mmol/L)	1.20	0.82~1.75	0.340
碳酸氢根(mmol/L)	0.87	0.52~1.44	0.583
乳酸(mmol/L)	0.54	0.19~1.50	0.236*
SOFA 评分(分)	1.77	1.05~2.98	<b>0.031*</b>
SAPS II 评分(分)	0.81	0.67~0.97	<b>0.026*</b>
脓毒症, n (%)	78.03	2.55~2392.28	<b>0.013*</b>

注: OR 为单因素 logistic 回归所得比值比; 连续变量的 OR 按表中所示单位增加计算, 分类变量以无该状态/未使用相关治疗为参照。\*表示  $P < 0.05$ 。

### 3.3. 多因素 Logistic 回归分析

将候选变量进一步纳入多因素 logistic 回归分析后, 结果显示: 血管活性药物使用( $OR = 3.14, 95\% CI: 1.25 \sim 7.88, P = 0.015$ )与脓毒症( $OR = 3.27, 95\% CI: 1.14 \sim 9.36, P = 0.027$ )为住院期间 AKI 记录的独立相关因素; 年龄、INR、PTT 及血钠在多因素模型中未达到统计学显著(均  $P > 0.05$ ) (表 3)。

Table 3. Multivariate logistic regression analysis

表 3. 多因素 logistic 回归分析

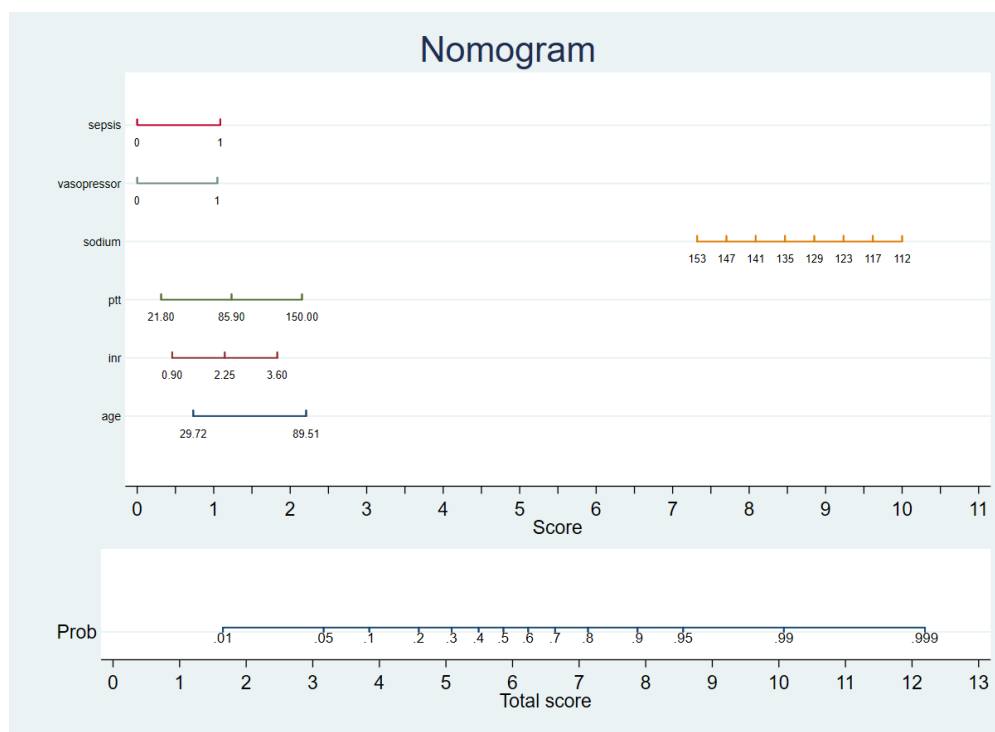
变量	OR	95%置信区间	P 值
年龄(岁)	1.03	0.99~1.07	0.171
国际标准化比值(INR)	1.74	0.63~4.79	0.282
活化部分凝血活酶时间(APTT, s)	1.02	0.99~1.03	0.084
血钠(mmol/L)	0.93	0.85~1.02	0.113
血管活性药物使用, n (%)	3.14	1.25~7.88	<b>0.015*</b>
脓毒症, n (%)	3.27	1.14~9.36	<b>0.027*</b>
常数项(截距)	91.20	0.00~1.73e+07	0.467

注: OR 为多因素 logistic 回归所得调整后比值比; 连续变量的 OR 按表中所示单位增加计算, 分类变量以无该状态/未使用相关治疗为参照。\*表示  $P < 0.05$ 。

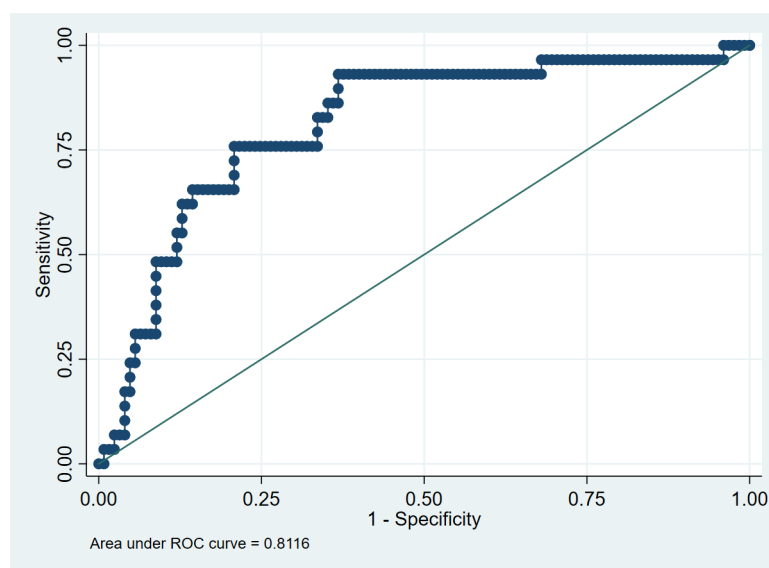
### 3.4. 探索性列线图 and ROC 曲线分析

基于多因素 logistic 回归结果, 本研究进一步绘制探索性列线图, 用于可视化展示年龄、INR、APTT、

血钠、脓毒症及血管活性药物使用等变量与住院期间 AKI 记录状态之间的综合关联(图 1)。ROC 曲线分析显示, 该 logistic 回归模型在当前样本中区分 AKI 与非 AKI 记录状态的表现 AUROC 为 0.8116, 提示其具有一定表观区分能力。由于本研究未进行 Bootstrap 内部验证、校准曲线分析及外部验证, 该结果仅反映当前样本中的状态识别表现, 不应解释为稳定的临床预测性能(图 2)。



**Figure 1.** Exploratory nomogram of in-hospital AKI status using multivariate logistic regression  
**图 1.** 基于多因素 logistic 回归的住院期间 AKI 记录状态探索性列线图



**Figure 2.** ROC curve for differentiating in-hospital AKI status via multivariate logistic regression model  
**图 2.** 多因素 logistic 回归模型区分住院期间 AKI 记录状态的 ROC 曲线

## 4. 讨论

本研究基于 MIMIC-IV 数据库中接受 PD 的 ICU 患者, 围绕住院期间诊断编码记录的 AKI 状态开展相关临床特征分析, 并基于多因素 logistic 回归结果进行了探索性可视化展示。结果显示, 住院期间 AKI 记录比例为 18.8%, 提示 AKI 是 PD 患者住院期间需要关注的器官功能异常。既往胰腺外科研究显示, PD 术后并发症负担较高, 胃肠外科及腹部手术人群中的 AKI 也与术后不良结局和医疗资源消耗有关[16]-[18]。需要强调的是, 本研究结果主要反映住院期间 AKI 诊断记录与临床变量之间的关联; 列线图和 ROC 曲线仅用于展示当前样本中的状态识别趋势, 而非严格意义上的术前或术后早期前瞻性预测。

多因素分析显示, 脓毒症与住院期间 AKI 记录独立相关。该结果与脓毒症相关肾损伤的病理生理认识一致: 感染相关全身炎症反应、微循环障碍、内皮功能紊乱、免疫代谢重塑以及肾脏灌注异常均可能参与 AKI 的发生和维持[19][20]。PD 患者术后若合并腹腔感染、胆道感染、肺部感染或全身炎症反应, 肾脏可能同时受到炎症介质、内皮损伤、血流动力学波动和代谢紊乱的影响。本研究中 AKI 组白细胞计数更高、酸碱状态异常更明显, 也提示感染和全身炎症负荷可能是 AKI 相关临床表型的重要组成部分。但由于本研究为回顾性数据库分析, 且 AKI 依据诊断编码识别, 行政诊断编码本身可能存在敏感性不足、漏诊和误分类等问题, 因而无法准确确认脓毒症与 AKI 的先后顺序, 结果应解释为相关关系, 而不能直接推断脓毒症对 AKI 的因果效应[21]-[23]。

血管活性药物使用同样与住院期间 AKI 记录独立相关。血管活性药物使用通常反映患者存在循环不稳定、低灌注风险或更高的疾病严重程度。在 PD 患者中, 感染、出血、容量状态变化、围术期应激和器官灌注不足可能共同增加 AKI 风险。因此, 血管活性药物使用更适合被理解为住院期间重症状态和循环支持需求的替代指标, 而非药物本身直接导致 AKI 的证据。临床上, 当 PD 患者出现脓毒症或需要血管活性药物支持时, 应加强肾功能、尿量、容量状态、电解质及酸碱平衡监测, 并尽量避免不必要的肾毒性暴露。

单因素分析中, 年龄、INR、PTT、血钠、SOFA 评分和 SAPS II 评分等也与 AKI 记录存在关联, 提示凝血功能异常、电解质紊乱和整体疾病严重程度可能参与 AKI 相关临床表型。SOFA 与 SAPS II 均可从不同角度反映重症患者器官功能障碍和病情严重程度, 其与 AKI 的关联可能部分体现了全身危重程度与肾脏损伤之间的耦合关系[24][25]。部分变量在多因素模型中未保持统计学显著, 可能与样本量和 AKI 事件数有限、变量间相关性、编码定义差异以及治疗暴露和严重程度指标之间的重叠有关。因此, 本研究结果更适合作为探索性证据, 用于提示 PD 患者住院期间 AKI 相关临床特征, 而不宜过度解释单个变量的独立因果作用。

本研究进一步基于多因素 logistic 回归结果绘制了探索性列线图和 ROC 曲线。列线图的作用主要在于将多个相关因素以可视化方式整合展示, 使感染状态、循环支持需求及相关实验室指标与 AKI 记录状态之间的关系更加直观。ROC 曲线显示, 该模型在当前样本中具有一定表观区分能力, 表观 AUROC 为 0.8116。然而, 该结果需要谨慎解释。首先, 本研究样本量较小, AKI 事件数有限, AUROC 仅为表观性能, 可能存在过拟合。其次, 脓毒症和血管活性药物使用等变量可能与 AKI 在住院过程中同期发生, 不能确保其均为 AKI 发生前的预测因子。第三, 本研究未进行 Bootstrap 内部验证、校准曲线分析或外部验证, 因此该列线图不能视为成熟的临床预测模型, 也不应直接用于个体化风险预测、临床风险分层或临床决策。

总体来看, 本研究的临床意义在于从真实世界重症医学数据中总结 PD 患者住院期间 AKI 相关临床特征。对于存在脓毒症、循环支持需求或多项实验室异常的 PD 患者, 临床上可考虑更密切地监测肾功能、尿量、电解质和酸碱状态, 并在可行范围内优化容量和血流动力学管理。未来研究若能进一步明确

变量采集时间窗、AKI 发生时间、术中暴露和术后动态指标, 将有助于从“住院期间相关特征分析”推进到“术后早期动态预测”。

本研究仍存在若干局限。首先, 本研究为单数据库回顾性观察性研究, 样本量及 AKI 事件数有限, 结果稳定性和泛化能力仍需在多中心或其他数据库中进一步验证。其次, AKI 依据住院期间 ICD-9/ICD-10 诊断编码定义, 可能存在漏诊、误分类或编码偏倚, 也无法准确区分术前已存在 AKI、术后新发 AKI 及不同 AKI 分期。第三, 常规 EHR 数据不可避免地受到记录完整性、检测频次、编码习惯和临床流程差异的影响, 使用此类数据开展研究时需充分报告数据来源、变量定义、缺失数据处理和分析流程。第四, 部分变量的采集时间窗与 AKI 发生时间之间的先后关系无法完全确认, 血管活性药物使用和脓毒症等变量可能反映住院期间病情严重程度, 而非严格的前置预测因子。第五, 本研究未充分纳入术中失血量、液体管理、造影剂暴露、肾毒性药物、基线 eGFR 等重要围术期因素, 仍可能存在残余混杂。第六, 虽然本研究基于多因素 logistic 回归结果进行了列线图 and ROC 曲线的探索性展示, 但该分析仅用于描述当前样本中相关变量组合对 AKI 记录状态的表观区分能力。由于缺乏严格的预测时间起点, 且未进行 Bootstrap 内部验证、校准度评价和外部验证, 本研究所得列线图不能作为正式临床预测模型使用, 其结果仍需在更大样本、多中心数据及明确时间窗的研究中进一步验证。

## 5. 结论

综上, 本研究基于 MIMIC-IV 数据库接受 PD 的 ICU 患者, 分析了住院期间 AKI 记录状态的相关临床特征, 并以列线图和 ROC 曲线对多因素 logistic 回归结果进行了探索性可视化展示。脓毒症和血管活性药物使用与住院期间 AKI 记录状态独立相关, 提示感染相关全身反应、循环不稳定和重症治疗支持需求可能是 PD 患者 AKI 相关临床表型中的重要信号。探索性图形可帮助直观理解相关变量组合与 AKI 记录状态之间的关系, 但鉴于结局定义、变量时间顺序和验证不足等局限, 本研究结果应解释为回顾性相关因素分析及表观状态识别展示, 而非经验证的前瞻性风险预测模型。

## 参考文献

- [1] Cameron, J.L. and He, J. (2015) Two Thousand Consecutive Pancreaticoduodenectomies. *Journal of the American College of Surgeons*, **220**, 530-536. <https://doi.org/10.1016/j.jamcollsurg.2014.12.031>
- [2] Strobel, O., Neoptolemos, J., Jäger, D. and Büchler, M.W. (2018) Optimizing the Outcomes of Pancreatic Cancer Surgery. *Nature Reviews Clinical Oncology*, **16**, 11-26. <https://doi.org/10.1038/s41571-018-0112-1>
- [3] Bassi, C., Marchegiani, G., Dervenis, C., Sarr, M., Abu Hilal, M., Adham, M., et al. (2017) The 2016 Update of the International Study Group (ISGPS) Definition and Grading of Postoperative Pancreatic Fistula: 11 Years After. *Surgery*, **161**, 584-591. <https://doi.org/10.1016/j.surg.2016.11.014>
- [4] Swartling, O., Evans, M., Larsson, P., Gilg, S., Holmberg, M., Klevebro, F., et al. (2023) Risk Factors for Acute Kidney Injury after Pancreatoduodenectomy, and Association with Postoperative Complications and Death. *Pancreatology*, **23**, 227-233. <https://doi.org/10.1016/j.pan.2023.01.003>
- [5] Ji, Y., Zhou, Y., Shen, Z., Chen, H., Zhao, S., Deng, X., et al. (2023) Risk Factors for and Prognostic Values of Postoperative Acute Kidney Injury after Pancreaticoduodenectomy for Pancreatic Ductal Adenocarcinoma: A Retrospective, Propensity Score-Matched Cohort Study of 1312 Patients. *Cancer Medicine*, **12**, 7823-7834. <https://doi.org/10.1002/cam4.5543>
- [6] Putowski, Z., Majewska, K., Gruca, K., Zimnoch, A., Szczepańska, A., Krzych, Ł.J., et al. (2023) Intraoperative Hypotension and Its Association with Postoperative Acute Kidney Injury in Patients Undergoing Pancreaticoduodenectomy: A 5-Year, Single-Center, Retrospective Cohort Study. *Medical Science Monitor*, **29**, e938945. <https://doi.org/10.12659/msm.938945>
- [7] Li, S., Ren, W., Ye, X., Zhang, L., Song, B., Guo, Z., et al. (2024) An Online-Predictive Model of Acute Kidney Injury after Pancreatic Surgery. *The American Journal of Surgery*, **228**, 151-158. <https://doi.org/10.1016/j.amjsurg.2023.09.006>
- [8] Gameiro, J., Fonseca, J.A., Neves, M., Jorge, S. and Lopes, J.A. (2018) Acute Kidney Injury in Major Abdominal Surgery: Incidence, Risk Factors, Pathogenesis and Outcomes. *Annals of Intensive Care*, **8**, Article No. 22.

- <https://doi.org/10.1186/s13613-018-0369-7>
- [9] Prowle, J.R., Forni, L.G., Bell, M., Chew, M.S., Edwards, M., Grams, M.E., *et al.* (2021) Postoperative Acute Kidney Injury in Adult Non-Cardiac Surgery: Joint Consensus Report of the Acute Disease Quality Initiative and Perioperative Quality Initiative. *Nature Reviews Nephrology*, **17**, 605-618. <https://doi.org/10.1038/s41581-021-00418-2>
- [10] Kidney Disease: Improving Global Outcomes (KDIGO) Acute Kidney Injury Work Group (2012) KDIGO Clinical Practice Guideline for Acute Kidney Injury. *Kidney International Supplements*, **2**, 1-138.
- [11] Poston, J.T. and Koyner, J.L. (2019) Sepsis Associated Acute Kidney Injury. *BMJ*, **364**, k4891. <https://doi.org/10.1136/bmj.k4891>
- [12] Peerapornratana, S., Manrique-Caballero, C.L., Gómez, H. and Kellum, J.A. (2019) Acute Kidney Injury from Sepsis: Current Concepts, Epidemiology, Pathophysiology, Prevention and Treatment. *Kidney International*, **96**, 1083-1099. <https://doi.org/10.1016/j.kint.2019.05.026>
- [13] Singer, M., Deutschman, C.S., Seymour, C.W., Shankar-Hari, M., Annane, D., Bauer, M., *et al.* (2016) The Third International Consensus Definitions for Sepsis and Septic Shock (Sepsis-3). *JAMA*, **315**, 801-810. <https://doi.org/10.1001/jama.2016.0287>
- [14] Johnson, A.E.W., Bulgarelli, L., Shen, L., Gayles, A., Shammout, A., Horng, S., *et al.* (2023) MIMIC-IV, a Freely Accessible Electronic Health Record Dataset. *Scientific Data*, **10**, Article No. 1. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01899-x>
- [15] R Core Team (2025) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- [16] DeOliveira, M.L., Winter, J.M., Schafer, M., Cunningham, S.C., Cameron, J.L., Yeo, C.J., *et al.* (2006) Assessment of Complications after Pancreatic Surgery: A Novel Grading System Applied to 633 Patients Undergoing Pancreaticoduodenectomy. *Annals of Surgery*, **244**, 931-939. <https://doi.org/10.1097/01.sla.0000246856.03918.9a>
- [17] Long, T.E., Helgason, D., Helgadottir, S., Palsson, R., Gudbjartsson, T., Sigurdsson, G.H., *et al.* (2016) Acute Kidney Injury after Abdominal Surgery: Incidence, Risk Factors, and Outcome. *Anesthesia & Analgesia*, **122**, 1912-1920. <https://doi.org/10.1213/ane.0000000000001323>
- [18] STARSurg Collaborative (2018) Prognostic Model to Predict Postoperative Acute Kidney Injury in Patients Undergoing Major Gastrointestinal Surgery Based on a National Prospective Observational Cohort Study. *BJS Open*, **2**, 400-410. <https://doi.org/10.1002/bjs5.86>
- [19] Zarbock, A., Nadim, M.K., Pickkers, P., Gomez, H., Bell, S., Joannidis, M., *et al.* (2023) Sepsis-Associated Acute Kidney Injury: Consensus Report of the 28th Acute Disease Quality Initiative Workgroup. *Nature Reviews Nephrology*, **19**, 401-417. <https://doi.org/10.1038/s41581-023-00683-3>
- [20] Manrique-Caballero, C.L., Del Rio-Pertuz, G. and Gomez, H. (2021) Sepsis-Associated Acute Kidney Injury. *Critical Care Clinics*, **37**, 279-301. <https://doi.org/10.1016/j.ccc.2020.11.010>
- [21] Waikar, S.S., Wald, R., Chertow, G.M., Curhan, G.C., Winkelmayr, W.C., Liangos, O., *et al.* (2006) Validity of International Classification of Diseases, Ninth Revision, Clinical Modification Codes for Acute Renal Failure. *Journal of the American Society of Nephrology*, **17**, 1688-1694. <https://doi.org/10.1681/asn.2006010073>
- [22] Grams, M.E., Waikar, S.S., MacMahon, B., Whelton, S., Ballew, S.H. and Coresh, J. (2014) Performance and Limitations of Administrative Data in the Identification of AKI. *Clinical Journal of the American Society of Nephrology*, **9**, 682-689. <https://doi.org/10.2215/cjn.07650713>
- [23] Hwang, Y.J., Shariff, S.Z., Gandhi, S., Wald, R., Clark, E., Fleet, J.L., *et al.* (2012) Validity of the *International Classification of Diseases, Tenth Revision* Code for Acute Kidney Injury in Elderly Patients at Presentation to the Emergency Department and at Hospital Admission. *BMJ Open*, **2**, e001821. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2012-001821>
- [24] Vincent, J., Moreno, R., Takala, J., Willatts, S., De Mendonça, A., Bruining, H., *et al.* (1996) The SOFA (Sepsis-Related Organ Failure Assessment) Score to Describe Organ Dysfunction/Failure. *Intensive Care Medicine*, **22**, 707-710. <https://doi.org/10.1007/bf01709751>
- [25] Le Gall, J.R., Lemeshow, S. and Saulnier, F. (1993) A New Simplified Acute Physiology Score (SAPS II) Based on a European/North American Multicenter Study. *JAMA: The Journal of the American Medical Association*, **270**, 2957-2963. <https://doi.org/10.1001/jama.1993.03510240069035>