文章编号：1001-6325(2026)09-1256-06

临床研究

胰腺术后患者扫描式葡萄糖监测准确性的影响因素

兰 岭[1]，张 乐[1]，张越伦[2]，申 乐[1*]，黄宇光[1]

中国医学科学院北京协和医学院 北京协和医院 1. 麻醉科；2. 医学研究中心，北京 100730

摘要：目的 探究扫描式葡萄糖监测(FGM)系统在胰腺手术患者术后阶段数值准确性的影响因素。**方法** 回顾性分析 2024 年 3 月至 2025 年 3 月间于北京协和医院择期行胰腺手术的 279 例，最终纳入 255 例成年患者。所有患者术前 1 d 于左上臂背侧佩戴 FGM 传感器且术后至少进行 2 次床旁即时(POC)毛细血管血糖分析。参考血糖值为与 FGM 值同一时期的 POC 血糖值，配对方法为以 POC 血糖值时间点为基准点，查询 Gplus 系统中最临近该基准点时间点的 FGM 值进行配对。计算每位患者的配对血糖绝对差值均值。利用 LASSO 回归法进行变量筛选，基于 Bootstrap 重抽样评估筛选变量的出现频次，采用多元线性回归法探究变量与配对血糖值差值均值的相关性。**结果** FGM 值与 POC 血糖值差值均值的中位数为 1.2 mmol/L。多元线性回归分析结果显示术后血糖最大值(β=0.082，95% *CI*[0.055，0.108]，*P*<0.001)、术中晶体液输注量(输注每 1 L，β=0.124，95% *CI*[0.054，0.194]，*P*<0.001)、黄疸(β=0.215，95% *CI*[0.019，0.412]，*P*=0.031)与年龄(每增加 10 岁，β=0.091，95% *CI*[0.031，0.150]，*P*=0.003)与配对血糖值差值均值的自然对数线性相关，该模型调整后的决定系数 R_{adj}^2=0.245。**结论** 年龄、黄疸、术中晶体液输注量及术后血糖最大值均为影响 FGM 术后阶段数值准确性的独立影响因素，上述指标水平的升高均与 FGM 监测偏差增大线性相关。

关键词： 扫描式葡萄糖监测；血糖；黄疸；手术

中图分类号：R657.5；R587.1 **文献标志码：**A

DOI：10.16352/j.issn.1001-6325.2026.09.1256

Interference factors affecting the accuracy of flash glucose monitoring after pancreatic surgery

LAN Ling[1], ZHANG Le[1], ZHANG Yuelun[2], SHEN Le[1*], HUANG Yuguang[1]

1. Department of Anesthesiology; 2. Medical Research Center, Peking Union Medical College Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences & Peking Union Medical College, Beijing 100730, China

Abstract: Objective To explore the factors affecting the numerical accuracy of flash glucose monitoring (FGM) system in patients after pancreatic surgery. **Methods** A retrospective analysis was conducted on 279 adult patients who underwent elective pancreatic surgery at Peking Union Medical College Hospital from March 2024 to March 2025. Finally, 255 cases were included. All patients wore FGM sensors on the dorsum of the left upper arm one day before surgery, and received point-of-care (POC) capillary blood glucose measurements at least twice postoperatively. The reference blood glucose values were contemporaneous POC blood glucose readings. Paired matching was

收稿日期：2026-05-20 **修回日期：**2026-06-22

基金项目：雄安新区科技创新专项(2023XAGG0070)；协和人才培育计划 A 类项目(ULJ02859)；协和人才培育计划 B 类项目(UGG10539)；首都卫生发展科研专项(首发 2024-2-4015)

* **通信作者(corresponding author)：**pumchshenle@163.com

performed by taking the time points of POC blood glucose detection as benchmarks, and retrieving the closest FGM readings in the Gplus system for pairing. The mean absolute difference of paired blood glucose values was calculated for each subject. LASSO regression was used for variable selection, and Bootstrap resampling was applied to evaluate the occurrence frequency of screened variables. Multiple linear regression analysis was adopted to investigate the correlation between relevant variables and the mean difference of paired blood glucose values. **Results** The median mean difference between FGM readings and POC blood glucose values was 1.2 mmol/L. Multiple linear regression analysis revealed that maximum postoperative blood glucose (β=0.082, 95% *CI*: 0.055-0.108, P<0.001), intraoperative crystalloid infusion (per 1L increment, β=0.124, 95% *CI*: 0.054-0.194, P<0.001), jaundice (β=0.215, 95% *CI*: 0.019-0.412, P<0.05) and age (per decade increase, β=0.091, 95% *CI*: 0.031-0.150, P<0.05) were linearly correlated with the natural logarithm of the mean paired blood glucose difference (R_{adj}^2=0.245). **Conclusions** Age, jaundice, intraoperative crystalloid infusion volume and maximum postoperative blood glucose are independent influencing factors for postoperative FGM accuracy. Elevations of these indicators are linearly correlated with greater FGM deviation.

Key words: flash glucose monitoring; blood glucose; jaundice; surgery

胰腺作为人体血糖调节的重要器官,其手术(如胰十二指肠切除术或胰体尾切除术)可能导致患者术后出现新发糖尿病或原有糖尿病恶化,导致患者出现持续性高血糖[1-3]。因此,胰腺手术患者围术期血糖管理面临独特挑战,尤其是术后阶段因手术应激[2]、胰腺有效组织减少[3-4]、生长抑素及其类似物[5]和肠外营养的应用[6],患者常出现明显的血糖波动,进而导致不良预后。目前,扫描式葡萄糖监测(flash glucose monitoring, FGM)系统已经广泛应用于糖尿病患者的日常血糖管理[7]并且逐步延伸至院内临床场景[8],尤其是手术室、重症医学病房等场景的应用[9]。然而,FGM 在胰腺手术患者中应用的相关研究相对较少且针对胰腺手术场景下报道 FGM 数值准确性影响因素的研究更是匮乏。因此,本研究旨在探究 FGM 系统在胰腺术后阶段数值准确性的影响因素以期为临床应用提供参考。

1　材料与方法

1.1　材料

1.1.1　一般资料:本研究为基于一项前瞻性队列研究《胰腺外科不同手术方式围术期血糖与组织间液葡萄糖水平与术后临床结局相关胰瘘相关性的多中心前瞻性队列研究》(北京协和医院伦理委员会批准号:K5286)的单中心回顾性二次分析,本次分析研究的患者知情同意被批准豁免。研究数据来源为 Gplus 血糖管理系统及医院信息管理系统(hospital information system, HIS),数据收集时间为 2024 年 3 月至 2025 年 3 月。

1.1.2　纳排标准:研究对象为研究期间于北京协和医院住院并择期行胰腺手术的患者(年龄≥18 周岁)。纳入标准为:术前 1 d 接受 FGM 监测且术后至少进行 2 次床旁即时(point-of-care, POC)血糖检测。排除标准:胰腺神经内分泌肿瘤患者、FGM 数据中断、传感器脱落或 FGM 配对血糖参考值缺失。

1.1.3　研究设备:本研究采用 FreeStyle Libre H 扫描式葡萄糖监测系统,是一款经工厂校准的适用于 4 岁及以上人群的组织间液葡萄糖持续检测设备。该系统由植入上臂的小型可穿戴传感器以及用于扫描和显示血糖数据的读取设备或兼容智能手机应用程序组成,最长可使用 14 d。术后血糖检测采用 Contour Next 床旁 POC 血糖监测系统(Ascensia Diabetes Care, Basel, Switzerland),是一款通过指尖血样本进行自我血糖检测的手持式酶法血糖仪。

1.2　方法

1.2.1　血糖配对:所有纳入分析患者至少于术前 1 d在左上臂后侧佩戴 FGM 传感器。术前阶段由指定医师使用专用扫描仪完成传感器的植入与激活,传感器每分钟持续测量组织间液葡萄糖水平并以 15 min 为间隔记录一次数据并存储导入 Gplus 血糖管理系统。每位患者术后均进行至少 2 次 POC 血糖检测。血糖配对的方法:以 POC 血糖值时间点为

基准点,查询 Gplus 系统中最临近该基准点时间点的 FGM 值进行配对,最临近该基准点的定义为 Gplus 系统中与 POC 血糖值时间点差值绝对值最小的时间点。

1.2.2 数据收集:患者的人口学、实验室及围术期数据来自医院信息系统(hospital information system,HIS)系统,FGM 数据来自 Gplus 血糖管理系统。收集相关数据包括:年龄、性别、BMI、吸烟史、饮酒史、ASA 分级、高血压病史、糖尿病史、冠心病史、黄疸、术前新辅助化疗史、术前空腹静脉血糖值、术前肌酐值、胆红素值、手术方式及时间、胰腺质地、术中晶体液量、术中胶体液量、术中乳酸最大值、术中血细胞比容最小值、出血量、尿量、术中及术后血糖最大值和最小值、术后 FGM 数值。

1.2.3 结局变量:FGM 数值的绝对差异,具体定义为:术后阶段不同时间点配对血糖(FGM 值与 POC 值)的差值取绝对值后的平均值。

1.3 统计学分析

采用 R 语言(版本 4.4.1)软件进行数据处理。正态分布计量资料以均值±标准差($\bar{x}\pm s$)表示,非正态分布计量资料以中位数(四分位间距)$M(Q1,Q4)$表示,计数资料以频数(百分比)n(%)表示。

首先计算 FGM 数值的绝对差异,进行正态性检验。若不符合正态分布则进行相关转换(如自然对数)。其次利用方差膨胀因子(variance inflation factor,VIF)进行共线性诊断,剔除 VIF>5 的自变量。利用 LASSO 回归法进行变量筛选,通过十折交叉验证确定最优惩罚参数,筛选独立预测变量。利用 Bootstrap 重抽样(n=500)验证筛选变量的纳入频率。最后基于筛选出的变量拟合多元线性回归模型,探究与 FGM 数值的绝对差异相关变量的相关性。

2 结果

2.1 一般情况

本研究初始纳入择期行胰腺手术的 279 例患者,其中 24 例患者被排除,原因包括:数据中断 2 例、血糖记录缺失 6 例、传感器脱落 16 例,最终纳入 255 例患者进行准确性影响因素分析(具体因素详见表 1)。FGM 数值的绝对差异的中位数为 1.2 mmo/L(呈现非正态分布),经自然对数转换后 FGM 数值的绝对差异的自然对数为 0.07±0.7(呈现正态分布)。

表 1 研究人群围术期相关资料

Table 1 Perioperative characteristics of the study population[$M(Q1,Q4)$,($\bar{x}\pm s$),n(%)]

variable	n=255	VIF
age/year	57.2±13.7	1.59
male	127(49.8)	2.23
BMI(kg/m^2)	22.9±2.8	1.48
smoking history	66(25.9)	2.21
alcohol drinking history	61(23.9)	2.16
ASA classification		1.49
ASA Ⅰ-Ⅱ	211(82.7)	
ASA Ⅲ	44(17.3)	
jaundice	63(24.7)	2.66
hypertension	87(34.1)	1.44
diabetes mellitus	60(23.5)	1.53
coronary heart disease	24(9.4)	1.44
preoperative neoadjuvant chemotherapy	21(8.2)	1.25
preoperative fasting blood glucose/(mmol/L)	5.6(4.9,6.8)	1.27
preoperative serum creatinine/(μmol/L)	60(51,69)	1.61
preoperative serum bilirubin/(μmol/L)	13.9(10,25.1)	2.53
surgical procedure		1.98
pancreaticoduodenectomy	145(56.9)	
distal/central pancreatectomy	110(43.1)	
operation time/hour	4.6(3.2,6.3)	3.06
pancreatic texture		
firm	68(26.7)	
hard	58(22.7)	1.78
soft	129(50.6)	1.91
intraoperative maximum blood glucose/(mmol/L)	8.3±2.4	3.02
intraoperative minimum blood glucose/(mmol/L)	6.3±1.6	2.16
intraoperative maximum lactate/(mmol/L)	1.6±0.9	1.86
intraoperative minimum hematocrit/%	35.5(31.8,38.6)	1.77
intraoperative crystalloid infusion/mL	3 100(2 200, 3 700)	2.38
intraoperative colloid infusion/mL	500(0, 500)	1.70
blood loss/mL	200(80, 400)	1.70
urine output/mL	350(200, 600)	2.09
postoperative maximum blood glucose/(mmol/L)	8.3±2.4	1.48
postoperative minimum blood glucose/(mmol/L)	6.3±1.6	1.45
absolute difference of FGM and POC/(mmol/L)	1.2(0.7,1.8)	
natural logarithm of absolute difference of FGM	0.07±0.7	

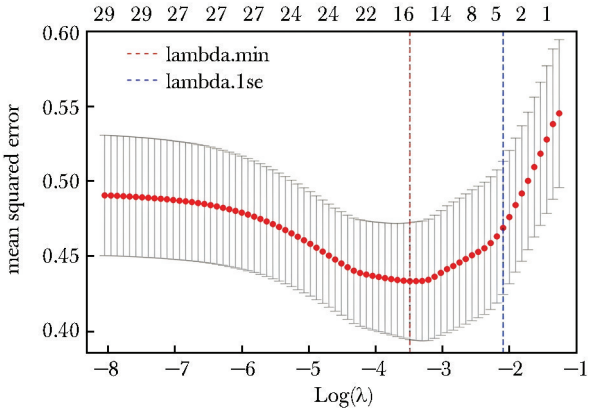
BMI. body mass index; ASA. american society of anesthesiologists; FGM. flash glucose monitoring; POC. point-of-care.

2.2　变量筛选

经 VIF 共线性诊断后，候选变量中未发现 VIF>5 的变量（见表 1）。LASSO 回归变量筛选在惩罚参数的最优参数在 1 倍标准误 lambda 处（详见图 1），最终筛选出年龄、黄疸、术中晶体液输注量、术后血糖最大值共 4 个独立预测变量。基于 Bootstrap 重抽样结果发现以上 4 个变量出现频率稳居前 4 位，术后血糖最大值为 99.6%，术中晶体液为 92.0%，年龄为 78.2%，黄疸为 64.8%（详见图 2）。

2.3　FGM 数值的绝对差异自然对数的多元线性回归

多元线性回归分析结果显示（详见表 2）术后血糖最大值（β 值：0.082，95% 置信区间［0.055，0.108］，P<0.001）、术中晶体液（每输注 1 L，β 值：0.124，95%置信区间［0.054，0.194］，P<0.001）、黄疸（β 值：0.215，95%置信区间［0.019，0.412］，P=0.031）与年龄（每增加 10 岁，β 值：0.091，95%置信区间［0.031，0.150］，P=0.003）与 FGM 数值的绝对差异自然对数线性相关。该模型调整后决定系数 R_{adj}^2=0.245。其中，黄疸对于 FGM 数值的绝对差异偏差影响较高，合并黄疸患者较无黄疸患者 FGM 数值绝对差异偏差增加 24%。术中晶体液输注每增加 1 000 mL，FGM 数值绝对差异偏差增加 10.5%。术后血糖最大值每增加 1 mmol/L，FGM 数值绝对差异偏差增加 8.5%。年龄每增加 10 岁，FGM 数值绝对差异偏差增加 9.1%。



The red dashed line represents lambda. min (minimum penalty parameter), and the blue dashed line represents lambda. 1se (1 standard error penalty parameter).

图 1　基于 LASSO 回归的变量筛选路径图

Fig 1　Variable selection path plot based on LASSO regression

3　讨论

本研究利用一项胰腺手术患者围术期应用 FGM 的前瞻性队列数据库，回顾性分析导致胰腺术后阶段 FGM 数据偏差的相关影响因素。多元线性

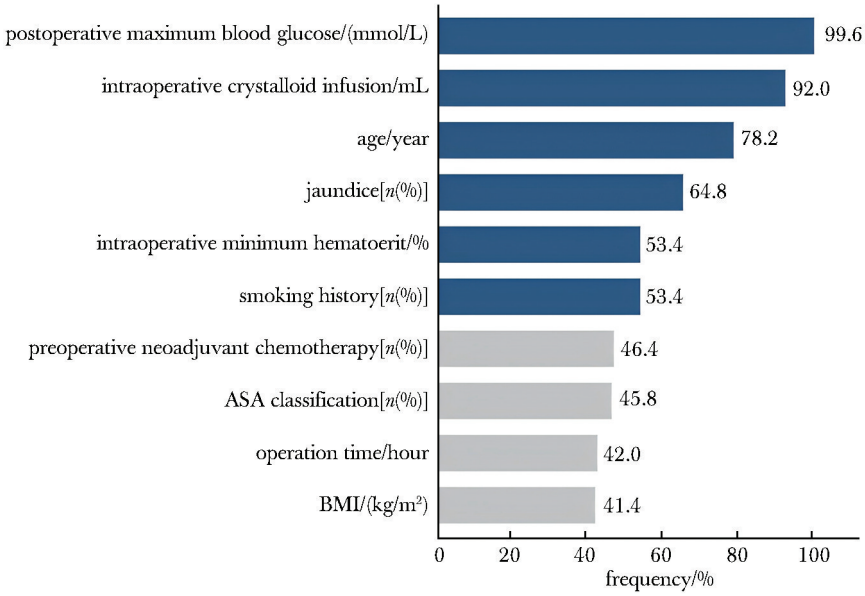


图 2　Bootstrap 重抽样变量纳入频率直方图（前 10 位）

Fig 2　Frequency histogram of variable inclusion by Bootstrap resampling (top 10)

表 2 FGM 数值绝对差异自然对数的多元线性回归分析

Table 2 Multivariate linear regression analysis for the natural logarithm of the absolute difference in FGM values

variable	β	95% *CI*	exp(β)	95% *CI*	*P* value
age(per 10 years)	0.091	[0.031,0.150]	1.091	[1.032,1.151]	0.003
jaundice[*n*(%)]	0.215	[0.019,0.412]	1.240	[1.019,1.509]	0.031
intraoperative crystalloid infusion (per 1 L increment)	0.124	[0.054,0.194]	1.105	[1.054,1.194]	<0.001
postoperative maximum blood glucose/(mmol/L)	0.082	[0.055,0.108]	1.085	[1.057,1.114]	<0.001

$R_{adj}^2 = 0.245$.

回归分析显示年龄、黄疸状态、术中液体管理及术后血糖变化均在不同程度上与胰腺术后 FGM 数值偏差线性相关。

扫描式葡萄糖监测(flash glucose monitoring, FGM)系统通过直径小于 0.4 mm 的传感器插入皮肤下方 5 mm 深度以监测组织间液的葡萄糖浓度。它的显著特点是采用工厂校准,无需指血校正,但其监测结果受到外力压迫、佩戴时间、药物等多种因素影响[10-13]。由于传感器探头需要与组织间液充分浸润才能达到葡萄糖水平的平衡。正常生理情况下,组织间液葡萄糖与毛细血管血糖数值间存在 5~10 min 的延迟。因此患者血糖水平的快速变化会影响 FGM 数值准确性。在患者静脉或毛细血管血糖剧烈变化(升高或降低)时会导致组织间液与毛细血管血糖之间的差异增加,导致 FGM 数值与毛细血管差异增加[11]。本研究结果提示患者术后血糖最大值与 FGM 数值的绝对差异增加线性相关,表明患者术后血糖值越高,其与毛细血管血糖之间的差值越大导致 FGM 数值偏差越大。

病理状态下人体胆红素高于 34.2 μmol/L 会发生显性黄疸。既往生产厂商数据表明多种可能干扰 FGM 监测结果的药物,未发现 0.34 mmol/L 测试浓度的胆红素会对 FGM 读数造成影响。然而,这与本研究结果不一致。本研究结果提示黄疸是导致胰腺手术患者术后 FGM 测量数值偏差的重要影响因素。胆红素作为一种内源性物质,其化学特性(如氧化还原电位)可能干扰 FGM 传感器中的电化学反应,从而导致读数偏差,其浓度越高可能导致偏差越大。

组织间液成分或者量的改变会影响 FGM 的数值准确性。患者重度脱水或失水过多可能导致组织间液成分减少进而导致 FGM 准确性降低[12]。同样,本研究结果表明术中晶体液的大量输注会引起患者组织水肿致使组织间液的成分改变进而影响 FGM 数值的准确性。此外,本研究发现随着年龄的增加,FGM 的数值准确性偏差轻度增加,这可能同样与组织间液总量的改变有关。

本研究亦存在一定的局限性。首先,本研究回顾性研究的本质导致血糖的配对无法预先进行,导致 FGM 差异的计算可能存在一定的信息偏倚。其次,研究未记录患者水杨酸类等可能导致 FGM 读数差异的药物的使用情况。最后,尽管已知传感器受压会导致 FGM 读数异常,但本研究无法判断 FGM 数值测量期间患者的体位及传感器受压情况。

综上所述,本研究证实年龄、黄疸、术中晶体液输注量及术后血糖最大值是胰腺术后 FGM 准确性的独立影响因素,各因素水平升高与 FGM 监测偏差增大呈线性相关。临床应用 FGM 时需重点关注上述因素,必要时联合床旁血糖检测,保障血糖管理准确性。

参考文献:

[1] 中华医学会外科学分会胰腺外科学组,中华医学会内分泌学分会。胰源性糖尿病诊断与治疗中国专家共识(2025 版)[J].中华胰腺病杂志,2025,25:401-417.

[2] Ekström E, Fagher K, Tingstedt B, *et al*. Hyperglycemia and insulin infusion in pancreatoduodenectomy: a prospective cohort study on feasibility and impact on compli-

cations[J].Int J Surg,2023,109:3770-3777.

[3] Di Martino M,De La Hoz Rodriguez Á,Saibanti A,*et al*. Pancreatic exocrine insufficiency after pancreatic resection: a systematic review[J].BMC Surg,2025,25:53.doi:10.1186/s12893-025-02787-y.

[4] Yang J,Tan C,Liu Y,*et al*.Remnant pancreas volume affects new-onset impaired glucose homeostasis secondary to pancreatic cancer[J].Biomedicines,2024,12:1653. doi:10.3390/biomedicines12081653.

[5] Gao R, Acreman S, Dou H,*et al*. Antecedent hypoglycaemia impairs glucagon secretion by enhancing somatostatin-mediated negative feedback control[J].Nat Metab,2026,8:159-176.

[6] 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,2025,24:1353-1372.

[7] 中国医师协会内分泌代谢科医师分会。中国持续葡萄糖监测临床应用指南(2024 年版)[J].中华内分泌代谢杂志,2024,40:369-385.

[8] Wright JJ, Williams AJ, Friedman SB,*et al*.Accuracy of continuous glucose monitors for inpatient diabetes management[J]. J Diabetes Sci Technol, 2023,9:1252-1255.

[9] 吴琦玥,段怡,高志峰,等.围手术期连续葡萄糖监测临床应用进展[J].国际麻醉学与复苏杂志,2025,46:188-191.

[10] 杨飞凤,王喆,李志强,等.连续血糖监测技术研究进展[J].中国医疗设备,2024,39:159-164.

[11] Basu A, Veettil S, Dyer R, *et al*.Direct evidence of acetaminophen interference with subcutaneous glucose sensing in humans: a pilot study[J]. Diabetes Technol Ther, 2016, (2):18 Suppl 2:S243-7.

[12] Bellido V, Freckman G, Pérez A, *et al*.Accuracy and potential interferences of continuous glucose monitoring sensors in the hospital[J].Endocr Pract, 2023,11:919-927.

[13] Matsuyama M, Meiri S, Sawada H, *et al*.Interference of intravenous acetaminophen with continuous glucose monitoring system[J].JMA J, 2025,10:1463-1467.