

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2025.06.014

GDM 合并 PCOS 孕妇胎儿生长受限的风险因素分析及预测模型构建

宋宝英¹, 章玉霞², 李涓¹

(1. 安溪县妇幼保健院产科, 福建泉州 362400; 2. 安溪县妇幼保健院超声科, 福建泉州 362400)

【摘要】目的 分析妊娠期糖尿病 (GDM) 合并多囊卵巢综合征 (PCOS) 孕妇胎儿生长受限 (FGR) 的相关危险因素, 并构建基于代谢、内分泌及胎盘血流特征的 FGR 风险预测模型。**方法** 回顾性纳入 2022 年 1 月至 2025 年 1 月在安溪县妇幼保健院分娩的 100 例 GDM 合并 PCOS 孕妇, 以胎儿估计体重 (EFW) 低于同孕周第 10 百分位 (P10) 作为 FGR 发生的判定标准, 将孕妇分为 FGR 组 ($n=28$) 和非 FGR 组 ($n=72$)。比较两组的一般资料、代谢指标、内分泌水平、妊娠并发症及胎盘血流参数差异。采用单因素和多因素 Logistic 回归分析筛选 FGR 发生的独立危险因素, 基于最终模型构建预测模型, 并以受试者工作特征 (ROC) 曲线、校准曲线评估模型性能。**结果** FGR 发生率为 28.0%。FGR 组孕前体质量指数 (BMI) 较低、孕期增重 (GWG) 不足, 且空腹血糖 (FBG)、口服葡萄糖耐量试验 (OGTT)、糖化血红蛋白 (HbA1c)、稳态模型评估胰岛素抵抗指数 (HOMA-IR)、甘油三酯 (TG) 和总睾酮 (T) 水平均显著升高 (均 $P<0.05$)。胎盘血流方面, FGR 组脐动脉搏动指数 (UAPI) 升高、脑胎比 (CPR) 下降 ($P<0.05$)。多因素 Logistic 回归分析显示, GWG (OR=0.871, $P=0.039$)、HOMA-IR (OR=1.421, $P=0.037$)、抗缪勒氏管激素 (AMH) (OR=1.263, $P=0.015$)、UAPI (OR=4.873, $P=0.005$) 和 CPR (OR=0.112, $P=0.002$) 是 FGR 发生的独立影响因素。基于五项变量构建的预测模型曲线下面积 (AUC) 为 0.892 (95%CI: 0.823 ~ 0.961), 具有良好区分度; Hosmer-Lemeshow 检验 $P=0.421$, 校准度良好。**结论** GDM 合并 PCOS 孕妇中, GWG 不足、代谢异常、内分泌紊乱及胎盘血流障碍均为 FGR 发生的重要风险因素, 基于其构建的预测模型具有较高准确性和临床适用性, 可为高危孕妇的孕晚期风险分层和个体管理提供参考。

【关键词】 妊娠期糖尿病 (GDM); 多囊卵巢综合征 (PCOS); 胎儿生长受限 (FGR); 预测模型; 胎盘血流**【中图分类号】** R318.08**【文献标志码】** A

文章编号: 1674-1242 (2025) 06-0927-09

Risk Factor Analysis and Predictive Model Development for Fetal Growth Restriction in Pregnant Women with GDM and PCOS

SONG Baoying¹, ZHANG Yuxia², LI Juan¹

(1. Department of Obstetrics, Anxi County Maternal and Child Health Hospital, Quanzhou, Fujian 362400, China;

2. Department of Ultrasound, Anxi County Maternal and Child Health Hospital, Quanzhou, Fujian 362400, China)

【Abstract】Objective To analyze risk factors associated with fetal growth restriction (FGR) in pregnant women with gestational diabetes mellitus (GDM) and polycystic ovary syndrome (PCOS), and to establish an FGR risk prediction model based on metabolic, endocrine, and placental blood flow characteristics. **Methods** A retrospective

收稿日期: 2025-03-17。

作者简介: 宋宝英 (1986—), 女, 福建省泉州市人, 主治医师, 研究方向: 妊娠期糖尿病。

通信作者: 李涓 (1980—), 女, 福建省泉州市人, 主任医师, 研究方向: 妊娠期糖尿病。邮箱: 540134363@qq.com。

study was conducted including 100 pregnant women with GDM and PCOS who delivered at Anxi County Maternal and Child Health Hospital between January 2022 and January 2025. FGR was defined as estimated fetal weight (EFW) below the 10th percentile (P10) for gestational age. Participants were divided into an FGR group ($n=28$) and a non-FGR group ($n=72$). The differences in general characteristics, metabolic indicators, endocrine levels, pregnancy complications and placental blood flow parameters were compared between the two groups. Univariate and multivariate Logistic regression analysis was employed to identify independent risk factors for FGR. A predictive model was constructed based on the final model, with model performance evaluated using receiver operating characteristic (ROC) curves and calibration curves. **Results** The incidence of FGR was 28.0%. The FGR group exhibited lower pre-pregnancy body mass index (BMI), inadequate gestational weight gain (GWG), and significantly elevated levels of fasting blood glucose (FBG), oral glucose tolerance test (OGTT), glycated hemoglobin (HbA1c), homeostasis model assessment-insulin resistance (HOMA-IR), triglycerides (TG), and total testosterone (T) levels (all $P<0.05$). Regarding placental blood flow, the umbilical artery pulsatility index (UAPI) was elevated and the cerebral-fetal ratio (CPR) was decreased in the FGR group ($P<0.05$). Multivariate Logistic regression analysis revealed that GWG(OR=0.871, $P=0.039$), HOMA-IR (OR=1.421, $P=0.037$), anti-Müllerian hormone (AMH) (OR=1.263, $P=0.015$), UAPI (OR=4.873, $P=0.005$), and CPR (OR=0.112, $P=0.002$) were identified as independent risk factors for FGR. The area under the curve (AUC) of the predictive model constructed based on five variables was 0.892 (95%CI: 0.823–0.961), demonstrating good discriminatory ability. The Hosmer-Lemeshow test yielded a P value of 0.421, indicating good calibration. **Conclusion** In pregnant women with GDM and PCOS, inadequate GWG, metabolic abnormalities, endocrine disorders, and placental blood flow impairment are all significant risk factors for FGR. The predictive model developed based on these factors demonstrates high accuracy and clinical applicability, providing a reference for risk stratification and individualized management of high-risk pregnant women in late pregnancy.

【Key words】 Gestational Diabetes Mellitus (GDM); Polycystic Ovary Syndrome (PCOS); Fetal Growth Restriction (FGR); Prediction Model; Placental Blood Flow

0 引言

胎儿生长受限 (Fetal Growth Restriction, FGR) 是围产医学领域高度关注的妊娠不良事件之一, 其不仅显著增加宫内窘迫、早产、剖宫产率, 还与成年期代谢综合征、心血管疾病等远期健康风险密切相关^[1]。既往研究^[2]已证实, 妊娠期糖尿病 (Gestational Diabetes Mellitus, GDM) 可影响胎盘血流动力学及葡萄糖转运, 从而干扰胎儿生长节律; 而多囊卵巢综合征 (Polycystic Ovary Syndrome, PCOS) 患者在孕期常伴持续的胰岛素抵抗、高雄激素环境和慢性低度炎症, 这些病理过程同样可能通过影响胎盘灌注与胎盘绒毛发育使胎儿营养供应受限。

值得关注的是, 临床实践中 GDM 与 PCOS 的共病并不少见, 两者在代谢异常、内分泌紊乱及

炎症反应方面具有叠加效应, 可进一步加剧孕期代谢负荷, 并可能对胎盘发育造成协同损害 [3]。现有研究多聚焦于单一疾病对胎儿生长的影响, 而对 GDM 合并 PCOS 这一特殊人群的 FGR 发生风险的研究仍相对匮乏。此外, 传统风险评估方式多依赖经验判断, 缺乏量化模型, 不利于精准识别高危孕妇及进行干预。

基于此背景, 本研究纳入在安溪县妇幼保健院管理的 GDM 合并 PCOS 孕妇为研究对象, 通过分析其 FGR 发生的危险因素, 探索代谢、激素与胎盘功能指标的综合作用特征, 并构建 FGR 发生的风险预测模型, 旨在为高危孕妇的孕晚期风险分层、个体孕期管理及改善围产结局提供客观参考依据。

1 资料与方法

1.1 研究对象

回顾性纳入2022年1月至2025年1月在安溪县妇幼保健院产科管理并分娩的GDM合并PCOS孕妇100例作为研究对象。所有入组孕妇均为单胎妊娠,并完成系统产检及围产期结局记录。本研究作为回顾性队列研究,在整个研究过程中,已对患者资料进行匿名处理,患者风险较低,因此安溪县妇幼保健院医学伦理委员会豁免了患者知情同意(伦理编号:AXKY20250320)。本研究严格遵守临床研究的相关伦理准则,保护患者的最基本权利。

纳入标准:①年龄18~45岁,单胎自然受孕或辅助生殖受孕均可;②符合GDM和PCOS双重诊断标准;③在本院孕期管理且具备完整孕前、孕期代谢、激素、超声及围产资料;④具有明确的分娩结局并完成全程随访。排除标准:①存在孕前2型糖尿病、严重甲状腺疾病、肾上腺/垂体疾病等影响代谢的基础疾病;②合并系统性红斑狼疮、抗磷脂综合征等免疫性疾病;③胎儿结构畸形、染色体异常或遗传性疾病;④多胎妊娠或孕早期出血影响妊娠结局者;⑤临床资料严重缺失或未在本院分娩者。

1.2 研究方案设计

本研究为回顾性队列研究,以2022年1月至2025年1月在本院分娩的GDM合并PCOS孕妇为研究对象。以胎儿估计体重(Estimated Fetal Weight, EFW)低于同孕周第10百分位(P10)作为FGR的判定标准,将研究对象分为FGR组($n=28$)与非FGR组($n=72$),对两组孕妇的临床资料进行分析,并筛选影响FGR发生的关键因素。

具体研究流程:①按纳入和排除标准筛选病例,形成连续性研究队列;②从电子病历系统中提取人口学特征、代谢指标、激素水平及妊娠并发症等相关变量,并进行统一编码与格式化处理;③依据FGR发生的判定标准判定FGR结局;④行单因素分析筛选候选变量,并采用多因素Logistic回归分析确定FGR发生的独立危险因素;⑤基于回归结果构建FGR发生的风险预测模型;⑥采用受试者工作特征(Receiver Operating

Characteristic, ROC)曲线、校准曲线和Hosmer-Lemeshow检验评价模型性能,并通过Bootstrap方法行内部验证(研究流程图如图1所示)。

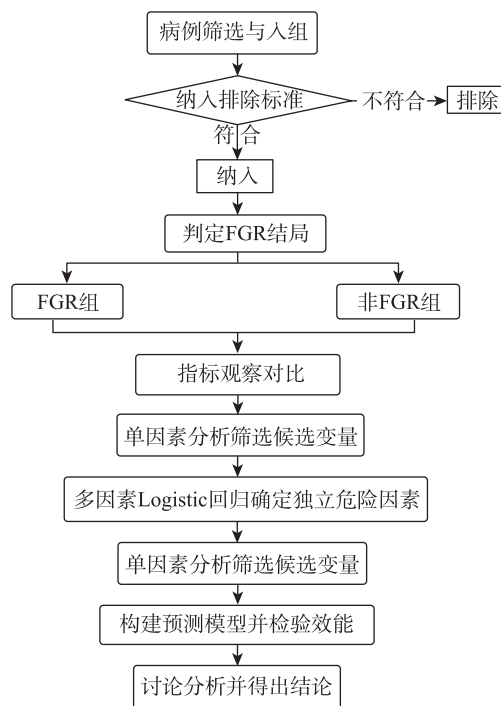


图1 研究流程图

Fig.1 Research flowchart

整体研究围绕“风险识别—模型构建—模型评估”展开,旨在实现对GDM合并PCOS孕妇FGR发生风险的定量预测。

1.3 观察指标

1.3.1 主要结局指标: FGR

本研究以EFW低于同孕周第10百分位(P10)作为FGR的判定标准。根据超声测量获得胎儿的生物学参数,包括头围(Head Circumference, HC)、腹围(Abdominal Circumference, AC)和股骨长(Femur Length, FL),单位均为毫米(mm)。上述参数通过内置的Hadlock百分位参考曲线可换算为对应孕周的百分位(P值)。具体过程为将HC、AC和FL代入Hadlock公式(简化版Hadlock III): $\log_{10}(EFW)=1.326+0.0107\times HC+0.0438\times AC+0.158\times FL-0.00326\times AC\times FL$,得到EFW。将EFW值在对应孕周的胎儿生长参考标准曲线上比对,得出胎儿体重平均值(第3、10、50、90等百分位点),将胎儿EFW在图表中进行定位,确认其落于哪两

条百分位曲线之间（如第 X 百分位）。如 EFW 百分位低于第 10 百分位，则提示 FGR 发生。注：Hadlock III 适配人群为单胎妊娠，且孕周 20 ~ 40 周。

1.3.2 一般资料与妊娠相关指标

记录孕妇年龄、孕前体质量指数（Body Mass Index, BMI）、孕次、产次及孕期体质量变化。年龄资料来源于首次产检身份证信息；孕前 BMI 按照孕前体质量与身高计算；孕期增重（Gestational Weight Gain, GWG）由分娩前体质量减孕前体质量获得。

1.3.3 代谢与内分泌指标

代谢指标主要包括空腹血糖（Fasting Blood Glucose, FBG, mmol/L）及妊娠 24 ~ 28 周 75g 口服葡萄糖耐量试验（Oral Glucose Tolerance Test, OGTT）的空腹、1h 和 2h 血糖值，使用全自动生化分析仪测定。糖化血红蛋白（Glycated Hemoglobin, HbA1c）采用高效液相色谱法检测，以反映近 8 ~ 12 周平均血糖水平。同时检测空腹胰岛素（Fasting Insulin, FINS, $\mu\text{U/mL}$ ），并计算稳态模型评估胰岛素抵抗指数（Homeostasis Model Assessment-Insulin Resistance, HOMA-IR），计算公式： $\text{HOMA-IR} = (\text{FBG} \times \text{FINS}) / 22.5$ ，可用以评估胰岛素抵抗程度。

血脂指标包括总胆固醇（Total Cholesterol, TC）、甘油三酯（Triglycerides, TG）、高密度脂蛋白胆固醇（High-Density Lipoprotein Cholesterol, HDL-C）和低密度脂蛋白胆固醇（Low-Density Lipoprotein Cholesterol, LDL-C），均由全自动生化分析仪检测。内分泌相关指标包括黄体生成素（Luteinizing Hormone, LH）、促卵泡激素（Follicle-Stimulating Hormone, FSH）、雌二醇（Estradiol, E2）、总睾酮（Total Testosterone, T）和抗缪勒氏管激素（Anti-Müllerian Hormone, AMH），均于晨起空腹采血，通过电化学发光法测定。所有血样均在空腹状态下采集，于 30min 内完成离心处理。生化指标采用本院统一的全自动生化分析仪（Hitachi 7600），激素指标包括 AMH 使用电化学发光免疫分析平台（Roche Cobas e601），所有检测均由同一实验团队完成。实验室每日进

行批内质量控制，要求变异系数（Coefficient of Variation, CV） $< 5\%$ ，并使用统一试剂批号以保证检测一致性。

1.3.4 妊娠并发症情况

妊娠并发症主要包括妊娠期高血压疾病（Hypertensive Disorders of Pregnancy, HDP）、妊娠期肝内胆汁淤积症（Intrahepatic Cholestasis of Pregnancy, ICP）、羊水异常等，其中 HDP 依据两次不同时间点血压 $\geq 140/90 \text{ mmHg}$ 或伴相关临床表现确诊；ICP 通过肝功能和胆汁酸水平诊断；羊水指数（Amniotic Fluid Index, AFI）通过超声四象限法测量， $\text{AFI} < 5\text{cm}$ 诊断为羊水过少。

1.3.5 胎盘血流与胎儿生长参数

胎盘血流指标包括脐动脉搏动指数（Umbilical Artery Pulsatility Index, UAPI）、大脑中动脉搏动指数（Middle Cerebral Artery Pulsatility Index, MCA PI）及脑胎比（Cerebroplacental Ratio, CPR），用以评估胎盘血流动力学与胎儿代偿状态，但不作为 FGR 的诊断条件，仅作为潜在危险因素纳入统计分析。胎儿生长参数包括双顶径（Biparietal Diameter, BPD）、HC、AC、FL 和经 Hadlock 公式自动计算的 EFW。此类指标直接反映胎儿生长速度与发育水平，是最终 FGR 判定的关键性依据。

本研究 Doppler 超声检查均在孕晚期固定孕周窗口（34 ~ 36 周）内完成，采用统一型号超声设备（迈瑞 Resona 8，腹部凸阵探头 3.5 ~ 5.0MHz）。所有检查均严格遵循《胎儿超声多普勒技术操作指南》，保证取样角度 $\leq 30^\circ$ ，采样容积置于脐动脉或大脑中动脉（Middle Cerebral Artery, MCA）主干处，每个血流指标均取连续三个心动周期的平均值。所有超声检查由具有 5 年以上经验的高级超声技师完成，并通过双人读片机制确保测量一致性。

1.4 数据质量控制与统计学方法

本研究的数据由两名研究者分别从电子病历系统独立提取，并采用双录入方式进行交叉核对，以确保资料的准确性与完整性。对所有连续变量的取值均按照首次检测或特定孕周的标准化记录进行整理；对于异常值，结合孕期进展及临床背景进行医学判断，必要时参考重复检测结果予以

确认。研究中缺失比例小于 10% 的变量采用多重插补法 (Multiple Imputation) 进行补充, 减少潜在偏倚。

统计分析采用 SPSS 26.0 与 R 4.3.1 软件完成。计量资料经正态性检验后, 符合正态分布者以表示, 组间比较采用独立样本 t 检验; 非正态分布资料以中位数和四分位数表示, 采用 Mann-Whitney U 检验。计数资料以率或构成比表示, 分类变量采用 χ^2 检验; 当任一单元格期望频数 < 5 时, 使用 Fisher 精确检验。首先通过单因素分析筛选与 FGR 相关的候选变量 ($P<0.10$), 对统计学意义或具有临床重要性的候选变量进行共线性分析, 当方差膨胀因子 (Variance Inflation Factor, VIF) < 5 时, 可纳入多因素 Logistic 回归模型, 计算校正后的比值比 (Odds Ratio, OR) 和 95% 置信区间 (95%CI), 以确定独立危险因素。在此基础上构建 FGR 发生的风险预测模型, 模型性能通过 ROC 曲线及曲线下面积 (Area Under the Curve, AUC) 评价区分度, 计算敏感度 (Sensitivity, Se)、特异度 (Specificity, Sp)、阳性预测值 (Positive Predictive Value, PPV)、阴性预测值 (Negative Predictive Value, NPV)、阳性似然比 (Positive Likelihood Ratio, PLR) 和阴性似然比 (Negative Likelihood Ratio, NLR), 评估模型识别 FGR 的性能。通过校准曲线及 Hosmer-Lemeshow 拟合优度检验评价模型校准性。所有检验为双侧, $\alpha=0.05$ 。Bootstrap 1000 次用于内部验证, 并报告乐观校正后的 AUC、校准斜率、截距和 Brier Score。 $P<0.05$ 视为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 一般资料比较

本研究共纳入 100 例 GDM 合并 PCOS 孕妇, 其中 FGR 组 28 例 (28.0%), 非 FGR 组 72 例 (72.0%)。两组在年龄方面的差异无统计学意义 ($P>0.05$); FGR 组孕前 BMI 及 GWG 低于非 FGR 组, 差异具有统计学意义 (均 $P<0.05$)。孕次、产次在两组间差异均不显著 (均 $P>0.05$)。FGR 组与非 FGR 组一般资料比较见表 1。

表 1 FGR 组与非 FGR 组一般资料比较
Tab. 1 Comparison of general characteristics in FGR and non-FGR groups

指标	FGR 组 ($n=28$)	非 FGR 组 ($n=72$)	t 值	P 值
年龄 (岁)	30.82 \pm 4.21	31.44 \pm 4.08	0.702	0.484
孕前 BMI (kg/m ²)	24.91 \pm 3.12	26.43 \pm 3.28	2.194	0.031
GWG (kg)	9.84 \pm 3.05	11.72 \pm 3.14	2.75	0.007
孕次 (次)	1.43 \pm 0.64	1.39 \pm 0.58	0.296	0.768
产次 (次)	0.39 \pm 0.49	0.36 \pm 0.48	0.26	0.795

注: BMI 为体质量指数; GWG 为孕期增重。

2.2 代谢与内分泌指标比较

FGR 组在 FBG、OGTT 1h/2h 血糖和 HbA1c 水平方面, 均显著高于非 FGR 组 (均 $P<0.05$)。FGR 组 HOMA-IR 更高, 血脂 TG 偏高, HDL-C 偏低, 差异均具有统计学意义。同时, FGR 组 T 水平、AMH 水平均明显高于非 FGR 组 (均 $P<0.05$)。FGR 组与非 FGR 组代谢与内分泌指标比较见表 2。

表 2 FGR 组与非 FGR 组代谢与内分泌指标比较
Tab. 2 Comparison of metabolic and endocrine indicators in FGR and non-FGR groups

指标	FGR 组($n=28$)	非 FGR 组($n=72$)	t 值	P 值
FBG (mmol/L)	5.36 \pm 0.52	5.01 \pm 0.48	3.013	0.003
OGTT-1h (mmol/L)	10.82 \pm 1.26	9.94 \pm 1.18	3.284	0.001
OGTT-2h (mmol/L)	8.96 \pm 1.05	8.41 \pm 1.01	2.32	0.023
HbA1c (%)	5.92 \pm 0.48	5.63 \pm 0.44	2.728	0.008
FINS (μ U/mL)	16.91 \pm 4.32	14.73 \pm 4.01	2.436	0.017
HOMA-IR	4.04 \pm 1.22	3.28 \pm 1.08	2.938	0.004
TC (mmol/L)	5.67 \pm 0.81	5.48 \pm 0.74	1.129	0.262
TG (mmol/L)	2.92 \pm 0.68	2.51 \pm 0.63	2.963	0.004
HDL-C (mmol/L)	1.13 \pm 0.22	1.26 \pm 0.24	2.417	0.017
LDL-C (mmol/L)	3.46 \pm 0.56	3.32 \pm 0.48	1.225	0.223
LH (IU/L)	5.89 \pm 1.61	5.42 \pm 1.48	1.349	0.181
FSH (IU/L)	5.77 \pm 1.38	5.63 \pm 1.32	0.468	0.641
E2 (pg/mL)	237.18 \pm 41.22	228.56 \pm 38.74	0.986	0.327
T (ng/mL)	0.82 \pm 0.17	0.73 \pm 0.14	2.379	0.019
AMH (ng/mL)	7.98 \pm 2.13	6.34 \pm 1.92	3.517	0.001

注: FBG 为空腹血糖; OGTT 为口服葡萄糖耐量试验; HbA1c 为糖化血红蛋白; FINS 为空腹胰岛素; HOMA-IR 为胰岛素抵抗指数; TC 为总胆固醇; TG 为甘油三酯; HDL-C 为高密度脂蛋白胆固醇; LDL-C 为低密度脂蛋白胆固醇; LH 为黄体生成素; FSH 为促卵泡激素; E2 为雌二醇; T 为总睾酮; AMH 为抗缪勒氏管激素。

2.3 妊娠并发症比较

FGR 组妊娠并发症总发生率显著高于非 FGR 组 ($P<0.05$)。具体来看, FGR 组 HDP 和羊水过

少发生率明显升高（均 $P < 0.05$ ），提示胎盘灌注障碍可能是该人群发生 FGR 的重要因素。ICP 发生率及剖宫产率在两组间差异不显著（均 $P > 0.05$ ）。

早产发生率在 FGR 组更高，差异具有统计学意义（ $P < 0.05$ ）。FGR 组与非 FGR 组妊娠并发症比较见表 3。

表 3 FGR 组与非 FGR 组妊娠并发症比较
Tab. 3 Comparison of pregnancy complications in FGR and non-FGR groups

组别	并发症总发生率	HDP	ICP	羊水过少(AFI<5cm)	早产(<37周)	剖宫产率
FGR 组($n=28$)	17 (60.71%)	9 (32.14%)	3 (10.71%)	7 (25.00%)	8 (28.57%)	18 (64.29%)
非 FGR 组($n=72$)	25 (34.72%)	9 (12.50%)	4 (5.56%)	6 (8.33%)	9 (12.50%)	38 (52.78%)
χ^2 值	5.069	4.927	—	4.77	3.928	1.014
P 值	0.024	0.026	0.139	0.029	0.048	0.314

注：①HDP为妊娠期高血压疾病；ICP为妊娠期肝内胆汁淤积症；AFI为羊水指数。②当期期望频数<5时（如ICP），使用 Fisher 确切检验。

2.4 胎盘血流与胎儿生长指标比较

FGR 组的胎盘血流参数明显异常，其中 UAPI 显著升高，CPR 显著降低，MCA PI 亦呈下降趋势（均 $P < 0.05$ ）。胎儿生长指标方面，FGR 组 BPD、AC、EFW 均显著低于非 FGR 组（均 $P < 0.05$ ）。FGR 组与非 FGR 组胎盘血流与胎儿生长指标比较见表 4。

表 4 FGR 组与非 FGR 组胎盘血流与胎儿生长指标比较
Tab.4 Comparison of placental blood flow and fetal growth indicators in FGR and non-FGR groups

指标	FGR 组($n=28$)	非 FGR 组($n=72$)	t 值	P 值
UAPI	1.32±0.18	1.12±0.15	5.007	0.001
MCA PI	1.43±0.22	1.57±0.24	2.663	0.009
CPR (MCA PI/UAPI)	1.10±0.21	1.42±0.26	6.16	0.001
BPD (mm)	79.42±3.58	82.16±3.74	3.421	0.001
AC (mm)	264.71±12.32	279.36±14.05	4.891	0.001
FL (mm)	62.18±3.14	63.52±3.21	1.854	0.067
EFW (g)	2143.57±202.44	2476.38±218.63	6.172	0.001

注：UAPI为脐动脉搏动指数；MCA PI为大脑中动脉搏动指数；CPR为脑胎比；BPD为双顶径；AC为腹围；FL为股骨长；EFW为胎儿估计体重。

2.5 单因素分析

将候选临床变量纳入单因素 Logistic 回归分析后发现：孕前 BMI 偏低、GWG 不足、FBG 升高、OGTT 1h/2h 升高、HbA1c 升高、HOMA-IR 升高、TG 增高、HDL-C 降低、T 升高、AMH 升高均与 FGR 发生显著相关（均 $P < 0.05$ ）。胎盘血流指标中 UAPI 升高、CPR 降低是较强的危险因素，而 MCA PI 降低亦有显著关联。此外，HDP、羊水过少及早产均为 FGR 的关联因素。年龄、孕次、产次、

TC、LDL-C、LH、FSH、E2 等因素与 FGR 无显著相关性（均 $P > 0.05$ ）。单因素 Logistic 回归分析结果见表 5。

表 5 单因素 Logistic 回归分析结果
Tab. 5 Results of the univariate Logistic regression analysis

变量	OR	95% CI	P 值
年龄 (岁)	0.972	0.897 ~ 1.054	0.487
孕前 BMI (kg/m^2)	0.889	0.804 ~ 0.982	0.021
GWG (kg)	0.847	0.744 ~ 0.965	0.013
FBG (mmol/L)	1.982	1.217 ~ 3.228	0.006
OGTT-1h (mmol/L)	1.426	1.133 ~ 1.794	0.002
OGTT-2h (mmol/L)	1.315	1.034 ~ 1.672	0.025
HbA1c (%)	2.447	1.248 ~ 4.795	0.009
HOMA-IR	1.524	1.119 ~ 2.079	0.008
TG (mmol/L)	1.983	1.216 ~ 3.236	0.005
HDL-C (mmol/L)	0.268	0.089 ~ 0.801	0.019
T (ng/mL)	3.482	1.232 ~ 9.837	0.018
AMH (ng/mL)	1.368	1.141 ~ 1.641	0.001
HDP	3.367	1.213 ~ 9.347	0.019
ICP	2.053	0.463 ~ 9.113	0.337
羊水过少	3.733	1.167 ~ 11.945	0.027
早产 (<37 周)	2.836	1.029 ~ 7.817	0.044
UAPI	8.214	2.923 ~ 23.084	<0.001
MCA PI	0.273	0.099 ~ 0.751	0.012
CPR	0.058	0.015 ~ 0.223	<0.001
EFW (g)	0.995	0.992~0.998	0.002

注：在单因素 Logistic 回归分析中，OR>1 表示危险因素，OR<1 表示保护因素； $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2.6 多因素分析

2.6.1 共线性分析

共线性结果显示，GWG、HOMA-IR、AMH、UAPI 和 CPR 不存在共线性，VIF<5，表明上述变

量可纳入多因素 Logistic 回归模型（见表 6）。

表 6 共线性分析
Tab. 6 Collinearity analysis

因素	VIF 值	容忍度（Tolerance）
GWG（kg）	4.815	0.208
HOMA-IR	2.399	0.417
AMH（ng/mL）	4.732	0.211
UAPI	2.685	0.372
CPR	3.266	0.306

注：VIF=方差膨胀系数。容忍度=1/VIF，当容忍度>0.2时，认为共线性可接受。

表 7 多因素 Logistic 回归分析结果
Tab. 7 Results of the multivariate Logistic regression analysis

变量	变量取值 / 单位	回归系数（β）	标准误（S.E.）	Wald 值	P 值	OR	95% CI
GWG	连续变量，kg	-0.138	0.371	7.445	0.039	0.871	0.765~0.993
HOMA-IR	连续变量	0.352	0.324	6.319	0.037	1.421	1.021~1.979
AMH	连续变量，ng/mL	0.234	0.219	8.071	0.015	1.263	1.046~1.525
UAPI	连续变量	1.584	0.465	5.329	0.005	4.873	1.632~14.556
CPR	连续变量	-2.188	0.381	6.975	0.002	0.112	0.029~0.435
常量	—	-3.782	0.533	0.579	0.421	—	—

注：① 在多因素 Logistic 回归分析中，OR>1 为危险因素，OR<1 为保护因素；P<0.05 为差异具有统计学意义。② 对“分娩孕周”进行敏感性分析后，其在模型中的调整效果不显著（P=0.241），且纳入孕周后 GWG 的效应仍保持一致（OR=0.882，95% CI：0.779~0.998），方向稳定，提示 GWG 与 FGR 关系的稳健性未受分娩孕周混杂因素实质性改变。

2.6.3 预测模型参数

本研究的最终预测模型基于多因素 Logistic 回归，参数包括 GWG、HOMA-IR、AMH、UAPI 和 CPR。模型的线性预测方程为 $\text{logit}(P) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{GWG}(\text{kg}) + \beta_2 \cdot \text{HOMA-IR} + \beta_3 \cdot \text{AMH}(\text{ng/mL}) + \beta_4 \cdot \text{UAPI} + \beta_5 \cdot \text{CPR}$ ，其中 β_0 为截距（Intercept）， β_i （ $i=1, 2, 3, 4, 5$ ）为对应自变量系数（见表 7）。该方程可直接嵌入电子病历系统（EMR）或产科信息系统，用于计算个体化 FGR 发生概率。本研究估计： β_0 （Intercept）=-3.782， β_1 =-0.138， β_2 =0.352， β_3 =0.234， β_4 =1.584， β_5 =-2.188。该截距经过对模型整体预测概率的重新校准，使得模型在样本内预测的平均风险与真实发生率保持一致。示例计算（含四舍五入规则），某孕妇（示例）：GWG=10.0kg，HOMA-IR=3.50，AMH=7.00ng/mL，UAPI=1.20，CPR=1.30，则 $P = 1 / (1 + e^{\{-\text{logit}(P)\}}) \approx 0.038$ 。计算过程四舍五入规则：均四舍五入至三位小数。在本假设模型下，预测该

2.6.2 多因素 Logistic 回归分析

将上述候选变量 GWG、HOMA-IR、AMH、UAPI 和 CPR 作为自变量，FGR 发生与否作为因变量（0= 不发生，1= 发生），进行多因素 Logistic 回归分析。结果显示：GWG、HOMA-IR、AMH、UAPI 和 CPR 是影响 FGR 发生的独立危险因素（均 $P<0.05$ ）。其中，UAPI 升高和 CPR 降低的效应最为显著，提示胎盘灌注受限在 FGR 形成中具有关键作用。孕前 BMI、HbA1c、TG 等在多因素调整后未进入最终回归模型。多因素 Logistic 回归分析结果见表 7。

孕妇的 FGR 发生风险约为 3.8%。

2.7 模型性能评估

采用 ROC 曲线评价模型的区分能力。结果显示，该模型的 AUC 为 0.892（95% CI：0.823~0.961），具有较高的辨别效率。在最佳截断点处（基于 Youden 指数最大化），模型 Se 为 82.1%，Sp 为 84.7%，PPV 为 67.6%，NPV 为 92.4%，PLR 为 5.37，NLR 为 0.21，提示该模型在排除低风险人群方面表现更优。为便于临床应用，本研究进一步给出基于最佳阈值的混淆矩阵（ $n=100$ ），汇报真阳性（True Positive，TP）、真阴性（True Negative，TN）、假阳性（False Positive，FP）和假阴性（False Negative，FN）例数。基于上述结果，该模型能够较好地区分高危与低危孕妇，特别是在识别非 FGR 个体方面具有较高的阴性预测能力。模型 2×2 混淆矩阵表及 ROC 曲线见表 8、图 2。

Bootstrap 抽样得到的模型乐观值（Optimism）较小，校正后结果如下：AUC=0.874，校准斜率=0.943，

表 8 2×2 混淆矩阵表
Tab. 8 2×2 confusion matrix table

	TP	TN
FP	23	11
FN	5	61

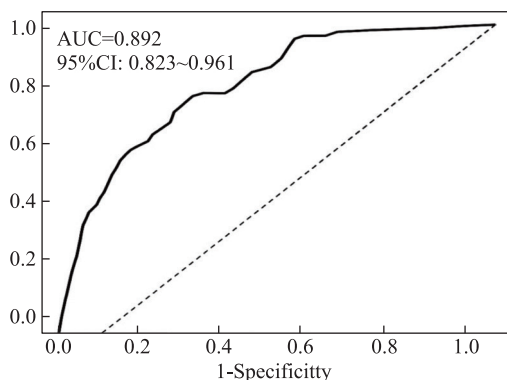


图 2 ROC 曲线图
Fig. 2 ROC curve plot

校准截距 = -0.028, Brier score (校正后) = 0.134。结果提示模型不存在明显过拟合, Bootstrap 校正前后 AUC 与校准指标变化幅度极小。通过绘制校准曲线并进行 Hosmer-Lemeshow 拟合优度检验可评估模型的校准能力。校准曲线显示预测概率与实际发生概率高度一致, Hosmer-Lemeshow 检验 $P=0.421$, 无统计学差异, 表明模型具有良好的拟合度。校准曲线见图 3。

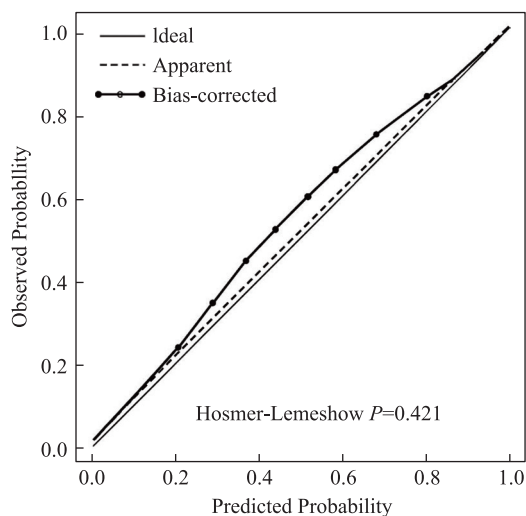


图 3 校准曲线图
Fig. 3 Calibration curve plot

3 讨论

FGR 发生往往源于多因素的交互作用, 包括母

体代谢状态、胎盘灌注能力及胎儿自身生长潜能等方面的改变^[4]。对同时患有 GDM 与 PCOS 的孕妇而言, 孕期代谢需求与内分泌调节的负荷进一步加重, 使得这一人群在妊娠过程中呈现出更加复杂的代谢-激素-血流动力学适应模式^[5]。近年来, 多项研究提示胎盘功能障碍可能在这些患者的妊娠结局中扮演核心角色, 而代谢性与内分泌性异常则可能通过影响胎盘微循环、营养供应及血管重塑过程而促进胎儿宫内生长受限^[6]。然而, 不同危险因素之间如何相互作用, 以及哪些指标在多重病理背景下最具预测价值, 仍缺乏系统性阐述。

本研究以 2022—2025 年在本院管理的 100 例 GDM 合并 PCOS 孕妇为对象, 分析 FGR 发生的相关危险因素, 并基于代谢、内分泌与胎盘血流特征构建了预测模型。结果显示, GWG 速率不足、HOMA-IR 升高、AMH 升高、UAPI 升高和 CPR 降低是 FGR 发生的独立影响因素, 提示代谢代偿不良、内分泌紊乱和胎盘灌注障碍可能在 FGR 发生中形成共同的病理链条。本研究发现 FGR 组孕期增重 GWG 速率显著不足, 提示营养摄入或能量分配异常可能导致胎儿生长潜力受限。既往研究^[7]同样指出, GWG 不足与胎盘重量下降、脐血流阻力增加密切相关。本研究结果与之相符, 进一步支持应重视 GDM 合并 PCOS 人群的孕期营养管理。代谢异常在本研究中表现突出。FGR 组呈现更高的 FBG、OGTT 值及 HbA1c 水平, 说明血糖波动与胎儿营养供应密切相关。HOMA-IR 升高提示胰岛素抵抗驱动的代谢压力可能影响胎盘葡萄糖转运效率, 最终使胎儿能量摄取受限。已有研究^[8]指出, GDM 与 PCOS 的组合可产生叠加效应, 使孕期代谢负荷进一步加重。本研究结果从胎盘功能和胎儿生长角度验证了这一观点。AMH 升高在多因素模型中仍具有显著效应, 提示 PCOS 内分泌特征不仅反映卵巢储备, 更可能与孕期胎盘内环境相关。高 AMH 常伴随卵巢-胎盘轴激素失衡, 影响滋养细胞增殖、血管生成及胎盘形成。胎盘血流方面, 本研究提示 UAPI 升高与 CPR 降低均为强效的危险因素。UAPI 升高反映胎盘阻力增加, CPR 降低提示胎儿发生“脑保护效应”, 二者均指向胎盘灌注不

良与胎儿代偿性血流分配。本研究在人群中再次证实胎盘功能在 FGR 发生中的核心地位。基于上述多因素结果,本研究构建的预测模型具有较好的性能。预测模型 AUC 达到 0.892,区分度优秀;校准曲线显示预测值与实际发生率高度一致,说明本模型不仅统计表现良好,也具备实际临床应用价值,适用于 GDM 合并 PCOS 高危孕妇的孕晚期风险分层管理。

本研究存在一些局限性:作为单中心研究,样本量较小,可能影响研究结论的外推性。未来研究将联合多中心研究,纳入更多样本量,以提高论证强度。本模型是基于晚孕测量的同期预测,主要用于末期风险分层管理;对早孕/中孕的外推仍需前瞻性验证。此外,本研究采用的是基于美国人群构建的 Hadlock 胎儿体重百分位曲线,而非中国本土化参考标准。在不同种族/地区人群间,胎儿体格发育存在一定差异,采用外源性标准可能导致 EFW 百分位存在轻度系统性偏差,从而对 FGR 判定及部分统计效应产生影响。尽管该偏差在本研究的内部比较中影响有限,但在跨地区或不同人群的外推应用时仍需谨慎,未来仍需引入本土化胎儿生长曲线进行验证。

综上,本研究揭示了 GDM 合并 PCOS 孕妇中 FGR 发生的关键危险因素,并构建了一个基于代谢、内分泌及胎盘血流特征的预测模型,可为临床高危孕妇的孕晚期风险识别、管理策略优化及围产结局改善提供参考依据。

参考文献

- [1] 孙博,周斌,王冠嘉,等.血栓弹力图联合超声定量参数对胎儿生长受限的诊断效能研究[J].*南京医科大学学报(自然科学版)*, 2024, 44(8): 1126-1133.
SUN Bo, ZHOU Bin, WANG Guanjia, *et al.* Diagnostic efficacy of thromboelastography combined with quantitative ultrasound parameters for fetal growth restriction[J]. *Journal of Nanjing Medical University (Natural Sciences)*, 2024, 44(8): 1126-1133.
- [2] 顾耀耀,虞晓迪.妊娠期糖尿病胎儿超声参数 Z-评分及脐动脉血流动力学指标对妊娠结局的预测价值[J].*蚌埠医学院学报*, 2024, 49(12): 1642-1646.
GU Yaoyao, YU Xiaodi. Predictive value of fetal ultrasonic parameters Z-score and umbilical artery hemodynamics indexes for pregnancy outcomes of gestational diabetes mellitus[J]. *Journal of Bengbu Medical College*, 2024, 49(12): 1642-1646.
- [3] 卢永军,赵志玲,焦钰洁,等.多囊卵巢综合征 337 例发生妊娠期糖尿病的高危因素分析[J].*安徽医药*, 2023, 27(6): 1188-1191.
LU Yongjun, ZHAO Zhiling, JIAO Yujie, *et al.* Analysis of high-risk factors for gestational diabetes in 337 cases of polycystic ovary syndrome[J]. *Anhui Medical and Pharmaceutical Journal*, 2023, 27(6): 1188-1191.
- [4] 吴雪辉,陆欢,杨智玲,等.胎儿宫内生长受限彩超血流动力学变化及不良妊娠结局预测模型构建[J].*中国妇产科临床杂志*, 2024, 25(5): 453-456.
WU Xuehui, LU Huan, YANG Zhiling, *et al.* Construction of ultrasound hemodynamic changes and adverse pregnancy outcome prediction model for fetal intrauterine growth restriction[J]. *Chinese Journal of Clinical Obstetrics and Gynecology*, 2024, 25(5): 453-456.
- [5] 蒋晓阳,陈海霞,曾紫伊.多囊卵巢综合征患者发生妊娠期糖尿病的危险因素及胰岛素抵抗血脂水平对妊娠期糖尿病的预测价值[J].*中国妇幼保健*, 2025, 40(1): 62-65.
JIANG Xiaoyang, CHEN Haixia, ZENG Ziyi. Risk factors for diabetes in pregnancy in patients with polycystic ovary syndrome and the predictive value of insulin resistance and blood lipid levels on diabetes in pregnancy[J]. *Maternal and Child Health Care of China*, 2025, 40(1): 62-65.
- [6] 杨坤,刘英超,刘艳会.妊娠期糖尿病患者中内质网应激标志物与胎盘功能障碍的相关性研究[J].*湖南师范大学学报(医学版)*, 2024, 21(3): 120-125.
YANG Kun, LIU Yingchao, LIU Yanhui. Correlation between ER stress markers and placental dysfunction in patients with gestational diabetes[J]. *Journal of Hunan Normal University (Medical Sciences)*, 2024, 21(3): 120-125.
- [7] 张一曼.孕前 BMI、孕期增重及妊娠期糖尿病对婴幼儿体格发育影响的队列研究[D].唐山:华北理工大学, 2024.
ZHANG Yiman. Cohort study on the influence of BMI before pregnancy, weight gain during pregnancy and diabetes during pregnancy on the physical development of infants[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2024.
- [8] 孙聪聪,蒋鹏.多囊卵巢综合征患者发生妊娠期糖尿病危险因素分析[J].*中国现代医生*, 2020, 58(4): 57-59.
SUN Congcong, JIANG Peng. Analysis of risk factors for diabetes in pregnancy in patients with polycystic ovary syndrome[J]. *China Modern Doctor*, 2020, 58(4): 57-59.