

Prenatal ultrasound radiomics features combined with clinical indicators for predicting outcomes of fetuses with congenital pulmonary malformation

LI Jingxuan¹, SU Xiaoting², HE Ying³, YU Dongmei², WANG Qianqian², ZHANG Nan²,
SUN Xinrui¹, ZHONG Wencheng¹, LIU Meixin^{1*}

(1. Department of Echocardiography, 2. Department of Obstetrics, the Affiliated Hospital of Qingdao University, Qingdao 266003, China; 3. Department of Obstetrical Ultrasound, Qingdao Women and Children's Hospital, Qingdao 266003, China)

[Abstract] **Objective** To explore the value of prenatal ultrasound radiomics features combined with clinical indicators for predicting outcomes of fetuses with congenital pulmonary malformation (CPM). **Methods** A total of 100 fetuses with CPM detected with prenatally ultrasound and confirmed after birth were retrospectively collected and randomly divided into training set ($n=71$) and test set ($n=29$) at the ratio of 7 : 3. Multivariable logistic regression (LR) analysis was performed on clinical indicators in training set to identify independent clinical predictors of outcomes of fetuses with CPM and construct a clinical model. Radiomics features were extracted from targeted prenatal grayscale ultrasound images of CPM in training set, and the optimal radiomics features most relevant to outcomes of fetuses with CPM were selected using least absolute shrinkage and selection operator (LASSO) regression. Radiomics score (Radscore) was calculated, and then a radiomics model was established. Finally a combined model was built based on the independent clinical predictors and Radscore. Receiver operating characteristic (ROC) curves were plotted, and the area under the curve (AUC) was calculated to evaluate the predictive performance of models. **Results** Congenital pulmonary airway malformation volume ratio (CVR) was the independent predictor of outcomes of fetuses with CPM. Twelve optimal radiomics features were selected as the optimal radiomics features. AUC of clinical model, radiomics model and combined model for predicting outcomes of fetuses with CPM in test set was 0.728, 0.770 and 0.809, respectively. **Conclusion** Prenatal ultrasound radiomics features combined with clinical indicators could be used to effectively predict outcomes of fetuses with CPM.

[Keywords] cystic adenomatoid malformation of lung, congenital; bronchopulmonary sequestration; ultrasonography, prenatal; radiomics; nomograms

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2026.01.019

产前超声影像组学特征联合临床指标预测先天性肺畸形胎儿结局

李晶莹¹, 苏晓婷², 何英³, 于冬梅², 王谦谦², 张楠², 孙心蕊¹, 钟文成¹, 刘美新^{1*}

(1. 青岛大学附属医院心脏超声科, 2. 产科, 山东 青岛 266003; 3. 青岛市妇女儿童医院产科超声科, 山东 青岛 266003)

[摘要] **目的** 观察基于产前超声影像组学特征联合临床指标预测先天性肺畸形(CPM)胎儿结局的价值。**方法** 回顾性纳入产前超声发现并于出生后确诊 CPM 的 100 胎胎儿, 按 7 : 3 比例划分训练集($n=71$)与测试集($n=29$)。采用多

[第一作者] 李晶莹(2000—), 女, 山东德州人, 在读硕士。研究方向: 产前超声。E-mail: lijingxuan1@qdu.edu.cn

[通信作者] 刘美新, 青岛大学附属医院心脏超声科, 266003。E-mail: liumeixin@qduhospital.cn

[收稿日期] 2025-09-09 [修回日期] 2026-01-09

因素逻辑回归(LR)分析训练集临床指标,筛选预测 CPM 胎儿结局的临床独立因子并构建临床模型;基于训练集针对性产前超声灰阶图像提取 CPM 影像组学特征,将经最小绝对收缩和选择算子(LASSO)回归筛选获得与 CPM 胎儿结局最为相关的影像组学特征视为最优特征,据以计算影像组学评分(Radscore),并基于 Radscore 建立影像组学模型。利用临床独立预测因子及 Radscore 构建联合模型;绘制受试者工作特征(ROC)曲线,计算曲线下面积(AUC),评估其预测效能。**结果** 先天性肺气道畸形体积比(CVR)为 CPM 胎儿结局的独立预测因子。经 LASSO 回归筛选得到 12 个最优影像组学特征。临床模型、影像组学模型及联合模型预测测试集 CPM 胎儿结局的 AUC 分别为 0.728、0.770 及 0.809。**结论** 产前超声影像组学特征联合临床指标能有效预测 CPM 胎儿结局。

【关键词】 肺囊性腺瘤样畸形,先天性;支气管肺隔离症;超声检查,产前;影像组学;列线图

【中图分类号】 R714.53; R445.1 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1003-3289(2026)01-0094-05

先天性肺畸形(congenital pulmonary malformation, CPM)指气道、肺组织及肺血管结构在胚胎发育过程中出现解剖学异常,主要包括先天性囊性腺瘤样畸形(congenital cystic adenomatoid malformation, CCAM)和肺隔离症(pulmonary sequestration, PS)^[1]。CPM 多由产前超声检出^[1]、出生后经胸部 CT 血管成像确诊^[2];合并纵隔移位、胎儿水肿及其他肺外畸形常致结局不良^[3-4]。先天性肺气道畸形体积比(congenital pulmonary airway malformation volume ratio, CVR)是预测 CPM 胎儿结局的关键指标,目前多基于 $CVR \geq 1.6$ 判断胎儿水肿风险大及不良结局^[5-6],但可能存在高估。本研究观察基于产前超声影像组学特征联合临床指标预测 CPM 胎儿结局的价值。

1 资料与方法

1.1 研究对象 回顾性纳入 2013 年 1 月—2023 年 6 月青岛大学附属医院和青岛市妇女儿童医院 100 胎 CPM 胎儿,确诊时孕周 21~32 周、平均(27.10±3.80)周;孕妇年龄 27~34 岁、平均(30.5±4.5)岁。纳入标准:①接受产前超声检查,并经引产后尸体解剖或出生后 CT 或术后病理学确诊;②产前超声灰阶图像完整显示 CPM;③临床资料完整。排除标准:①失访;②因其他因素终止妊娠,或胎儿伴其他先天性畸形。本研究经过医院伦理委员会许可(QYFY WZLL 29886、QFELL-YJ-2025-54);接受产前超声检查前孕妇均签署知情同意书。

根据胎儿结局划分不良预后组($n=43$)与良好预后组($n=57$)。以胎死宫内、出生后需要呼

吸支持或死亡^[7]、出生后 2 年内因慢性肺病(出生后需氧依赖 ≥ 28 天^[8])需接受手术治疗且术后需长期呼吸支持为预后不良;以出生前末次超声检查未检出肺畸形病灶^[9],或残留肺畸形病灶但出生后新生儿无症状且于生后 2 年内未出现并发症为良好预后。按 7:3 比例随机划分训练集($n=71$)与测试集($n=29$)。

1.2 仪器与方法 由 2 名具有 7 年及以上产前超声经验的超声科主治医师(医师 1、2)采用 GE Voluson E8、E10 型彩色多普勒超声诊断仪、频率 1.0~5.0 MHz 的 C1-5 型腹部凸阵探头进行针对性产前超声检查。嘱孕妇仰卧,以连续多切面扫查胎儿胸腔,存储清晰显示肺内病灶最大切面的灰阶图像;评估病灶特征并计算 CVR: $CVR = (\text{病灶长} \times \text{宽} \times \text{高} \times 0.52) / \text{头围}(\text{单位:cm})$ ^[10]。由 1 名具有 10 年以上产前超声经验的超声科副主任医师(医师 3)对结果进行复核。

1.3 提取影像组学特征 将原始灰阶产前超声图像导入 ITK-SNAP 软件,由 1 名具有 5 年以上产前超声经验的超声科主治医师(医师 4)手动勾画病灶 ROI,使之覆盖胸腔内实性高回声或囊实性混合肿块(图 1);由 1

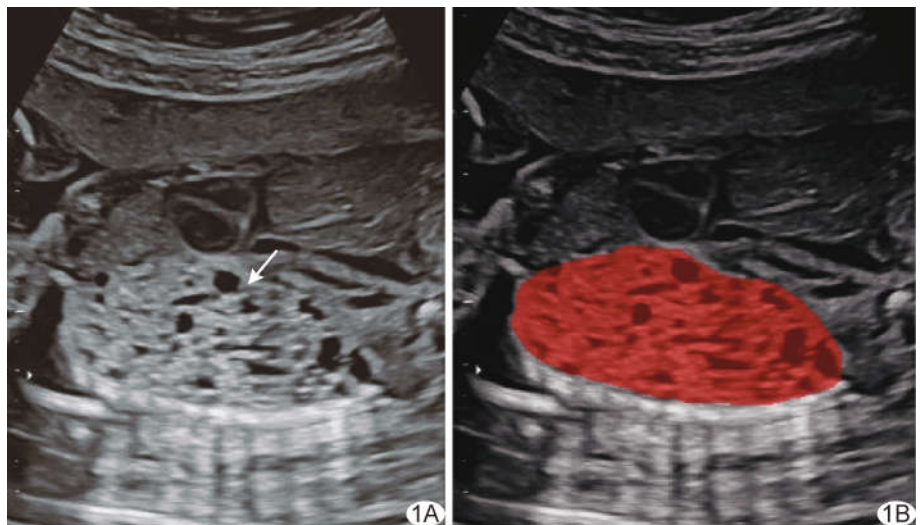


图 1 不良预后组胎儿,孕 20 周,II 型 CPM A. 产前超声灰阶图示胎儿左侧胸腔内 54 mm×36 mm×25 mm 囊实性团块(箭), $CVR=1.40$; B. 勾画病灶 ROI(红色区域)

名具有 10 年以上产前超声经验的产前超声科主任医师(医师 5)对 ROI 进行审核及校正。以 Z-score 进行归一化处理,采用排序技术将每幅图像灰度值范围限制在 5%~95% 区间,以 3 次插值法将体素间距统一为 $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ 。利用 Python Pyradiomics 工具包提取 CPM 影像组学特征。

1.4 筛选影像组学特征 在提取的影像组学特征中保留组内相关系数(intra-class correlation coefficient, ICC) >0.80 者。基于最大相关最小冗余(maximum relevance minimum redundancy, mRMR)算法进行初步筛选,以最小绝对收缩和选择算子(least absolute shrinkage and selection operator, LASSO)算法及 10 折交叉验证进行降维(图 2);以最小二项式偏差条件选择超参数 λ 值,以与 CPM 胎儿结局最为相关的影像组学特征为最优特征并计算影像组学评分(radiomics score, Radscore)。

1.5 构建模型及统计学分析 采用 SPSS 27.0、R 4.2.2 统计分析软件。符合正态分布的计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,组间行独立样本 t 检验。在训练集中,采用多因素逻辑回归(logistic regression, LR)分析,以胎儿结局为因变量(良好预后组赋值 1,不良预后组赋值 0),筛选 CPM 胎儿结局的临床独立预测因子并构建临床模型;采用单因素 LR 基于 Radscore 建立影像组学模型;基于临床独立预测因子及 Radscore 建立联合模型并绘制列线图。绘制受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线,计算曲线下面积(area under the curve, AUC),评估各模型在测试集的预测效能;以决策曲线分析(decision curve analysis, DCA)评价模型临床净收益。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 所获模型

2.1.1 临床模型 不良预后组 CPM 胎儿 CVR 高于良好预后组($P < 0.05$)。以孕妇年龄、孕周及 CVR 为自变量行多因素 LR 分析,结果显示 CVR 为 CPM 胎

儿结局的独立预测因子[OR(95% CI)=0.303(0.101, 0.907), $P=0.033$]。

2.1.2 影像组学模型 经 10 折交叉验证下 LASSO 回归(图 2)筛选得到 12 个最优影像组学特征(表 1),据此计算 Radscore 并建立影像组学模型。

2.1.3 联合模型 基于 CVR 及 Radscore 构建联合模型,其列线图见图 3。

2.2 评价模型 临床模型、影像组学模型及联合模型预测测试集 CPM 胎儿结局的 AUC 分别为 0.728、0.770 及 0.809,见表 2 及图 4;DCA 表明,在 0.58~0.76 以及 0.81 以上范围内,联合模型可比单一模型带来更大临床净收益,见图 5。

3 讨论

CPM 通常经产前超声发现,其病程具有异质性^[10],存在自愈、出现轻度并发症及重度并发症等诸多可能^[11];CPM 合并胎儿水肿、心脏、肾脏及膈肌病变多预后不良^[12];产前超声诊断与评估对于预测 CPM 预后及临床干预具有重要意义。

目前临床多以 CVR 作为评估 CPM 胎儿预后的关键指标,低 CVR 提示预后相对良好,但部分 $\text{CVR} < 1.0$

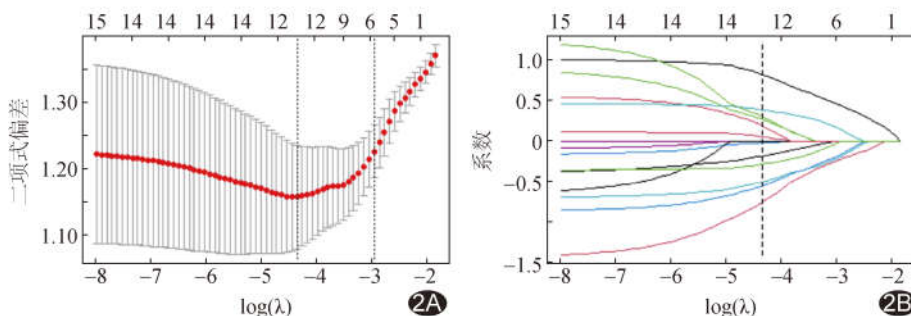


图 2 以 LASSO 算法筛选与 CPM 胎儿结局最为相关的影像组学特征 A. 10 折交叉验证下 LASSO 回归超参数调优; B. LASSO 回归特征系数分布

表 1 与 CPM 胎儿结局最为相关的 12 个影像组学特征及其权重

特征	权重
log_sigma_3_0_mm_3D_firstorder_Maximum	-0.757
wavelet_LH_glszm_LargeAreaLowGrayLevelEmphasis	-0.517
log_sigma_3_0_mm_3D_firstorder_Kurtosis	-0.500
wavelet_HH_firstorder_Median	-0.259
wavelet_LL_glszm_LargeAreaLowGrayLevelEmphasis	-0.217
wavelet_LH_glrml_ShortRunLowGrayLevelEmphasis	-0.003
wavelet_HH_firstorder_Skewness	0.008
wavelet_LL_glrml_LongRunHighGrayLevelEmphasis	0.224
log_sigma_3_0_mm_3D_glcml_ClusterProminence	0.256
log_sigma_3_0_mm_3D_firstorder_Mean	0.287
wavelet_HH_glszm_GrayLevelVariance	0.379
original_firstorder_Minimum	0.813

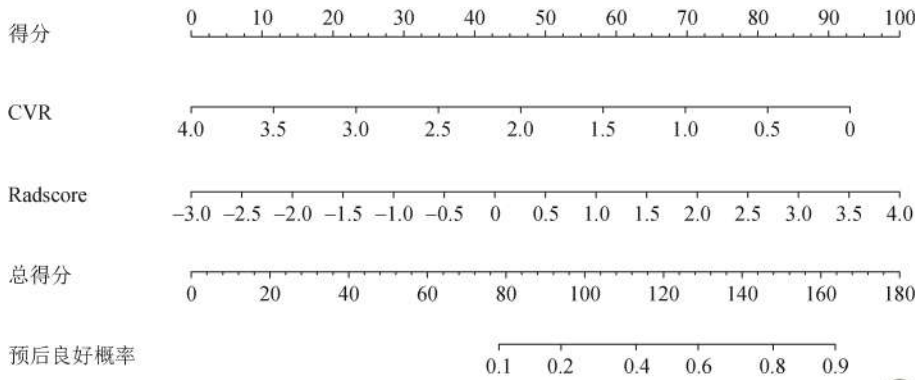


图 3 预测 CPM 胎儿结局联合模型的列线图

表 2 各模型对测试集的预测效能

模型	AUC(95%CI)	敏感度(%)	特异度(%)	准确率(%)
临床模型	0.728(0.530,0.926)	88.20	58.30	75.90
影像组学模型	0.770(0.588,0.951)	82.40	66.70	75.90
联合模型	0.809(0.644,0.974)	70.60	83.30	75.90

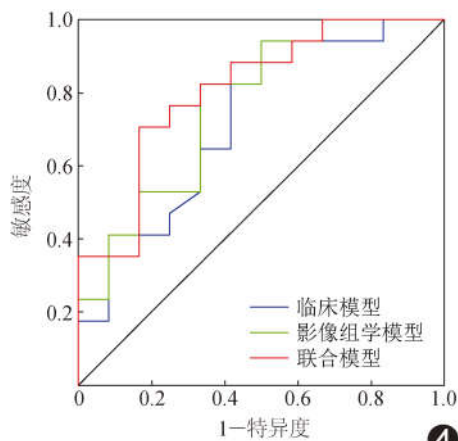


图 4 各模型预测测试集 CPM 胎儿结局的 ROC 曲线

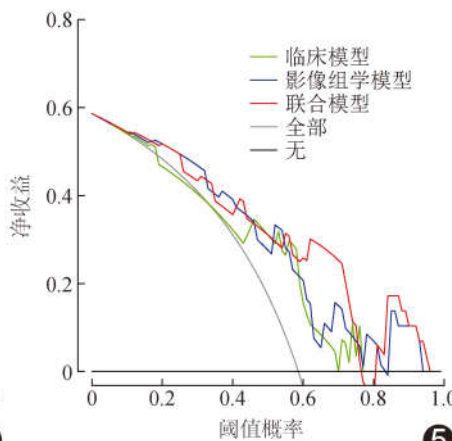


图 5 各模型预测测试集 CPM 胎儿结局的 DCA 图

胎儿出生后仍因呼吸系统疾病而需手术干预^[4],提示高估预后可能错失最佳干预时机;临床亟需寻找能更准确预测预后的工具。

本研究结果显示,CVR 是 CPM 胎儿结局的独立预测因子,且低 CVR 胎儿预后良好可能性更大;基于 CVR 构建的 LR 模型预测测试集 CPM 胎儿结局的 AUC 为 0.728。本研究通过影像组学分析得到 12 个与 CPM 胎儿结局最为相关的特征,以基于 LASSO 回归计算得到的 Radscore 预测测试集 CPM 胎儿结局的 AUC 为 0.770;进一步以 LR 算法基于 CVR 及 Radscore 构建的联合模型预测测试集 CPM 胎儿结局的 AUC 为 0.809,表明联合模型具有良好的整体分类

判别能力,或有助于及时转诊“高风险”胎儿并做好出生后复苏准备。

综上,产前超声影像组学特征联合临床指标可用于预测 CPM 胎儿结局。本研究的主要局限性:①样本量有限,所获模型存在过拟合风险,有待进一步验证其稳健性;②未设立外部测试集;③未能统一产前超声检查设备,且操作者主观因素可能影响 CPM 影像组学特征的稳定性;④手工勾画 ROI 效率低且可能存在误差;有待后续利用自动或半自动图像分割技术提升全流程可重复性,并通过开展前瞻性、多中心、大样本研究验证模型的泛化能力。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:李晶萱查阅文献、研究实施、数据和统计分析、撰写文章;苏晓婷图像分析、指导、审阅文章;何英和于冬梅图像处理和统计;王谦谦图像处理、统计分析;张楠图像处理、修改文章;孙心蕊和钟文成统计分析、修改文章;刘美新研究设计、指导、审阅文章。

[参考文献]

[1] 田猛,朱先存,骆云洁,等. 产前超声诊断先天性肺畸形[J]. 中国医学影像技术, 2020, 36(12):1915-1917.

[2] PEDERIVA F, ROTHENBERG S S, HALL N, et al. Congenital lung malformations[J]. Nat Rev Dis Primers, 2023, 9(1):60.

[3] FABIETTI I, NOVAK A, VALFRÈ L, et al. Key ultrasound predictors in the prenatal assessment of congenital pulmonary airway malformation: A single-center experience [J]. Front Pediatr, 2025, 13:1555539.

[4] AN P, XIAO X, ZHAO Y, et al. Prenatal ultrasound measurements of mild congenital pulmonary airway malformation and long-term prognosis: A retrospective cohort study[J]. Int J Gynaecol Obstet, 2022, 157(2):327-332.

[5] ZHU P, CHENG K, HE M, et al. Diagnostic value of congenital pulmonary airway malformation volume ratio for fetal hydrops due to congenital lung malformations: A systematic review and meta-analysis[J]. Orphanet J Rare Dis, 2022, 17(1):213.

[6] ROLO L C, RIBEIRO G D, CALDAS J V J, et al. Perinatal outcomes of prenatal diagnosis of congenital pulmonary airway malformation: An experience[J]. Rev Assoc Med Bras (1992), 2022, 68(11):1582-1586.

[7] 德文洁, 胡蓉, 周慧丽, 等. 心脏纵隔移位角用于预测肺部肿块胎儿围产期不良结局 [J]. 中国医学影像技术, 2022, 38(8): 1218-1222.

[8] PETERS N C J, HIJKOOP A, HERMELIJN S M, et al. Prediction of postnatal outcome in fetuses with congenital lung malformation: 2-year follow-up study [J]. Ultrasound Obstet Gynecol, 2021, 58(3):428-438.

[9] HEINRICH H, LINSKENS I H, GORTER R R, et al. Postnatal outcomes of sonographically suspected isolated congenital lung anomalies [J]. Pediatr Surg Int, 2025, 41(1):156.

[10] 胡永铭. 产前超声诊断 68 例胎儿肺部肿块及其妊娠结局分析 [J]. 广东医学, 2019, 40(S1):103-105.

[11] 俞钢. 胎儿肺发育疾病的评估和围产期风险管理 [J]. 临床小儿外科杂志, 2016, 15(2):107-109.

[12] 黄田田, 孔德明, 肖海艳, 等. 先天性肺气道畸形与支气管肺隔离症产前超声表现用于预测新生儿不良转归 [J]. 中国医学影像技术, 2024, 40(7):1062-1066.

2025 版中国科技期刊引证报告相关数据
——《中国医学影像技术》

由中国科学技术信息研究所主持的“2025 中国科技论文统计结果发布会”于 2025 年 10 月 30 日在京举行。《中国医学影像技术》杂志在《2025 版中国科技期刊引证报告(核心版)》的相关数据为：

- 1 文献来源量:387 篇;
- 2 基金论文比:0.39;
- 3 核心总被引频次:2750;
- 4 核心影响因子:1.182;
- 5 学科扩散指标:15.31;
- 6 学科影响指标:1.00;
- 7 综合评价总分:60.4。