基于机器算法子痫前期危险因素与预测模型的研究进展

李沙希 武建利[通讯作者]
新疆医科大学第一附属医院 新疆 乌鲁木齐 830000

摘 要 子痫前期是妊娠期特有的严重并发症，可进展为子痫、胎盘早剥、胎儿生长受限等不良结局，严重威胁母婴生命健康。近年来，机器学习算法凭借处理高维数据、挖掘潜在关联、动态优化模型的优势，在子痫前期危险因素筛选与预测模型构建中取得突破性进展。本文聚焦机器算法核心技术，系统梳理基于机器学习识别的子痫前期关键危险因素，总结机器学习预测模型的研发进展、性能差异与临床价值，分析当前研究现存挑战，并展望未来发展方向，为子痫前期早期筛查与精准干预提供参考。

关键词 子痫前期；危险因素；机器学习算法

Research Progress on Risk Factors and Predictive Models of Preeclampsia Based on Machine Learning Algorithms

Li Sha-xi; Wu Jian-li[Corresponding Author]
First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830000, Xinjiang Province, China

Abstract Preeclampsia is a severe pregnancy-specific complication that can progress to adverse outcomes such as eclampsia, placental abruption, and fetal growth restriction, posing a serious threat to maternal and fetal health. In recent years, machine learning algorithms, leveraging their advantages in handling high-dimensional data, uncovering latent associations, and dynamically optimizing models, have achieved breakthrough progress in the screening of risk factors for preeclampsia and the construction of predictive models. This review focuses on the core technologies of machine learning algorithms, systematically summarizes the key risk factors for preeclampsia identified by machine learning, outlines the development progress, performance differences, and clinical value of machine learning-based predictive models, analyzes existing challenges in current research, and looks forward to future development directions, providing references for early screening and precise intervention of preeclampsia.

Keywords Preeclampsia; Risk Factors; Machine Learning Algorithms

据统计，全球的子痫前期发病率为2%～8%，是导致孕产妇及围生儿死亡的主要原因之一。子痫前期可致母婴出现急性肝功异常、肾功异常、凝血功能障碍、子痫、胎盘早剥、产后出血、胎儿生长受限等严重疾病。PE分为两种亚型：早发型（EOPE：＜34周）和晚发型（LOPE：≥34周）。PE的发病机制涉及炎症、氧化应激、血管损伤和免疫调节之间的复杂相互作用[1]。目前临床中尚无针对子痫前期的有效治疗方法，综合考虑患者情况并及时终止妊娠仍为主要治疗手段。因此，实现早期诊断和及时干预对改善患者生存至关重要。由于PE影响因素众多、发病机制复杂、致病通路多样，这种多因素—多机制—多通路致病[2]的综合征发病性质导致针对患者的有效预防及治疗措施无法系统化。目前，临床管理主要依赖于产前检查和出现症状后的干预，缺乏有效的早期预警手段。传统的风险评估多基于病史和单一生物标志物，预测效能不足[3]。因此，开发高精度早期预测工具是临床的迫切需求。机器算法能够处理高维度、非线性的复杂数据，正成为构建新一代PE预测模型的核心驱动力。

1 基于机器算法识别的子痫前期关键危险因素

机器学习算法（如随机森林、极端梯度增强XGBoost、神经网络）可通过特征重要性排序、SHAP值分析等方法，从数据中筛选出传统方法难识别的高预测价值危险因素，为模型奠定基础。根据来源与类型，可将其分为以下3类。

1.1 临床常规可及性危险因素

此类因素多源于妊娠早期产检记录，易获取、成本低，是机器学习模型的基础输入变量，经算法验证后显示出显著预测价值：人口学与基础健康指标：年龄（≥35岁或＜18岁为高危）、孕前BMI、胎次（初产妇风险高于经产妇）、子痫前期家族史/个人史（既往患病者复发风险增加3～5倍）；妊娠期生理指标：

平均动脉压、子宫动脉搏动指数（反映胎盘血流阻力）。

1.2 生理生化标志物

机器学习可验证新型生化标志物的预测效能，提升模型特异性：常规血液参数：天冬氨酸转氨酶（反映肝脏受累，与疾病严重程度正相关）、尿酸（算法证实尿酸水平可独立预测严重并发症风险）；胎盘功能相关标志物：胎盘生长因子、妊娠相关血浆蛋白A。

1.3 循环分子标志物

随着液体活检技术发展，循环游离RNA、蛋白质等分子指标被纳入机器学习模型，成为精准预测的补充变量[4]。

2 传统风险因素与预测方法的局限

经典的子痫前期危险因素包括初产、高龄（≥35岁）、肥胖（BMI≥30 kg/m²）、PE病史、慢性高血压、肾病、自身免疫性疾病等。临床上曾广泛使用基于这些因素的评分系统或联合检测子宫动脉搏动指数、平均动脉压及血清胎盘生长因子。虽然这些方法有一定价值，但主要局限性在于：①静态性，多基于孕早期单点数据，无法动态反映疾病演进过程；②线性假设，大多模型基于线性关系，难以捕捉因素间复杂的交互作用；③特征维度低，无法有效整合新兴的多组生物标志物和电子记录中的海量信息。

3 基于机器算法的预测模型：核心优势与算法类型

经典机器学习：逻辑回归（常作为基线模型）、随机森林（能处理非线性，提供特征重要性）、支持向量机（在高维空间有效分类）、梯度提升机（如XGBoost，LightGBM）。在当前许多研究中表现出色，王晓明[5]研究表明，XGBoost模型表现最佳，其准确度、受试者工作曲线下面积、灵敏度、特异度、阳性预测值、阴性预测值分别为：80.8%、0.876（95%*CI*：0.828～0.924）、78.0%、82.0%、65.2%、89.6%（Plt：0.001）。深度学习：神经网络、循环神经网络（适用于时序数据，如连续血压监测）、卷积神经网络（可用于分析超声图像等医学影像）。集成学习：结合多个基础模型的结果，以提升预测的稳健性和准确性。

机器算法通过从数据中自动学习模式和规律，克服了传统方法的诸多限制。其核心优势在于以下4点。

3.1 处理高维非线性数据

可分析数十甚至上百个变量及其复杂关系。郑江元等[6]对1 609名孕妇展开回顾性研究，用13项子痫前期影响因素基于LR算法和LightGBM算法构建预测模型。

3.2 特征重要性排序

机器学习算法通过计算特征与目标的相关性、对模型准确率的提升幅度等指标，精准预测的关键特征。许兴能等[7]利用构建RF、XGB和LR模型提示，尿酸、肌酐、年龄、孕早期体重指数、尿素、甘油三酯、红细胞计数、嗜酸性粒细胞计数、总胆固醇、中性粒细胞计数、尿蛋白、丙氨酸氨基转移酶以及尿潜血是影响PE预测模型的指标。

3.3 动态预测与更新

结合纵向数据，实现随孕周更新的动态风险评估。机器学习算法不仅会用某一孕周的静态数据做一次性推测，还会随着孕周推进，持续纳入新采集的指标数据，修正风险模型参数，从而输出最新动态风险值。这种方式的优势是更贴合妊娠生理的动态变化规律，能提高早发子痫前期的预测准确性并及时调整干预方案。

3.4 亚型识别

有望区分早发型/晚发型不同PE表型。这种亚型识别能帮助临床实现精准分层管理[8]，比如针对早发型早期启动阿司匹林干预，针对晚发型强化血压控制和靶器官保护，从而改善患者预后。

4 研究进展与模型性能比较

相较于经典回归模型，机器学习算法在子痫前期预测中表现更优。其中随机森林与提升型算法表现最佳。Tiruneh等[9]研究发现子痫前期最常见的预后因素表现最佳的机器学习算法为随机森林（曲线下面积*AUC*=0.94，95%置信区间*CI* 0.91～0.96）和极端梯度提升（*AUC*=0.92，95% *CI* 0.90～0.94）。

4.1 孕早期预测

陈红波等[10]研究表示孕早期TSH、LDL-C、PDW、孕12周腰围、sFlt-1、AST等因素与子痫前期发生风险具有一定相关性，孕早期autoML模型预测子痫前期发生风险的ROC曲线下面积显著高于logistic回归模型（0.984：0.765，*P*=0.002）；autoML模型在测试集的预测准确率和灵敏度均显著高于logistic回归模型（99.54%：98.32%，93.75%：75.00%，均*P*＜0.05）。

4.2 动态与孕中期预测

有研究分析不同孕期血压变化轨迹，成功预测了后期PE的发生。如Gil等发现基于神经网络的妊娠早期子痫前期预测机器学习模型可有效筛查子痫前期，适用于不同人群。

4.3 亚型特异性预测

针对早发型（＜34周）和晚发型PE，其危险因素和生物标志物谱不同。如Paula Lafuente-Ganuza研究表明sFlt-1/PlGF

比值＜23可排除妊娠24至33+6周期间任何时间点发生的早发性子痫前期，其阴性预测值达100%。当sFlt-1/PlGF比值＞45且NT-proBNP值＞174时，显著增加早发性子痫前期发生概率。

4.4 影像与信号分析

Giuseppe Rizzo发现与单一指标相比，子宫动脉PI值与胎盘体积的联合应用可获得更优预测结果（子痫前期敏感性68.7%，需在32周前分娩的子痫前期敏感性83.3%）。初步研究尝试使用CNN自动分析子宫动脉多普勒波形或眼底图像，直接提取与PE风险相关的影像特征，展现了端到端自动化的前景。

5 结论

基于机器算法的子痫前期预测模型正在引领该领域从基于经验的传统筛查向基于数据的精准预测转变。通过整合多维度、时序性数据，这些模型显著提升了早期识别的准确性，并有望实现PE的个体化风险分层与管理。然而，从高性能模型到有效临床工具的转化之路仍充满挑战，需要产科医生、生物信息学家和公共卫生专家跨学科合作，共同解决数据、算法、验证和临床整合等问题。

参考文献

[1]BARRON A, MCCARTHY C M, O'KEEFFE G W. Preeclampsia and neurodevelopmental outcomes: potential pathogenic roles for inflammation and oxidative stress? [J]. Molecular Neurobiology,2021,58(6):2734-2756.

[2]ROLNIK D L, NICOLAIDES K H, POON L C. Prevention of preeclampsia with aspirin [J]. American Journal of Obstetrics and Gynecology, 2022,226(2S):S1108-S1119.

[3]XUE Y T, YANG N, GU X K, et al. Risk prediction model of early-onset preeclampsia based on risk factors and routine laboratory indicators[J]. Life,2023,13(8):254-259.

[4]CHIANG Y T, SEOW K M, CHEN K H. The pathophysiological, genetic, and hormonal changes in preeclampsia: a systematic review of the molecular mechanisms [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024,25(8):364-369.

[5]王晓明.列线图结合机器学习模型预测妊娠期高血压疾病进展为重度子痫前期的临床价值[D].温州:温州医科大学,2024.

[6]郑江元,祝锐,颜永杰,等.基于机器学习算法的子痫前期预测模型构建[J].解放军医学杂志,2022,47(8):802-808.

[7]许兴能,陈胜柱,周嘉怡,等.Logistic回归法和机器学习算法构建子痫前期预测模型的比较[J].中华围产医学杂志,2024,27(7):572-581.

[8]XU Y H, ZU Y Z, ZHANG Y, et al. A multi-algorithm machine learning model for predicting the risk of preterm birth in patients with early-onset preeclampsia [J].International Journal of General Medicine,2025, 18:4195-4207.

[9]TIRUNEH S A, VU T T T, ROLNIK D L, et al. Machine learning algorithms versus classical regression models in pre-eclampsia prediction: a systematic review [J]. Current Hypertension Reports,2024,26(7):309-323.

[10]陈红波,李红,赵春梅,等.自动机器学习模型预测孕早期子痫前期风险的效果[J].中华健康管理学杂志,2022,16(8):553-560.

（本文编辑 王 冬）

