

肝素结合蛋白联合D-二聚体对儿童重症支原体肺炎的早期预测价值及风险模型构建

张园园¹, 郭兴青^{2*}

¹青岛大学青岛医学院, 山东 青岛

²青岛大学附属医院儿童呼吸心血管内科, 山东 青岛

收稿日期: 2026年8月4日; 录用日期: 2026年8月27日; 发布日期: 2026年9月7日

摘要

目的: 探讨血清肝素结合蛋白(HBP)联合D-二聚体(D-dimer)对儿童重症肺炎支原体肺炎(SMPP)的早期预测价值, 并基于上述指标构建临床风险预测模型。方法: 回顾性选取2021年1月至2023年12月于青岛大学附属医院儿科住院治疗的肺炎支原体肺炎(MPP)患儿的临床资料, 依据病情分为重症组98例、非重症组214例。对比两组一般临床资料、实验室检验指标、肺部影像学结果; 采用多因素Logistic回归筛选SMPP独立危险因素; 通过受试者工作特征(ROC)曲线分析HBP、D-二聚体单独及联合的预测效能; 基于独立危险因素建立Logistic回归风险模型, 使用Hosmer-Lemeshow检验、Bootstrap重复抽样、决策曲线分析(DCA)完成模型校准、内部稳定性验证与临床获益评估。结果: 重症组患儿发热持续时间显著长于非重症组($P < 0.001$); 重症组HBP、D-二聚体、C-反应蛋白(CRP)、降钙素原(PCT)、乳酸脱氢酶(LDH)水平高于非重症组($P < 0.05$); 重症组大叶性实变、胸腔积液、支气管充气征检出占比更高($P < 0.05$)。多因素Logistic回归提示HBP升高、D-二聚体升高、LDH升高、发热持续时间延长是儿童SMPP的独立危险因素($P < 0.05$)。ROC曲线结果显示HBP、D-二聚体单独预测SMPP的曲线下面积(AUC)分别为0.786 (95% CI: 0.736~0.830)、0.810 (95% CI: 0.762~0.852), 二者联合预测AUC可达0.873 (95% CI: 0.831~0.908), 优于单一指标($P < 0.05$); 基于4项独立危险因素构建风险预测模型, 模型AUC = 0.923, Hosmer-Lemeshow检验提示模型拟合校准良好($\chi^2 = 7.124, P = 0.523$); 1000次Bootstrap内部校正后AUC为0.908; DCA分析提示模型在临床决策中具有较高的净获益。结论: HBP、D-二聚体对儿童SMPP具备较好早期筛查价值, 二者联合检测预测效能进一步提升; 依托HBP、D-二聚体、LDH、发热持续时间建立的风险预测模型稳定性佳、临床获益可观, 可用于临床早期识别重症支原体肺炎高危患儿。

关键词

肺炎支原体肺炎, 重症, 肝素结合蛋白, D-二聚体, 儿童, 风险预测模型, 早期预测

*通讯作者。

The Predictive Value of Heparin-Binding Protein Combined with D-Dimer for Early Detection of Severe *Mycoplasma pneumoniae* in Children and the Development of a Risk Model

Yuanyuan Zhang¹, Xingqing Guo^{2*}

¹Qingdao Medical College, Qingdao University, Qingdao Shandong

²Department of Pediatric Respiratory and Cardiovascular Medicine, The Affiliated Hospital of Qingdao University, Qingdao Shandong

Received: August 4, 2026; accepted: August 27, 2026; published: September 7, 2026

Abstract

Objective: To explore the early predictive value of serum heparin-binding protein (HBP) combined with D-dimer for severe *Mycoplasma pneumoniae* pneumonia (SMPP) in children, and to construct a clinical risk-prediction model based on the above-mentioned indicators. **Methods:** The clinical data of children diagnosed with *Mycoplasma pneumoniae* pneumonia (MPP) hospitalized in the Department of Pediatrics, the Affiliated Hospital of Qingdao University from January 2021 to December 2023 were retrospectively enrolled. The subjects were divided into the severe group (98 cases) and the non-severe group (214 cases) according to disease severity. General clinical data, laboratory test indicators and pulmonary imaging findings were compared between the two groups. Multivariate Logistic regression analysis was adopted to screen the independent risk factors for SMPP. The receiver-operating characteristic (ROC) curve was plotted to analyse the predictive efficiency of HBP and D-dimer when used alone and in combination. A Logistic-regression-based risk-prediction model was established on the basis of independent risk factors. The Hosmer-Lemeshow test, Bootstrap resampling and decision-curve analysis (DCA) were performed for model calibration, internal stability verification and clinical-benefit evaluation. **Results:** The duration of fever in the severe group was significantly longer than that in the non-severe group ($P < 0.001$). The levels of HBP, D-dimer, C-reactive protein (CRP), procalcitonin (PCT) and lactate dehydrogenase (LDH) in the severe group were higher than those in the non-severe group ($P < 0.05$). The detection rates of pulmonary lobar consolidation, pleural effusion and air-bronchogram sign were markedly higher in the severe group ($P < 0.05$). Multivariate Logistic regression identified elevated HBP, elevated D-dimer, elevated LDH and prolonged fever duration as independent risk factors for paediatric SMPP ($P < 0.05$). ROC-curve analysis showed that the area under the curve (AUC) of HBP and D-dimer for predicting SMPP stood at 0.786 (95% CI: 0.736~0.830) and 0.810 (95% CI: 0.762~0.852) respectively, while the combined detection yielded an AUC of 0.873 (95% CI: 0.831~0.908), which was superior to single-indicator prediction ($P < 0.05$). The risk-prediction model constructed from the four independent risk factors achieved an AUC of 0.923. The Hosmer-Lemeshow test indicated favourable model calibration ($\chi^2 = 7.124$, $P = 0.523$). The Bootstrap internal-validation with 1000 resampling cycles produced a corrected AUC of 0.908. DCA demonstrated satisfactory net clinical benefit of this model for clinical decision-making. **Conclusion:** HBP and D-dimer possess favourable early-screening value for paediatric SMPP, and combined detection can further improve the predictive efficiency. The risk-prediction model established by HBP, D-dimer, LDH and fever duration presents good stability and considerable clinical benefit, and can assist clinicians in the early identification of high-risk children with severe *Mycoplasma pneumoniae* pneumonia.

Keywords

***Mycoplasma pneumoniae* Pneumonia, Severe Cases, Heparin-Binding Protein, D-Dimer, Children, Risk Prediction Model, Early Prediction**

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. 引言

肺炎支原体(*Mycoplasma pneumoniae*, MP)是儿童社区获得性肺炎最常见的病原体之一, 且呈周期性流行趋势[1]。大多数肺炎支原体肺炎(*Mycoplasma pneumoniae pneumonia*, MPP)患儿病程呈自限性, 预后良好; 然而部分患儿病情进展迅速, 发展为重症肺炎支原体肺炎(Severe *Mycoplasma pneumoniae pneumonia*, SMPP), 严重威胁患儿生命安全[2] [3]。

SMPP 的病理损伤并非 MP 直接侵袭所致, 而主要源于机体异常免疫炎症反应及凝血功能紊乱[4]。肝素结合蛋白(Heparin-Binding Protein, HBP)的升高时间早于 C 反应蛋白(C-reactive protein, CRP)及降钙素原(Procalcitonin, PCT) [5] [6]。D-二聚体作为凝血激活与继发性纤溶亢进的特异性标志物, 其水平升高与 MPP 患儿发生坏死性肺炎、塑型性支气管炎等严重并发症密切相关[7] [8]。既往研究多聚焦于单一生物标志物的独立预测价值, HBP 与 D-二聚体联合用于儿童 SMPP 早期预测的研究尚为有限, 尽管 HBP 和 D-二聚体分别从炎症和凝血维度反映病情, 但二者在 SMPP 中的协同效应及联合预测的增量价值尚不明确[9]。鉴于此, 本研究采用回顾性研究设计, 系统评估入院早期血清 HBP 与 D-二聚体水平对儿童 SMPP 的预测效能, 并联合其他临床指标构建风险预测模型, 以期帮助临床在患儿入院 24 小时内快速完成 SMPP 高危人群风险分层, 尽早启动强化抗感染、抗炎及抗凝干预方案, 为优化儿童重症支原体肺炎早期诊疗决策提供循证依据。

2. 资料与方法

2.1. 研究对象

采用回顾性研究设计, 收集 2021 年 1 月至 2023 年 12 月于青岛大学附属医院儿科住院治疗的 MPP 患儿临床资料。纳入标准: ① 年龄 1~14 岁; ② 符合《儿童社区获得性肺炎诊疗规范(2019 年版)》中 MPP 的诊断标准[10], 即具有典型临床表现, 同时血清 MP 特异性 IgM 抗体阳性(滴度 $\geq 1:160$)和/或咽拭子 MP-DNA 核酸检测阳性; ③ 入院 24 h 内完成血清 HBP、D-二聚体及相关实验室检查; ④ 临床资料完整。排除标准: ① 合并其他病原体(细菌、病毒、真菌等)混合感染者; ② 既往存在先天性心脏病、免疫缺陷病、血液系统疾病、慢性肺部疾病等基础疾病者; ③ 入院前 48 h 内已接受糖皮质激素或免疫调节治疗者; ④ 临床资料不完整者。本研究已通过我院伦理委员会审查(伦理批号: QYFYWZLL29325), 因采用回顾性研究设计, 豁免知情同意。依据《儿童社区获得性肺炎诊疗规范》中重症肺炎的诊断标准, 根据患儿本次住院治疗全程内病情达到的最严重状态, 将患儿分为重症组(98 例)与非重症组(214 例)。

2.2. 资料收集

本研究用于分组的病情结局为住院全程最严重状态, 检测的入院 24 h 内实验室指标为患儿病情恶化前的早期基线数据, 用于探索早期指标对后续进展为 SMPP 的预测效能。收集两组患儿以下临床资料:

① 一般资料: 性别、年龄、体重、发热持续时间(定义为患儿首次出现体温 $\geq 37.5^{\circ}\text{C}$ (腋温)至入院时的日历天数, 若为间歇性发热, 以首次发热至入院的总天数计, 不扣除退热间歇期); ② 实验室指标: 入院 24 h 内首次晨起外周静脉血检测结果, 包括血清 HBP 水平、D-二聚体、白细胞计数(White Blood Cell Count, WBC)、中性粒细胞百分比(Neutrophil Percentage, NEUT%)、淋巴细胞计数(Lymphocyte, LYM)、CRP、PCT、乳酸脱氢酶(Lactate Dehydrogenase, LDH)、白蛋白(Albumin, ALB)、丙氨酸氨基转移酶(Alanine Aminotransferase, ALT)、血小板计数(Platelet, PLT); ③ 影像学资料: 胸部 X 线或 CT 检查结果, 重点记录是否存在大叶性实变、胸腔积液及支气管充气征; ④ 临床转归: 住院天数。影像学资料以入院后 48 h 内首次胸部影像学检查结果为准, 由两名放射科主治医师独立判读, 意见不一致时经讨论协商一致后确定。

2.3. 检测方法

血清 HBP 采用酶联免疫吸附法(Enzyme-Linked Immunosorbent Assay, ELISA)检测, 试剂盒购自瑞典 Axis-Shield 公司, 严格按照说明书操作; D-二聚体采用免疫比浊法检测, D-二聚体参考值范围为 $<0.5 \text{ mg/L FEU}$; CRP 采用免疫散射比浊法检测; PCT 采用电化学发光法检测; LDH、ALB、ALT 等生化指标采用全自动生化分析仪检测。所有检测均由我院检验科完成。

2.4. 统计学方法

采用 SPSS 26.0 及 R 4.3.0 软件进行统计分析。计量资料经 Shapiro-Wilk 检验评估正态性, 符合正态分布者以均数 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm s$)表示, 组间比较采用独立样本 t 检验; 非正态分布者以中位数(四分位数间距) [M (P25, P75)]表示, 组间比较采用 Mann-Whitney U 检验。计数资料以频数及百分比表示, 组间比较采用 χ^2 检验。先对所有自变量开展方差膨胀因子(VIF)检验, 以 $\text{VIF} < 5$ 为判定标准, 剔除存在严重多重共线性的变量; 随后采用单因素及多因素 Logistic 回归分析, 将单因素分析中($P < 0.05$)的变量纳入多因素 Logistic 回归分析(逐步向前法), 筛选儿童 SMPP 发生的独立危险因素, 以此为基础构建风险预测模型。绘制受试者工作特征(ROC)曲线, 计算曲线下面积(AUC)、最佳截断值、敏感度及特异度, 采用 DeLong 法比较各指标 AUC 的差异。采用 Hosmer-Lemeshow 检验评估模型拟合优度, Bootstrap 法(重复抽样 1000 次)进行内部验证, 决策曲线分析(DCA)评估模型临床净获益。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

3. 结果

3.1. 一般资料比较

本研究共纳入 MPP 住院患儿 312 例, 其中重症组 98 例, 非重症组 214 例。重症组患儿发热持续时间高于非重症组, 差异具有统计学意义(均 $P < 0.001$)。详见表 1。

Table 1. Comparison of general information between two groups of children

表 1. 两组患儿一般资料比较

指标	重症组(n = 98)	非重症组(n = 214)	$\chi^2/t/Z$	P
性别(男/女, 例)	55/43	118/96	0.026	0.871
年龄(岁, $\bar{x} \pm s$)	6.84 ± 2.31	6.52 ± 2.18	1.156	0.125
体重(kg, $\bar{x} \pm s$)	25.36 ± 8.42	24.17 ± 7.85	1.183	0.119
发热持续时间(d, M (P25, P75))	8.0 (6.0, 11.0)	5.0 (4.0, 7.0)	4.927	<0.001
住院天数(d, M (P25, P75))	12.0 (9.0, 16.0)	7.0 (5.0, 9.0)	1.632	0.103

3.2. 两组实验室指标比较

与非重症组相比, 重症组患儿血清 HBP、D-二聚体、CRP、PCT、LDH 水平均显著升高, 差异均具有统计学意义(均 $P < 0.05$)。两组 WBC、NEUT%、ALB、PLT、ALT 比较差异无统计学意义(均 $P > 0.05$)。详见表 2。

Table 2. Comparison of laboratory indicators between two groups of pediatric patients
表 2. 两组患儿实验室指标比较

指标	重症组(n = 98)	非重症组(n = 214)	Z/t	P
HBP (ng/mL, M (P25, P75))	85.6 (52.3, 136.7)	28.4 (18.6, 42.5)	6.135	<0.001
D-二聚体(mg/L, M (P25, P75))	2.84 (1.52, 4.63)	0.74 (0.42, 1.23)	7.268	<0.001
CRP (mg/L, M (P25, P75))	68.5 (42.3, 98.7)	24.6 (12.3, 45.8)	6.892	<0.001
PCT (ng/mL, M (P25, P75))	1.24 (0.62, 2.87)	0.38 (0.18, 0.76)	6.741	<0.001
LDH (U/L, $\bar{x} \pm s$)	486.3 $\pm$ 142.7	298.5 $\pm$ 86.4	12.056	<0.001
WBC ($\times 10^9/L$, $\bar{x} \pm s$)	11.84 $\pm$ 4.36	11.52 $\pm$ 3.18	0.652	0.258
NEUT% (% , $\bar{x} \pm s$)	78.6 $\pm$ 9.3	77.4 $\pm$ 10.7	1.008	0.157
ALB (g/L, $\bar{x} \pm s$)	37.8 $\pm$ 4.8	38.6 $\pm$ 3.9	1.446	0.075
PLT ($\times 10^9/L$, $\bar{x} \pm s$)	286.4 $\pm$ 98.3	274.8 $\pm$ 86.5	1.004	0.159
ALT (U/L, M (P25, P75))	32.6 (18.4, 56.8)	28.4 (16.2, 48.6)	1.327	0.186

3.3. 两组影像学特征比较

重症组患儿大叶性实变、胸腔积液及支气管充气征的发生率均显著高于非重症组(均 $P < 0.05$)。详见表 3。

Table 3. Comparison of imaging features between two groups of children [Example (%)]
表 3. 两组患儿影像学特征比较[例(%)]

影像学特征	重症组(n = 98)	非重症组(n = 214)	χ^2	P 值
大叶性实变	49 (50.0)	68 (31.8)	9.525	0.002
胸腔积液	28 (28.6)	32 (15.0)	8.026	0.005
支气管充气征	46 (46.9)	74 (34.6)	4.338	0.037

3.4. 儿童 SMPP 独立危险因素的多因素 Logistic 回归分析

以是否发生 SMPP 为因变量(重症 = 1, 非重症 = 0), 赋值: 发生 SMPP(重症) = 1, 未发生 SMPP(非重症普通 MPP) = 0; 各自变量赋值规则: HBP 升高、D-二聚体升高、LDH 升高均赋值为 1, 正常为 0; 发热持续时间延长为连续型自变量纳入模型。将单因素分析中 $P < 0.05$ 的变量纳入多因素 Logistic 回归分析。结果显示, HBP 升高、D-二聚体升高、LDH 升高及发热持续时间延长为儿童 SMPP 发生的独立危险因素(均 $P < 0.05$), 见表 4。

3.5. HBP 与 D-二聚体的早期预测效能分析

ROC 曲线分析结果显示, HBP 单独预测 SMPP 的 AUC 为 0.786, D-二聚体单独预测的 AUC 为 0.810,

二者联合预测的 AUC 为 0.873, 显著优于两者单独预测(DeLong 法, 均 $P < 0.05$)。见表 5、图 1。

Table 4. Multivariate logistic regression analysis of independent risk factors for SMPP in children

表 4. 儿童 SMPP 独立危险因素的多因素 Logistic 回归分析

变量	β	SE	Wald χ^2	OR	95% CI	P
HBP 升高	0.011	0.004	5.734	1.011	1.002~1.019	0.017
D-二聚体升高	0.294	0.079	13.789	1.342	1.149~1.567	<0.001
LDH 升高	0.014	0.002	36.808	1.015	1.010~1.019	<0.001
大叶性实变	0.345	0.496	0.483	1.412	0.534~3.734	0.487
发热持续时间延长	1.091	0.174	39.069	2.976	2.114~4.190	<0.001
常量	-15.154	1.865	65.998			<0.001

Table 5. ROC curve analysis of predicting SMPP in children using various indicators

表 5. 各指标预测儿童 SMPP 的 ROC 曲线分析

指标	AUC	95% CI	截断值	敏感度(%)	特异度(%)	P 值
HBP	0.786	0.736~0.830	57.83 ng/mL	71.43	78.50	<0.001
D-二聚体	0.810	0.762~0.852	1.15 mg/L	79.59	69.16	<0.001
二者联合	0.873	0.831~0.908	—	82.65	82.24	<0.001

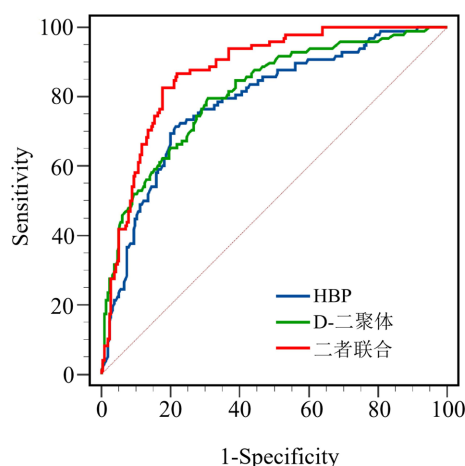


Figure 1. ROC curve analysis

图 1. ROC 曲线分析

3.6. 风险预测模型的构建与验证

基于多因素 Logistic 回归分析结果, 以 HBP、D-二聚体、LDH 及发热持续时间为预测变量构建综合风险预测模型, 模型公式如下: $\ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = -15.154 + 0.011 \times \text{XHBP} + 0.294 \times \text{XD-dimer} + 0.014 \times \text{XLDH} + 1.091 \times \text{X发热}$, 其中 P 为发生 SMPP 的预测概率。模型 AUC 为 0.923 (95% CI: 0.882~0.952), Hosmer-Lemeshow 拟合优度检验显示模型校准良好($\chi^2 = 7.124$, $P = 0.523$)。Bootstrap 法内部验证(重复抽样 1000 次)校正后 AUC 为 0.908, 提示模型具有良好的稳定性。DCA 分析结果显示, 当阈值概率在

0.10~0.85 范围内时, 综合风险模型的临床净获益均优于单纯 HBP 或 D-二聚体预测, 提示该模型具有良好的临床应用价值。见图 2。

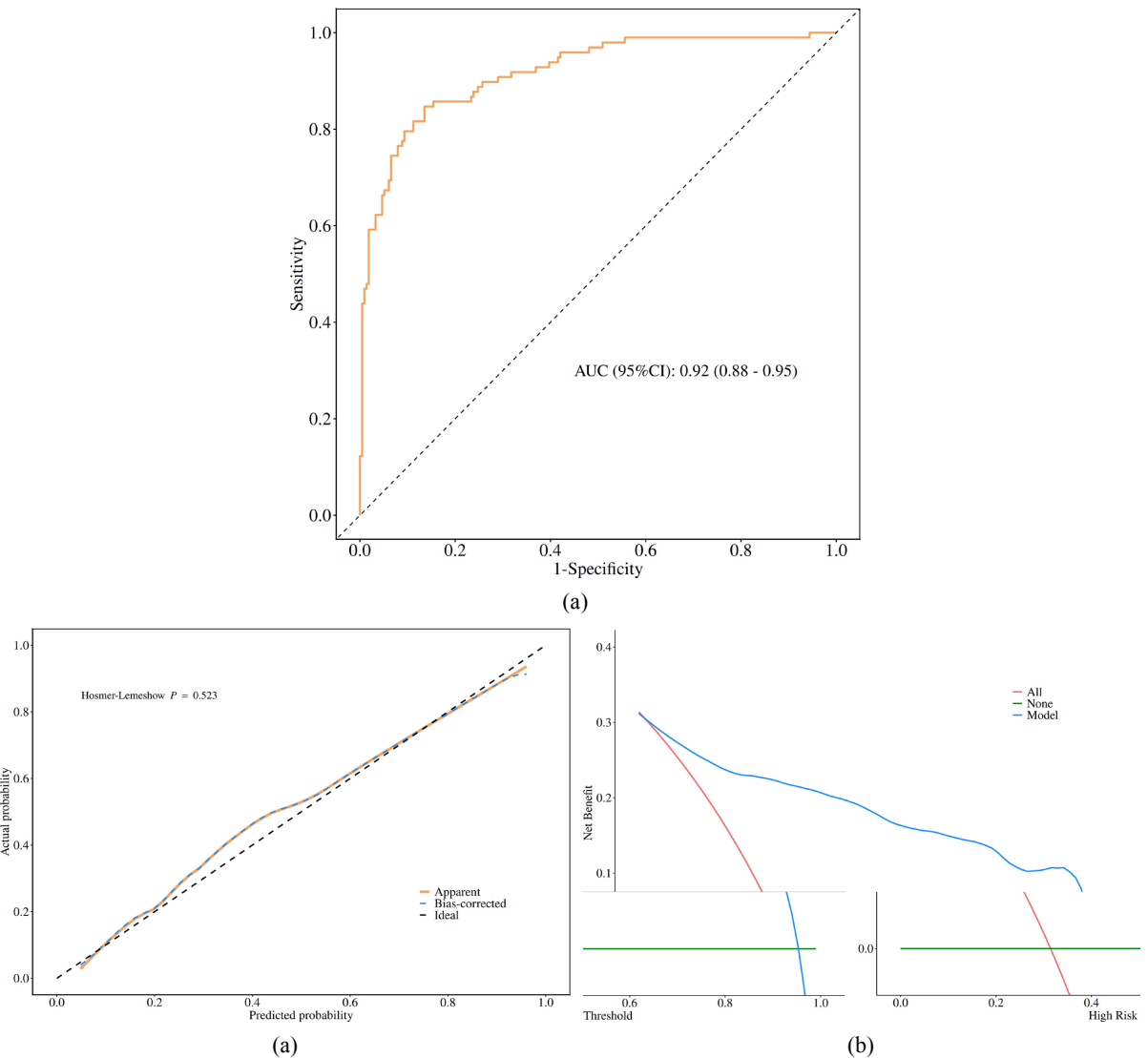


Figure 2. Construction and validation of risk prediction model
图 2. 风险预测模型的构建与验证

4. 讨论

本研究通过回顾性分析 312 例 MPP 住院患儿的临床资料, 探索了血清 HBP 与 D-二聚体对儿童 SMPP 的早期预测关联, 并构建了综合风险预测模型。结果显示, HBP 与 D-二聚体在 SMPP 患儿入院早期即显著升高, 两者联合预测效能优于单一指标, 基于多维度指标构建的综合风险模型具有良好的区分度与校准度, 初步提示该联合策略可能有助于临床早期识别 SMPP 高危患儿。

MP 感染后机体的病理损伤机制较为复杂, 目前认为过度激活的免疫炎症反应是导致 SMPP 发生的核心机制[11]。MP 感染可触发 1 型辅助性 T 淋巴细胞/2 型辅助性 T 淋巴细胞免疫失衡, 诱导大量炎性细胞因子释放, 引发肺组织广泛炎性损伤[12]。与此同时, MP 表面的脂蛋白成分可通过 Toll 样受体信号通

路激活中性粒细胞,使其大量聚集于肺组织并释放多种炎性介质,进一步加重局部炎症损伤[13]。本研究结果显示,重症组患儿 WBC、Neu、CRP 及 PCT 水平均显著高于非重症组,提示重症患儿存在更为强烈的系统性炎症反应,与上述机制相符。

本研究发现,HBP 水平升高与儿童 SMPP 的发生呈独立正相关,其单独预测 SMPP 的 AUC 达 0.786,最佳截断值为 57.83 ng/mL。HBP 是一种主要储存于中性粒细胞嗜天青颗粒及分泌小泡中的阳离子蛋白,在病原微生物感染激活中性粒细胞后数分钟至数小时内即可大量释放入血,其升高时间窗显著早于 CRP 及 PCT [14]。HBP 的致病机制主要体现在以下几个方面:其一,HBP 可通过与内皮细胞表面硫酸乙酰肝素蛋白聚糖结合,诱导内皮细胞肌动蛋白重构,显著增加血管通透性,促进炎性渗出及肺水肿形成;其二,HBP 具有强效的趋化活性,可募集单核细胞及巨噬细胞至炎症部位,进一步放大大局部炎症反应;其三,HBP 可直接诱导促炎细胞因子的释放,形成炎症级联放大效应,加速肺组织损伤进程[15][16]。既往研究表明,HBP 在脓毒症相关器官功能障碍的早期预测中具有较高价值,Wei 等[17]报道 HBP 预测脓毒症的 AUC 可达 0.73,与本研究结果相近。在儿童感染性疾病领域,近年来亦有研究证实 HBP 对儿童细菌性肺炎及脓毒症具有良好的早期识别价值[5][18]。本研究进一步将 HBP 应用于 MP 感染所致重症肺炎的预测,拓展了 HBP 在儿童感染性疾病中的应用范围,提示 HBP 可能是儿童 SMPP 早期预警的有效生物标志物。

在本研究发现中 D-二聚体升高与 SMPP 风险增加相关,单独预测 AUC 为 0.810。凝血功能紊乱在 SMPP 的发病机制中扮演重要角色。MP 感染激活的炎症反应可通过多种途径干扰凝血-纤溶平衡:一方面,炎性细胞因子可上调组织因子表达,启动外源性凝血途径,导致纤维蛋白大量生成;另一方面,炎症状态下纤溶酶原激活物抑制剂-1 (PAI-1)表达增加,纤溶活性受到抑制,最终导致微血栓形成及 D-二聚体水平显著升高[19][20]。既往研究显示,D-二聚体升高与 MPP 患儿发生塑型性支气管炎、坏死性肺炎等严重并发症密切相关。刘洪波等[21]研究表明,D-二聚体 $> 1.37 \text{ mg/L}$ 对预测患儿发生 MPP 的敏感度达 71.4%,特异度为 82.1%,与本研究所得截断值及预测效能接近。本研究进一步支持了 D-二聚体作为 SMPP 关联预测因子的证据链,提示对入院早期 D-二聚体水平升高的 MPP 患儿应高度警惕病情进展风险,必要时尽早启动抗凝治疗评估。

值得关注的是,本研究发现 HBP 联合 D-二聚体的预测效能($\text{AUC} = 0.873$)显著优于两者单独预测。HBP 主要反映中性粒细胞激活程度及炎症反应强度,而 D-二聚体则特异性反映凝血激活与纤溶亢进状态,两者分别代表 SMPP 病理过程中炎症与凝血两个相互关联但又相对独立的维度。将两种机制不同的生物标志物联合应用,可从多角度综合评估患儿的病理状态,从而实现更为全面的风险评估,这一互补效应是联合预测效能提升的重要原因。LDH 作为细胞损伤的非特异性标志物,其水平升高反映了肺组织细胞的广泛坏死与损伤。本研究中 LDH 升高被确定为 SMPP 的独立关联因素。有研究表明,LDH $> 400.5 \text{ U/L}$ 是 MPP 患儿发生肺实变的重要预警指标[22],本研究结果进一步支持 LDH 在 SMPP 病情评估中的潜在应用价值。此外,本研究构建的综合风险预测模型经 Hosmer-Lemeshow 检验证实拟合良好,Bootstrap 内部验证后 AUC 为 0.923,模型稳定性较好。DCA 分析进一步显示,在较宽的阈值概率范围内(0.10~0.85),综合模型的临床净获益均优于单一指标,提示该模型在本次研究队列中具有切实的潜在应用价值。与现有的儿童肺炎严重程度评分工具(如儿童早期预警评分、改良儿童早期预警评分等)相比,本模型纳入了反映早期炎症激活与凝血功能紊乱的特异性生物标志物,在识别 MPP 重症化高危患儿方面显示出一定的临床优势潜力。

本研究尚存在以下局限性:1) 本研究为单中心回顾性研究,样本量相对有限,研究结论的外推性有待多中心、大样本前瞻性研究进一步验证;2) 本研究仅进行了内部验证,缺乏外部验证队列,模型的普适性尚需在不同地区、不同医疗中心的患儿群体中加以评估;3) 本研究未能纳入细胞因子(如白细胞介

素-6、白细胞介素-18)等新型炎症标志物, 未来研究可进一步探索多种生物标志物联合应用的预测价值;
4) 受回顾性研究设计限制, 部分临床指标可能存在选择偏倚, 研究结果的解读需结合临床实际情况审慎考量。

综上所述, 血清 HBP 与 D-二聚体在儿童 SMPP 早期即显著升高, 两者联合检测较单一指标具有更优的预测效能。基于 HBP、D-二聚体、LDH 及发热持续时间构建的综合风险预测模型具有良好的区分度、校准度与临床净获益, 可为临床医师早期识别 SMPP 高危患儿、及时调整诊疗策略提供参考依据。

基金项目

湖北陈孝平科技发展基金项目(省级项目)、项目名称: 槐杞黄通过 IL-6/STAT3 信号通路改善支气管哮喘患儿 Th17/Treg 细胞失衡状态临床研究; 项目编号: CXPJJH121002-202110。

参考文献

- [1] Gao, L. and Sun, Y. (2024) Laboratory Diagnosis and Treatment of *Mycoplasma pneumoniae* Infection in Children: A Review. *Annals of Medicine*, **56**, Article ID: 2386636. <https://doi.org/10.1080/07853890.2024.2386636>
- [2] Wang, F., Wang, Y.W., Wang, J.Y., Wang, L., He, W., Wang, Q., et al. (2026) Impact of Pathogen Co-Detection on Disease Severity and Clinical Outcomes in Children with *Mycoplasma pneumoniae* Pneumonia. *World Journal of Pediatrics*, **22**, 536-545. <https://doi.org/10.1007/s12519-026-01053-2>
- [3] Zeng, Z., Li, G., Xu, Y., Dong, N., Zhu, D., Yin, R., et al. (2026) Development of a Prediction Model for Severe Pediatric *Mycoplasma pneumoniae* Pneumonia: A Single-Center Retrospective Study. *Infection and Drug Resistance*, **19**, 1-16. <https://doi.org/10.2147/idr.s593932>
- [4] Huang, Y., Fan, Y., Zhao, L., Tang, W., Zhang, L. and Li, G. (2026) The Expression and Clinical Value of miR-222-3p in Children with *Mycoplasma pneumoniae* Pneumonia. *Translational Pediatrics*, **15**, 18-18. <https://doi.org/10.21037/tp-2025-1-880>
- [5] Li, Y.R., Zhang, C.L., Wu, Y., et al. (2026) [Association between Heparin-Binding Protein and Other Clinical Indicators with the Microscopic Severity of *Mycoplasma pneumoniae* Pneumonia]. *Chinese Journal of Contemporary Pediatrics*, **28**, 708-714. (In Chinese)
- [6] Fang, Z., Cui, S., Liu, X., Shi, M., Zheng, W., Xue, J., et al. (2026) The Value of NLRP, PCT, and HBP for Sepsis-Associated Acute Kidney Injury and the Effect of Anti-Inflammatory Drugs. *Medicine*, **105**, e47654. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000047654>
- [7] 齐翠, 赵尚飞. 血清白细胞介素-6、血浆 D-二聚体和血清铁蛋白在儿童肺炎支原体肺炎病情评估中的价值[J]. 浙江医学, 2026, 48(7): 736-739, 745.
- [8] 穆权振, 刘玲玲, 王学英. D 二聚体是儿童重症肺炎支原体肺炎的危险因素和预测因子[J]. 罕少疾病杂志, 2026, 33(1): 76-79.
- [9] 林萌, 熊丽君, 方琼, 等. 肝素结合蛋白、D-二聚体检测在儿童细菌性肺炎中的应用价值[J]. 福建医药杂志, 2025, 47(9): 5-9.
- [10] 中华人民共和国国家健康委员会, 国家中医药局. 儿童社区获得性肺炎诊疗规范(2019 年版) [J]. 中华临床感染病杂志, 2019, 12(1): 6-13.
- [11] 钟海琴, 曾泽宇, 顾浩翔, 等. 重症肺炎支原体肺炎耐药与敏感患儿免疫炎症指标比较及临床意义[J]. 临床肺科杂志, 2026, 31(1): 1-6.
- [12] Li, X., Ma, Y., Cao, S., Wu, W. and Liu, L. (2026) Research Progress on the Mechanisms of Mucus Retention after *Mycoplasma pneumoniae* Infection. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, **16**, Article 1751803. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2026.1751803>
- [13] 赵彬, 谢丽丽, 王静静, 等. TLR4、IL-35、CRP/ALB 在支气管哮喘合并 MP 患儿中的变化及对重度气道反应性的影响[J]. 转化医学杂志, 2026, 15(2): 276-280.
- [14] Cao, P., Zhang, S., Huang, J. and Dai, W. (2026) Diagnostic and Prognostic Value of Serum HBP Combined with PCT, CRP, and SAA in Early-Stage Pneumonia. *Virology Journal*, **23**, Article No. 55. <https://doi.org/10.1186/s12985-026-03078-5>
- [15] Funamizu, N., Ito, C., Sakamoto, A., Kamei, Y. and Umeda, Y. (2026) Frailty in Hepatobiliary and Pancreatic (HBP)

- Surgery: A Narrative Review toward an HBP-Specific, Implementation-Oriented Framework. *Gland Surgery*, **15**, 146-146. <https://doi.org/10.21037/gs-2026-1-0138>
- [16] Fisher, J., Kahn, F., Wiebe, E., Gustafsson, P., Kander, T., Mellhammar, L., *et al.* (2021) The Dynamics of Circulating Heparin-Binding Protein: Implications for Its Use as a Biomarker. *Journal of Innate Immunity*, **14**, 447-460. <https://doi.org/10.1159/000521064>
- [17] Wei, Z., YuSuPu, M., Wang, X., Meng, Y., Zhang, C., Xue, X., *et al.* (2025) The Accuracy of Heparin-Binding Protein and Interleukin-6 in Predicting Prognosis of Severe Pneumonia with Sepsis Patients. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, **15**, Article 1554214. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2025.1554214>
- [18] Yang, X., Pu, X., Xu, Y., Zhao, J., Fang, X., Cui, J., *et al.* (2025) A Novel Prognosis Evaluation Indicator of Patients with Sepsis Created by Integrating Six Microfluidic-Based Neutrophil Chemotactic Migration Parameters. *Talanta*, **281**, Article ID: 126801. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.126801>
- [19] 曾涛, 徐雅琴, 周雄. 乙酰半胱氨酸联合阿奇霉素对支原体肺炎所致反复呼吸道感染患者诱导痰液炎性细胞因子及免疫球蛋白的影响[J]. 吉林医学, 2025, 46(6): 1395-1397.
- [20] 颜鲁伟, 尹姣姣, 杨虹, 等. 不同病原体感染社区获得性肺炎患者的炎症及凝血纤溶相关指标对比观察[J]. 山东医药, 2023, 63(12): 59-62.
- [21] 刘洪波, 赵庆兵. 血清 D-二聚体、乳酸脱氢酶对儿童重症肺炎支原体肺炎的预测价值[J]. 妇儿健康导刊, 2024, 3(11): 195-199.
- [22] Yu, Y., Wang, F. and Wang, H. (2026) Clinical Features and Risk Factors of Plastic Bronchitis in *Mycoplasma pneumoniae* Pneumonia Children with Pulmonary Consolidation: A Prospective Cohort Study. *Frontiers in Pediatrics*, **14**, Article 1830700. <https://doi.org/10.3389/fped.2026.1830700>