

肺动脉压力评分联合肺部超声评分早期诊断早产儿 支气管肺发育不良的临床价值

闫慧源 沈洁茹 周建国 陈超 孙颖华

摘要 **目的** 探讨肺动脉压力评分联合肺部超声评分早期诊断早产儿支气管肺发育不良(BPD)的临床价值。**方法** 选取我院新生儿科收治的 169 例新生儿,根据 BPD 诊断标准分为 BPD 组 92 例和非 BPD 组 77 例,均于出生后 4~7 d、8~14 d、15~21 d 及 22~28 d 分别行超声心动图检测肺动脉压力变化,对出生后 4~28 d 肺动脉压力最大值进行评分;均于出生后 24~28 d 行肺部超声检查并进行肺部超声评分。应用单因素及多因素 Logistic 回归分析早期诊断 BPD 的预测因素;比较两组患儿临床资料和超声参数的差异;绘制受试者工作特征(ROC)曲线分析肺动脉压力评分联合肺部超声评分早期诊断 BPD 的效能;采用 Kappa 检验评价联合评分诊断结果与临床结果的一致性。**结果** 单因素及多因素 Logistic 回归分析显示,肺动脉压力评分、肺部超声评分(胸膜粗糙肺野数、胸膜下实变和横膈粗糙改变)升高均是早期诊断 BPD 的预测因素(均 $P < 0.05$)。BPD 组与非 BPD 组出生胎龄、出生体质量、肺动脉压力评分、肺部超声评分及联合评分比较,差异均有统计学意义(均 $P < 0.01$)。ROC 曲线分析显示,肺动脉压力评分诊断 BPD 的曲线下面积为 0.749(95% 可信区间:0.675~0.823),截断值为 1.5 分;肺动脉压力评分联合肺部超声评分诊断 BPD 的曲线下面积为 0.952(95% 可信区间:0.925~0.980),截断值为 4.0 分,联合评分的曲线下面积高于肺动脉压力评分,差异有统计学意义($P < 0.05$)。联合评分诊断 BPD 与临床诊断结果的一致性好($Kappa=0.702, P < 0.01$)。**结论** 肺动脉压力评分联合肺部超声评分在早期诊断早产儿 BPD 中具有重要的临床价值。

关键词 超声心动描记术;肺部超声;早产儿;支气管肺发育不良

[中图分类号]R540.45;R445.1

[文献标识码]A

Clinical value of pulmonary artery pressure score combined with pulmonary ultrasound score in early diagnosis of bronchopulmonary dysplasia in premature infants

YAN Huiyuan, SHEN Jieru, ZHOU Jianguo, CHEN Chao, SUN Yinghua

Department of Neonatology, Children's Hospital of Fudan University, Shanghai 220958, China

ABSTRACT **Objective** To explore the clinical value of pulmonary artery pressure score combined with pulmonary ultrasound score in early diagnosis of bronchopulmonary dysplasia(BPD) in premature infants.**Methods** A total of 169 neonates admitted to the neonatal ward of our hospital were selected and divided into BPD group (92 cases) and non-BPD group (77 cases) according to the BPD diagnostic criteria. Echocardiography was performed to detect changes of pulmonary artery pressure at 4~7, 8~14, 15~21, and 22~28 d after birth, and the maximum value of pulmonary artery pressure was scored on day 4~28 after birth, ultrasonography of the lungs was performed on day 24~28 after birth and pulmonary ultrasound scores were performed. Univariate and multivariate Logistic regression was used to analyze the influencing factors of BPD, the differences of clinical data and ultrasound parameters were compared between the two groups, and the receiver operating characteristic (ROC) curve was drawn to analyze the efficacy of pulmonary artery pressure score combined with pulmonary ultrasound score in early diagnosis of BPD. Kappa test was used to evaluate the consistency between combination score and clinical results.**Results** Both univariate

基金项目:国家自然科学基金项目(81801502)

作者单位:220958 上海市,复旦大学附属儿科医院新生儿科 国家卫生健康委员会新生儿疾病重点实验室(闫慧源、沈洁茹、周建国、陈超);

复旦大学附属儿科医院超声科(孙颖华)

通讯作者:孙颖华, Email: yinghuasun12@fudan.edu.cn

and multivariate Logistic analysis showed that pulmonary artery pressure score and pulmonary ultrasound score (number of rough pleural lung field, subpleural consolidation and rough diaphragm) increased were influencing factors for BPD (all $P < 0.05$). There were significant differences in gestational age, birth weight, pulmonary artery pressure score, pulmonary ultrasound score and combination score between BPD group and non-BPD group (all $P < 0.05$). ROC curve analysis showed that area under the curve (AUC) of pulmonary artery pressure score in the diagnosis of BPD was 0.749 (95%CI: 0.675~0.823), and AUC of pulmonary artery pressure score combined with pulmonary ultrasound score in the diagnosis of BPD was 0.952 (95%CI: 0.925~0.980), the cutoff value were 1.5 for pulmonary artery pressure score and 4.0 for combination score, the AUC of combined score was higher than that of pulmonary artery pressure score ($P < 0.05$). The consistency between combination score and clinical diagnosis for BPD was good ($Kappa=0.702, P < 0.01$). **Conclusion** Pulmonary artery pressure score combined with pulmonary ultrasound score have important clinical value in early diagnosis of BPD.

KEY WORDS Echocardiography; Pulmonary ultrasound; Premature infants; Bronchopulmonary dysplasia

支气管肺发育不良 (bronchopulmonary dysplasia, BPD) 是发生于早产儿的一种严重的慢性肺部疾病^[1], 是新生儿重症监护病房最常见的疾病之一^[2], 我国超早产儿 (胎龄 < 28 周) BPD 发生率约 74%^[3]。2001 年美国国立儿童健康与人类发展研究所 (National Institute of Child Health and Human Development, NICHD) 共识研讨会修订了已有的氧气需求定义, 增加了关于胎龄和疾病严重程度的标准^[4], 并于 2018 年对 BPD 的定义进行了修订, 强调呼吸支持模式的改变及肺实质影像学改变的应用价值。但在实际应用中, 各种定义的早期诊断范围较窄, BPD 的定义需要进一步完善使其具有临床实用性。BPD 患儿持续的氧依赖多与肺泡肺发育不良及肺血管结构异常相关, 基础结构异常导致持续性通气-灌注不匹配、气体交换不良。本研究应用超声评估早产儿肺血流及肺发育情况, 旨在探讨肺动脉压力评分联合肺部超声评分早期诊断 BPD 的临床价值。

资料与方法

一、研究对象

选取 2016 年 5 月至 2020 年 8 月于我院新生儿科住院的新生儿 169 例, 男 94 例, 女 75 例。依据公认的 2001 年 NICHD 关于 BPD 诊断标准^[4], 即氧依赖 ≥ 28 d, 将患儿分为 BPD 组 92 例和非 BPD 组 77 例。纳入标准: ① BPD 组均为胎龄 24~31⁶ 周的早产儿, 临床资料完整, 住院时需机械通气; ② 非 BPD 组均无慢性肺部疾病, 因黄疸或新生儿肺炎住院, 住院时无需机械通气。排除标准: ① 染色体畸形及其他氧依赖性疾病 (如神经肌肉疾病)、先天性心肺发育畸形、严重的胸廓及气道发育畸形、遗传代谢性疾病、免疫缺陷、气胸、肺出血、脑室内出血 (\geq III 级); ② 临床资料不全; ③ 因需要进行手术治疗或其他干预措施而转出新生儿重症监护病房者。本研究经我院医学伦理委员会批准,

患儿家属均知情同意。

二、仪器与方法

1. 仪器: 使用 GE Voluson S8 pro 床旁彩色多普勒超声诊断仪, 胸部前方及侧面探测使用 9L-RS 线阵探头, 频率 9.0 MHz; 双侧肺后方探测使用 8C-RS 凸阵探头, 频率 8.0 MHz。

2. 肺部超声检查: 所有患儿均于出生后 24~28 d 进行床旁肺部超声检查。保持患儿平卧位, 仔细扫描胸壁前面、侧面及上腹部。将每侧胸壁分为 4 个区域, 通过平乳头线将胸骨旁线至腋前线间的区域分为前方上胸部和下胸部, 腋前线与腋后线间为侧胸部, 腋后线与椎旁线间为后胸部。应用线阵探头在以上区域分别观察前上方、前下方、侧面、后方肺组织回声。每探测一区域时, 先由内到外进行矢状面探测, 再由上到下进行横切面探测。对于因辅助通气状态下无法进行翻身的患儿, 本研究应用凸阵探头于上腹部右肋缘下以肝脏为透声窗, 于左肋缘下以脾脏为透声窗, 观察双侧后肺偏下部分的病变情况。每例患儿每一检查区域的图片均留存 1 张以上, 部分留存动态图像, 观察胸膜形态、胸膜粗糙肺野数、有无小囊样变及胸膜下突变、横膈形态、肝后右下肺及脾上左下肺增强表现等, 并进行肺部超声评分^[5]。见表 1 和图 1。以上操作均由一名经验丰富的肺部超声医师在仅知晓患儿基本出生信息 (如孕周、出生体质量等)、未知胸片结果且不参与诊疗的情况下独立完成。

3. 超声心动图检查: 所有患儿均取平卧位, 充分暴露前胸和腹部, 检查时患儿保持安静状态。本研究采用三尖瓣反流法评估肺动脉压力, 即于胸骨旁四腔心切面记录收缩期三尖瓣反流速度峰值 (TRJV), 采用改良的 Bernoulli 方程^[6] 计算肺动脉收缩压 (PASP)。右室的形态和功能均由心脏超声医师判断并记录。分

表 1 肺部超声评分标准

观察指标	评分标准
胸膜形态	光滑=1分;中度粗糙=2分;粗糙=3分
胸膜粗糙肺野数	肺野数 1~6 个,每存在 1 个计 1 分
小囊样变	无=0分;有=1分
胸膜下实变	无=0分;纵切面单发实变灶=1分;多个实变灶或实变灶呈弥漫样=2分
横膈形态	光滑=0分;中度粗糙=1分;粗糙=2分
肝后右下肺增强	无或少量条状增强=0分;多条小片状增强=1分;多条大片状增强=2分;弥漫增强=3分
脾上左下肺增强	无或少量条状增强=0分;多条小片状增强=1分;多条大片状增强=2分;弥漫增强=3分

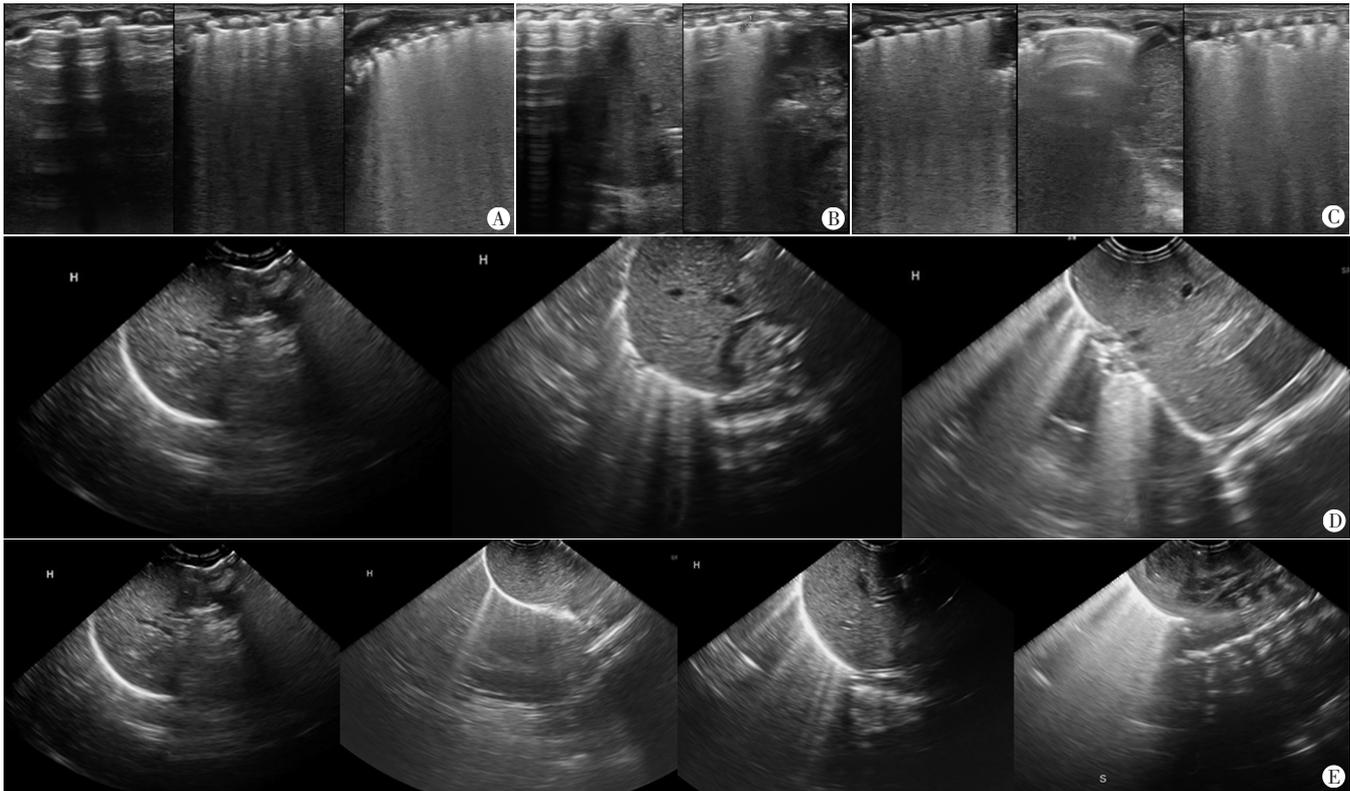


图 1 肺部超声表现及评分示意图
 A: 从左至右分别为胸膜形态光滑、中度粗糙、粗糙,对应评分分别为 1、2、3 分; B: 从左至右分别为无小囊样变和有小囊样变,对应评分分别为 0、1 分; C: 从左至右分别为无胸膜下实变、单发实变灶、多个实变灶或实变灶呈弥漫样,对应评分分别为 0、1、2 分; D: 从左至右分别为横膈形态光滑、中度粗糙、粗糙,对应评分分别为 0、1、2 分; E: 从左至右分别为肝后右下肺及脾上左下肺增强表现为无或少量条状增强、多条小片状增强、多条大片状增强、弥漫增强,对应评分分别为 0、1、2、3 分

图 1 肺部超声表现及评分示意图

别于患儿出生后 4~7 d、8~14 d、15~21 d 及 22~28 d 随访 PASP 变化,选择出生后 4~28 d 内 PASP 最大值进行评分。评分标准见表 2。

表 2 肺动脉压力评分标准

评分	检查内容
1 分	PASP≤35 mm Hg,无右室肥厚,右室大小和功能正常
2 分	35 mm Hg<PASP≤50 mm Hg,右室轻度肥厚或扩张,右室功能正常
3 分	50 mm Hg<PASP≤70 mm Hg,或右室中度肥厚
4 分	PASP>70 mm Hg,右向左分流为主,或右室重度肥厚,右室功能不全,右室扩大

PASP: 肺动脉收缩压。1 mm Hg=0.133 kPa

三、统计学处理

应用 SPSS 24.0 统计软件,计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,采用两独立样本 *t* 检验;计数资料以频数或率表示,采用 χ^2 检验和 Fisher 精确检验。对研究对象的二分类结局进行 Logistic 回归分析,先使用 Enter 法,再使用 Forward: LR 法。绘制受试者工作特征(ROC)曲线分析肺动脉压力评分联合肺部超声评分早期诊断 BPD 的效能。采用 Kappa 检验评价联合评分诊断结果与临床结果的一致性。*P*<0.05 为差异有统计学意义。

结 果

一、单因素 Logistic 回归分析

单因素 Logistic 回归分析结果显示,肺动脉压力评分、肺部超声评分(胸膜粗糙肺野数、胸膜下实变、横膈粗糙改变)升高均是早期诊断 BPD 的预测因素(均 $P < 0.05$)。见表 3。

二、多因素 Logistic 回归分析

多因素 Logistic 回归分析结果显示,肺动脉压力评分、肺部超声评分(胸膜粗糙肺野数、胸膜下实

变、横膈粗糙改变)升高均是早期诊断 BPD 的预测因素(均 $P < 0.05$)。见表 4。

三、两组临床资料、肺动脉压力评分、肺部超声评分及联合评分比较

根据 Logistic 回归分析结果,将胸膜粗糙肺野数、胸膜下实变及横膈粗糙改变 3 项评分之和作为肺部超声评分。联合评分为肺动脉压力评分与肺部超声评分之和。两组出生胎龄、出生体质量、肺动脉压力评分、肺部超声评分及联合评分比较,差异均有统计学意义(均 $P < 0.01$)。见表 5。

表 3 单因素 Logistic 回归分析

变量	回归系数	标准误	Wald χ^2 值	P 值	OR 值(95%可信区间)
PASP 最大值	0.835	0.350	5.685	0.017	2.306(1.160~4.582)
胸膜形态	0.436	0.431	1.024	0.311	1.546(0.665~3.595)
胸膜粗糙肺野数	0.756	0.228	10.990	0.001	2.129(1.362~3.328)
小囊样变	2.672	1.365	3.829	0.050	14.462(0.996~210.070)
胸膜下实变	-0.740	0.280	6.996	0.008	0.477(0.276~0.826)
横膈粗糙改变	1.447	0.561	6.653	0.010	4.250(1.415~12.762)
肝后右下肺增强	-0.231	0.365	0.402	0.526	0.793(0.388~1.622)
脾上左下肺增强	0.053	0.388	0.018	0.892	1.054(0.493~2.253)
常量	-3.867	1.047	13.643	0.000	0.021(-)

表 4 多因素 Logistic 回归分析

变量	回归系数	标准误	Wald χ^2 值	P 值	OR 值(95%可信区间)
PASP 最大值	0.841	0.347	5.857	0.016	2.318(1.173~4.580)
胸膜粗糙肺野数	0.863	0.167	26.748	0.000	2.370(1.709~3.287)
小囊样变	2.728	1.389	3.857	0.050	15.298(1.005~232.778)
胸膜下实变	-0.765	0.280	7.454	0.006	0.465(0.269~0.806)
横膈粗糙改变	1.404	0.540	6.745	0.009	4.069(1.411~11.736)
常量	-3.136	0.612	26.288	0.000	0.043(-)

表 5 两组临床资料、肺动脉压力评分、肺部超声评分及联合评分比较($\bar{x} \pm s$)

组别	出生胎龄(周)	出生体质量(g)	肺动脉压力评分(分)	肺部超声评分(分)	联合评分(分)
BPD 组	28.13 \pm 1.99	1103.80 \pm 337.05	2.04 \pm 0.89	4.82 \pm 2.45	6.86 \pm 2.79
非 BPD 组	35.21 \pm 3.40	2430.49 \pm 885.15	1.27 \pm 0.55	1.04 \pm 1.48	2.31 \pm 1.71
t 值	16.105	12.420	6.613	11.834	12.477
P 值	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

四、诊断效能分析

ROC 曲线分析显示,肺动脉压力评分早期诊断 BPD 的曲线下面积(AUC)为 0.749(95%可信区间:0.675~0.823),以 1.5 分为截断值,其灵敏度为 68.48%,特异度为 77.92%,阳性预测值为 78.75%,阴性预测值为 67.42%;联合评分早期诊断 BPD 的 AUC 为 0.952(95%可信区间:0.925~0.980),以 4.0 分为截断值,其灵敏度为 86.96%,特异度为 83.12%,阳性预测值为 86.02%,阴性预测值为 84.21%。联合评分的 AUC 高于肺动脉压力评分,差异有统计学意义($P < 0.05$)。见图 2。

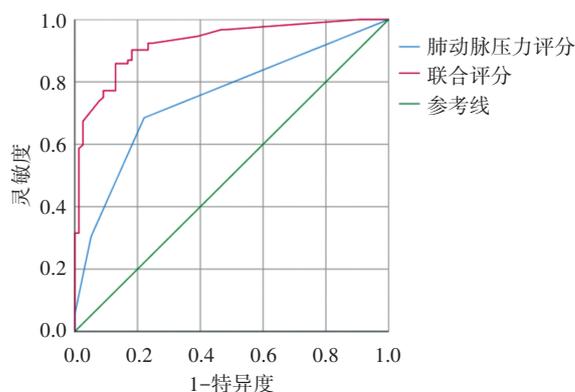


图 2 肺动脉压力评分及联合评分早期诊断 BPD 的 ROC 曲线图

五、一致性检验

一致性检验结果显示,肺动脉压力评分诊断 BPD 与临床诊断结果的一致性一般($Kappa=0.459, P<0.01$);联合评分诊断 BPD 与临床诊断结果的一致性好($Kappa=0.702, P<0.01$)。见表 6,7。

表 6 肺动脉压力评分诊断 BPD 与临床诊断结果对照 例

肺动脉压力评分截断值	非 BPD 组	BPD 组	合计
<1.5 分	60	29	89
≥1.5 分	17	63	80
合计	77	92	169

表 7 联合评分诊断 BPD 与临床诊断结果对照 例

联合评分截断值	非 BPD 组	BPD 组	合计
<4.0 分	64	12	76
≥4.0 分	13	80	93
合计	77	92	169

讨 论

肺泡化受阻和肺部微血管发育异常在 BPD 发病机制中具有重要意义,围产期各种危险因素使发育中的肺脏产生反复损伤,由于应对损伤的异常修复干扰了正常的肺脏发育,导致产生 BPD 典型的肺部病理改变^[7]。准确评估肺的病理生理变化对 BPD 的诊治非常重要,其中通气血流比例(每分钟肺泡通气量与每分钟肺血流量的比值)是重要的评估指标,其值改变可影响有效的气体交换,导致血液缺氧和二氧化碳潴留。当发育中的肺血管受到损伤,肺动脉压力升高,肺部血流量则会减少,无法携带足够的氧从而导致低氧血症;当肺泡发育受阻,肺泡通气量减少,则可引起通气功能障碍,不仅造成低氧血症,还可引起二氧化碳潴留,发生高碳酸血症。本研究应用超声评估早产儿肺血流阻力及肺部发育情况,旨在为临床早期诊断 BPD 提供参考。

随着早产儿救治技术的提高,越来越多极低出生体重儿通过救治得以存活,重症 BPD 患儿的存活比例随之提高,但合并肺动脉高压的患儿预后极差,病死率高,治疗难度大,已成为临床上非常棘手的问题。目前研究多为评估患儿确诊 BPD 后并发肺动脉高压的不良预后,评估 BPD 发病的时间节点滞后,但肺动脉高压的形成是渐进的过程,早期发现肺动脉高压可提示病情的重症趋向,动态随访肺动脉压力的变化对早期诊断及干预均有重要指导意义。Kim 等^[8]研究发现极早产儿在出生后 4~7 d 发生肺动脉高压是 BPD 晚期肺动脉高压形成的独立危险因素;Behers 等^[9]研究发现出生后 28 d 内发生肺动脉高压是重度 BPD 及相

关肺动脉高压的危险因素;Alvarez-Fuente 等^[10]研究发现出生后 7 d 内发生肺动脉高压是中重度 BPD 的危险因素。BPD 患儿中约 10%~36% 可发生肺动脉高压,与其预后不良密切相关^[11]。本研究对 BPD 患儿的心肺功能进行评估,选择患儿出生后 4~28 d 内超声心动图评估的肺动脉压力评分作为筛查指标,分析肺动脉压力与患儿氧依赖时间的关系,结果表明肺动脉压力评分升高是早期诊断 BPD 的预测因素,且 ROC 曲线分析亦证实了该指标在早期诊断 BPD 中具有良好的效能。从 BPD 形成角度分析,不论由肺血管发育异常所致的肺动脉压力升高或循环系统内异常分流,均可导致血液氧合效率降低,致使患儿难以脱离呼吸支持,延长了呼吸支持时间。

但并非所有肺动脉压力升高的患儿均会发生 BPD,且发生 BPD 的患儿也并非均存在肺动脉高压。从氧依赖的病理生理角度分析,除血流因素外,肺泡氧合能力也非常重要,良好的肺泡发育对通气量及换气量均有重要意义,因此早期对肺泡及小气管的发育进行评估也非常重要。胸片、CT^[12]及 MRI^[13]在评估早产儿肺部病变中均有较好的应用价值,但胸片需要连续观察且具有放射性,CT 及 MRI^[14]评估肺部病变虽准确,但均需在特定的场地完成,且 CT 放射性高, MRI 检查耗时,均有一定的局限性。相比之下,床旁超声不仅操作简便、价廉、安全,还可以连续检测,在新生儿重症监护病房中应用广泛,且相关研究已证实特定的肺部超声影像特征与 BPD 具有良好的相关性,研究^[15]发现肺部超声评分及胸膜线异常改变对 BPD 的诊断有一定价值。本研究将患儿肺部超声表现进行量化分析,最终得出肺部超声评分升高是早期诊断 BPD 的预测因素。

目前临床评估肺动脉压力的金标准为心导管检查,但其为有创检查,且开展难度极大,在新生儿随访中应用受限^[16];超声心动图是临床评估肺动脉压力的主要手段^[17],但受检查者技术及患儿疾病严重程度的影响,灵敏度偏低;肺部超声对肺炎、气胸的诊断目前虽有较多研究^[18],但对 BPD 的诊断尚存在不足^[19],主要为其诊断 BPD 依赖临床上患儿对氧需求的表现。本研究在 Logistic 回归分析的基础上,将以上具有预测意义的超声指标进行量化,分析联合评分对 BPD 的早期诊断效能。结果表明肺动脉压力评分联合肺部超声评分可早期诊断 BPD,通过绘制 ROC 曲线及一致性检验均证实了联合评分在早期诊断 BPD 方面具有更大优势,具有广阔的临床应用前景。但本研究是一项

单中心研究,样本量相对较小,未来需要多中心、大样本的临床研究的进一步验证。

综上所述,应用超声心动图可以评估早产儿出生后4~28 d肺动脉压力变化;肺动脉压力评分、肺部超声评分升高均为早期诊断BPD的预测因素,二者联合在早期诊断BPD中具有重要的临床价值。

参考文献

- [1] Jobe AH, Abman SH. Bronchopulmonary dysplasia: a continuum of lung disease from the fetus to the adult [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2019, 200(6): 659-660.
- [2] Northway WH Jr, Rosan RC, Porter DY. Pulmonary disease following respirator therapy of hyaline-membrane disease. Bronchopulmonary dysplasia [J]. *N Engl J Med*, 1967, 276(7): 357-368.
- [3] Zhu Z, Yuan L, Wang J, et al. Mortality and morbidity of infants born extremely preterm at tertiary medical centers in china from 2010 to 2019 [J]. *JAMA Netw Open*, 2021, 4(5): e219382.
- [4] Jobe AH, Bancalari E. Bronchopulmonary dysplasia [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2001, 163(7): 1723-1729.
- [5] Sun YH, Yuan L, Du Y, et al. Characterization of lung ultrasound imaging in preterm infants with bronchopulmonary dysplasia [J]. *Clin Hemorheol Microcirc*, 2022, 80(2): 83-95.
- [6] Ge Z, Zhang Y, Kang W, et al. Noninvasive evaluation of interventricular pressure gradient across ventricular septal defect: a simultaneous study of Doppler echocardiography and cardiac catheterization [J]. *Am Heart J*, 1992, 124(1): 176-182.
- [7] Thébaud B, Goss KN, Laughon M, et al. Bronchopulmonary dysplasia [J]. *Nat Rev Dis Primers*, 2019, 5(1): 78.
- [8] Kim HH, Sung SI, Yang MS, et al. Early pulmonary hypertension is a risk factor for bronchopulmonary dysplasia-associated late pulmonary hypertension in extremely preterm infants [J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 11206.
- [9] Behers S, Alapati D, McCulloch MA. Screening echocardiography and brain natriuretic peptide levels predict late pulmonary hypertension in infants with bronchopulmonary dysplasia [J]. *Pediatr Cardiol*, 2019, 40(5): 973-979.
- [10] Alvarez-Fuente M, Moreno L, Lopez-Ortego P, et al. Exploring clinical, echocardiographic and molecular biomarkers to predict bronchopulmonary dysplasia [J]. *PLoS One*, 2019, 14(3): e0213210.
- [11] Choi EK, Shin SH, Kim EK, et al. Developmental outcomes of preterm infants with bronchopulmonary dysplasia-associated pulmonary hypertension at 18-24 months of corrected age [J]. *BMC Pediatr*, 2019, 19(1): 26.
- [12] Vanhaverbeke K, Van Eyck A, Van Hoorenbeeck K, et al. Lung imaging in bronchopulmonary dysplasia: a systematic review [J]. *Respir Med*, 2020, 171(1): 106101.
- [13] Higano NS, Spielberg DR, Fleck RJ, et al. Neonatal pulmonary magnetic resonance imaging of bronchopulmonary dysplasia predicts short-term clinical outcomes [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2018, 198(10): 1302-1311.
- [14] Gouwens KR, Higano NS, Marks KT, et al. Magnetic resonance imaging evaluation of regional lung vts in severe neonatal bronchopulmonary dysplasia [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2020, 202(7): 1024-1031.
- [15] Aldecoa-Bilbao V, Velilla M, Teresa-Palacio M, et al. Lung ultrasound in bronchopulmonary dysplasia: patterns and predictors in very preterm infants [J]. *Neonatology*, 2021, 118(5): 537-545.
- [16] Vayalthrikkvoil S, Vorhies E, Stritzke A, et al. Prospective study of pulmonary hypertension in preterm infants with bronchopulmonary dysplasia [J]. *Pediatr Pulmonol*, 2019, 54(2): 171-178.
- [17] Arjaans S, Zwart EAH, Roofthoof M, et al. Pulmonary hypertension in extremely preterm infants: a call to standardize echocardiographic screening and follow-up policy [J]. *Eur J Pediatr*, 2021, 180(6): 1855-1865.
- [18] Mongodi S, De Luca D, Colombo A, et al. Quantitative lung ultrasound: technical aspects and clinical applications [J]. *Anesthesiology*, 2021, 134(6): 949-965.
- [19] Soldati G, Demi M, Smargiassi A, et al. The role of ultrasound lung artifacts in the diagnosis of respiratory diseases [J]. *Expert Rev Respir Med*, 2019, 13(2): 163-172.

(收稿日期: 2022-06-26)