·专家论坛·

呼吸声学分析在学龄前儿童哮喘中的研究进展

叶钦松，李鼎，郑吉善

【摘要】 支气管哮喘是我国儿童最高发的慢性气道炎症性疾病，患病率呈持续攀升态势。儿童哮喘表型复杂，症状不典型，存在过度诊疗与漏诊情况。呼吸声学分析通过无创声学特征解析，为学龄前儿童哮喘精准诊疗开辟了新路径。本文通过分析呼吸声学在学龄前儿童哮喘中的应用现状，探讨呼吸声学在儿童哮喘早期风险识别、辅助诊断等方面的可行性。

【关键词】 支气管哮喘；儿童；学龄前；呼吸声学分析

DOI:10.3969/j.issn.1671-0800.2026.03.002

【中图分类号】 R725.6　【文献标志码】 C　【文章编号】 1671-0800(2026)03-0225-04

支气管哮喘是我国儿童最高发的慢性气道炎症性疾病[1]。近三次全国城市儿童哮喘流行病学调查显示，支气管哮喘患病率呈持续攀升态势，学龄前儿童尤为高发，2000 年及 2010 年支气管哮喘患病率分别达 2.43%和 3.49%[2]，居各年龄组首位。该群体哮喘表型复杂，症状不典型，肺功能及呼出气中一氧化氮（exhaled nitric oxide，eNO）检测高度依赖患儿配合，医患评估差异导致过度诊疗与漏诊并存。这一困境亟须客观评估技术破局，呼吸声学分析通过无创声学特征解析，为学龄前儿童哮喘精准诊疗开辟了新路径。本文分析呼吸声学在学龄前儿童哮喘中的应用现状，评估其在儿童哮喘早期风险识别、辅助诊断等方面的可行性，并讨论当前的主要挑战及未来发展方向。

1　呼吸声学分析的概述

传统肺部听诊自 1816 年 René Laennec 发明听诊器以来始终面临三大局限：主观经验依赖、受限于人耳听阈及数据不可数字化。现代呼吸声学分析[3]是一门交叉学科技术，融合临床医学、信号处理与人工智能（AI），通过无创采集呼吸信号实现数字化存储、定量分析和声学标志物提取，显著提升呼吸系统生理功能与病理状态评估的客观性和可重复性。有研究证实，AI 算法识别儿童哮鸣音、湿啰音等病理音的效能（F1 分数）已超越医生 8.4%[4]。有研究发现，Deep Breath 模型（卷积神经网络+逻辑回归）识别儿童喘息的受试者工作特征（ROC）曲线下面积（*AUC*）达 0.91[5]。

呼吸音的产生源于气道内气流运动、管壁振动及肺实质的声学传导，其声学特征（如频率、强度、时域特性）与气道病理生理改变密切相关。呼吸声学分析的临床数据收集主要依赖非侵入性设备，大致分为两类，一类为音频声学麦克风，最符合临床听诊习惯，信号包含完整的病理信息，但容易受到环境、空气、噪声的干扰，需要良好的隔音或高效的降噪算法。比如电子听诊器[6]、非接触式麦克风（嵌入在移动设备中）[7]。另一类为机械声学传感器，擅长于无扰、连续、抗噪声地监测呼吸的力学事件（频率、节律、努力程度）以及采集与振动相关的心肺声音，但可能无法捕捉到全部细微的、高频的肺部病理音。比如穿戴加速度计[8]、压电薄膜传感器[9]。其中目前研究较多、应用较为广泛的是各类电子听诊器，可实时采集儿童的呼吸音、咳嗽音及语音信号，并借助无线传输技术将数据上传至云端存储和传输。

在数据处理方面，呼吸声学分析通常包括信号预处理、特征提取与模型构建三个步骤。呼吸音预

基金项目： 宁波市“科创甬江 2035”关键技术突破计划（2024Z222）；宁波市卫生健康青年技术骨干人才培养专项计划（甬卫发 2024-102-77）；浙江省医药卫生科技计划项目（2025KY1423）

作者单位： 315010 宁波，宁波大学附属妇女儿童医院

通信作者： 郑吉善，主任医师，教授，博士研究生导师。浙江省医学会儿科学分会副主任委员，浙江省医师协会儿科医师分会副会长，宁波市康复医学会副会长，宁波市医学会儿科学分会主任委员。Email：zjs222@163.com

处理采用小波变换、自适应滤波等方法降噪去伪影、预加重、分帧加窗及呼吸相位同步，将原始信号转换为标准化短时平稳片段以供分析[10]。特征提取从三个维度系统性地构建特征集：(1) 时域特征（如短时能量、过零率及吸呼时间比）用于刻画信号的宏观动态。(2) 频域与时频域特征（如频谱质心、频谱熵以及基于短时傅里叶变换的时频谱图）用于揭示信号的静态频率分布与动态时频演化，尤其适于追踪哮鸣音等瞬态事件。(3) 基于声学模型的参数化特征，特别是梅尔频率倒谱系数（Mel frequency cepstral coefficients，MFCC）、线性预测倒谱系数（linear prediction cepstral coefffcients，LPCC），并通过计算它们一阶、二阶特征序列的时间差分来描述动态特性。这些多层次特征共同构成了用于呼吸音自动分类与病理识别的判别性特征集。在儿童呼吸音智能分类的研究中，动态线性预测系数（dynamic linear prediction coefffcients，DLPCs）被证实能更有效地捕捉呼吸音的时变特性，当与频谱熵特征融合使用时，分类准确率达到了 97%[11]。模型构建主要采用机器学习与深度学习两类算法。在机器学习方面，常用模型包括支持向量机（support vector machine，SVM）、K 近邻（K-Nearest Neighbor，KNN）、随机森林（random forest，RF）和隐马尔可夫模型（hidden Markov model，HMM），这些方法依赖人工特征工程进行模式识别与分类。在深度学习方面，则多使用卷积神经网络（convolutional neural network，CNN）与循环神经网络（recurrent neural network，RNN）等架构，以自动提取呼吸音信号中的高阶时空特征。

2　呼吸声学分析在学龄前儿童哮喘管理中的应用现状

2.1　辅助早期诊断与筛查　2025 年全球哮喘防治创议（GINA）首次明确了 5 岁及以下儿童哮喘的三项诊断标准[12]，其中，标准 1 高度依赖于医务人员及看护者的主观评估。然而，研究表明，看护者对急性喘息发作的记录信息，其确认或排除的效能有限[*AUC*=0.720（95% *CI*：0.701 ～ 0.739）]，凸显了家长与临床医生评估间的不一致性[13]。这提示依赖于普通人（父母）主观描述的哮喘家庭监测并不可靠，临床实践亟需可量化、客观的生物标志物或监测指标。

肺功能检查是确诊哮喘的重要手段，是证实可逆性气流受限或气道高反应性的“金标准”。然而，学龄前儿童常因无法配合而难以实施，导致早期诊断困难。呼吸声学分析为此提供了有效的客观替代手段。一项针对 3 岁健康幼儿的研究采用机器学习算法分析肺音，使用 FAP_0（0 点频率分析参数）和 PAP_0（0 点功率分析参数）等肺音参数，发现即使在无症状期的 3 岁健康婴幼儿中，有喘息史或哮喘风险的儿童已表现出 FAP_0 显著降低和 PAP_0 显著升高[14]。这表明肺音参数可作为识别早期气道异常的客观生物标志物，为筛查提供了自动化工具。另一项关于儿童乙酰甲胆碱激发试验的研究进一步证实，通过频谱分析（如参数 A_3/A_p、B_4/A_p 的降低及高频区功率变化）可客观检测到药物诱发支气管收缩时产生的“驼峰样”高频音增强，且该变化在吸入支气管舒张剂后完全逆转[15]。这证明了呼吸声学分析能无创、灵敏地反映气道舒缩的生理动态，适用于无法配合常规测试的幼儿。

此外，呼吸声学分析的研究范畴已从传统呼吸音扩展至咳嗽音与语音分析。哮喘患儿的咳嗽声在频谱上常表现为高频能量增强、共振峰偏移及频率波动显著，这与其气道狭窄、气流受限的病理生理基础相关。一项基于深度神经网络的研究利用智能手机录制儿童主动咳嗽声，通过 MFCC 特征与双向长短期记忆网络模型，实现了高达 94.2%的哮喘分类准确率[16]。类似地，语音分析（如长元音/ɑ:/发声）也能揭示哮喘患儿因气流受限导致的共振峰结构差异。一项融合咳嗽与元音声学特征的研究显示结合两种特征的模型对哮喘与健康儿童的分类准确率达 95.3% [17]。这些进展标志着呼吸声学分析正成为哮喘早期筛查与辅助诊断的有效工具。

2.2　评估病情严重程度　哮喘的病情评估是制定治疗方案的基石，涉及分期、急性发作严重度、控制水平及病情严重程度分级。呼吸声学分析为此提供了客观量化指标。

参数 ic700（吸气音在 700 Hz 频率处的强度）已被用于哮喘严重程度评估。一项研究将儿童分为非哮喘组及 4 个不同哮喘严重程度组，发现 ic700 值随哮喘严重程度增加而呈单向递增的梯度变化，提示

其可作为评估慢性气流受限及气道结构异常的无创辅助指标[18]。呼气音功率参数同样具有重要价值。一项对 114 例哮喘儿童的观察性研究发现，低频与中频呼气音功率（E LF、E MF）及其与吸气音的功率比（E/I LF、E/I MF）在伴有哮鸣或肺功能下降[第 1 秒用力呼气容积（FEV1）＜ 80%]的患儿中显著升高，并能敏感反映支气管收缩程度 [19]。值得注意的是，该研究揭示，对于伴喘息或肺功能下降但无喘息的患儿，呼气音功率参数仍显示异常，提示呼吸声学分析能捕捉传统方法易遗漏的气道病变。

咳嗽声分析同样能服务于严重程度分级。一项前瞻性研究利用智能手机录制 29 d 至 12 岁儿童咳嗽声，提取 76 种多维声学特征并构建机器学习模型，结果表明咳嗽声分析结合呼吸频率指标，能有效区分无/轻度哮喘与重度/极重度哮喘，为社区及家庭环境下的客观分级提供了新路径[20]。

2.3　监测治疗反应与预测发作　疗效监测是哮喘管理的核心，旨在动态优化治疗过程，实现个体化精准管理。

参数 ic700 在疗效监测中展现出应用前景。一项针对哮喘儿童（包括婴幼儿）的前瞻性研究显示，吸入性糖皮质激素治疗 8 周后，ic700 值显著下降，反映了积极的治疗反应[21]。此外，ic700 能有效区分哮喘控制良好与未控制的患儿，并以 ic700 ＞ 0.0 dB 为界值，对未来 2 周内的哮喘发作具有良好的预测效能（如治疗第 6 周时，预测敏感性 83%，特异性 89%）。

当前，学龄前儿童的哮喘控制评估在很大程度上依赖照护者的主观判断，可能存在高估。一项采用声门肺音描记传感器进行整夜持续监测的研究发现，即使在患儿日间主观报告（哮喘日记）及呼气峰流速监测均提示控制良好时，夜间仍可客观检测到大量喘息事件[22]。这揭示了隐匿性夜间气道问题的存在，凸显了客观声学监测在发现潜在症状，实现真正精准管理中的不可替代价值。

3　当前挑战与未来方向

尽管呼吸声学分析在学龄前儿童哮喘管理中展现出巨大潜力和独特优势，但其迈向广泛、可靠的临床应用，仍需系统性地攻克三大核心挑战。

3.1　标准化与规范化：构建可信的评估基础　当前领域发展的首要瓶颈在于标准化体系的缺失。数据采集设备、协议与处理流程缺乏国际统一标准，尤其缺少针对学龄前儿童的高质量、精细化标注公共数据库。这导致研究间结果难以比较，算法模型泛化能力受限。值得关注的是，2023 年发布的《高质量呼吸音数据库建设及管理规范专家共识》[23]，为破解这一困局提供了关键性的框架指引。以此共识为基石，未来的工作重心应转向由权威学术组织牵头，制定更具操作性的学龄前儿童哮喘呼吸音采集临床实践指南，并依托大规模、多中心前瞻性研究，共同建设高质量、开放共享的基准数据库。所有技术输出的终点，必须是“临床友好”的，即结果应以直观图表、风险分级等医生熟悉的形式呈现，实现技术与临床实践的无缝对接。

3.2　信号精准分离：攻克核心的技术瓶颈　声学信号蕴含丰富的生理信息，但其高度复杂性不容忽视。信号易受个体差异（年龄、解剖结构、共病如鼻炎）、儿童状态（哭闹、言语）及环境噪声的干扰。未来突破需硬件与算法协同创新：一方面，研发基于柔性电子、舒适抗干扰的儿童专用可穿戴设备，实现高质量连续采集；另一方面，发展能有效分离环境噪声，并特异性提取哮喘相关特征的稳健算法，确保在真实家庭场景中的可靠性及泛化能力。

3.3　多模态融合与个体化管理：迈向精准的未来路径　在解决单模态信号质量的基础上，融合多维度数据是提升评估与预测能力的必然方向[24]。未来应深度整合声学特征与实时生理参数（如心率、血氧）、环境暴露数据、个体化临床信息（如 eNO、生物标志物）及影像学特征，构建全面的个体化哮喘评估模型。最终探索“声学分型”，揭示其与哮喘不同内型（如嗜酸粒细胞性）的关联，为精准干预提供新依据。

4　总结

呼吸声学分析凭借其无创、无需患儿配合的独特优势，正在重塑学龄前儿童哮喘管理。它能够覆盖从早期风险识别、辅助诊断、严重度与表型评估，到治疗反应监测、发作风险预警及发现隐匿性失控的全周期管理闭环。随着算法优化、标准建立与设备普及，这项技术正加速从研究走向临床及家庭场

景，有望实现学龄前儿童哮喘的早发现、准评估、精管理，最终提升患儿长期预后与生活质量。尽管仍面临挑战，但是它无疑是突破该年龄群体哮喘评估瓶颈的关键方向，值得临床与科研界的共同关注与推进。

利益冲突　所有作者声明无利益冲突

参 考 文 献

[1] 中华医学会儿科学分会呼吸学组,中华儿科杂志编辑委员会,中国医药教育协会儿科专业委员会. 儿童支气管哮喘诊断与防治指南（2025）[J]. 中华儿科杂志,2025,63(4):324-337.

[2] 中国医药教育协会儿科专业委员会, 中华医学会儿科学分会呼吸学组哮喘协作组, 中国医师协会呼吸医师分会儿科呼吸工作委员会,等. 中国儿童支气管哮喘诊治现状及发展策略(2022)[J]. 中华实用儿科临床杂志,2023,38(9):647-680.

[3] 陈一冰,李靖,解立新. 声学技术赋能呼吸病诊疗的挑战与未来[J]. 中华结核和呼吸杂志,2025,48(6):512-518.

[4] Grzywalski T, Piecuch M, Szajek M, et al. Practical implementation of artificial intelligence algorithms in pulmonary auscultation examination[J]. Eur J Pediatr, 2019, 178(6): 883-890.

[5] Heitmann J, Glangetas A, Doenz J, et al. DeepBreath-automated detection of respiratory pathology from lung auscultation in 572 pediatric outpatients across 5 countries[J]. NPJ Digit Med, 2023, 6(1): 104.

[6] Taylor L, Ding X R, Clifton D, et al. Wearable vital signs monitoring for patients with asthma: A review[J]. IEEE Sens J, 2020, 23(3): 1734-1751.

[7] Gupta P, Wen H R, di Francesco L, et al. Detection of pathological mechano-acoustic signatures using precision accelerometer contact microphones in patients with pulmonary disorders[J]. Sci Rep, 2021, 11(1): 13427.

[8] Porter P, Brisbane J, Abeyratne U, et al. A smartphone-based algorithm comprising cough analysis and patient-reported symptoms identifies acute exacerbations of asthma: A prospective, double blind, diagnostic accuracy study[J]. J Asthma, 2023, 60(2): 368-376.

[9] Venditto L, Morano S, Piazza M, et al. Artificial intelligence and wheezing in children: Where are we now?[J]. Front Med, 2024, 11: 1460050.

[10] 吴寅,廖玺铭,王琨,等. 呼吸音数字化分析在体格检查及呼吸系统疾病诊断中的研究进展[J]. 同济大学学报(医学版),2024,45(2):273-280.

[11] Liu L C, Li W, Moxley B. AI-based classification of pediatric breath sounds: Toward a tool for early respiratory screening[J]. Appl Sci, 2025, 15(13): 7145.

[12] 韩鹏,鲍燕敏,申昆玲. 全球哮喘防治创议(GINA 2025)5 岁及以下儿童哮喘诊断和管理解读[J]. 中华实用儿科临床杂志,2025,40(8):589-594.

[13] Emeryk A, Derom E, Janeczek K, et al. Home monitoring of asthma exacerbations in children and adults with use of an AI-aided stethoscope[J]. Ann Fam Med, 2023, 21(6): 517-525.

[14] Mochizuki H, Hirai K, Furuya H, et al. The analysis of lung sounds in infants and children with a history of wheezing/asthma using an automatic procedure[J]. BMC Pulm Med, 2024, 24(1): 394.

[15] Imamura T, Enseki M, Murayama Y, et al. Characteristics of breath sounds during methacholine-induced bronchoconstriction in children with asthma[J]. Tokai J Exp Clin Med, 2022, 47(3): 125-130.

[16] Balamurali B T, Hee H I, Kapoor S, et al. Deep neural network-based respiratory pathology classification using cough sounds[J]. Sensors (Basel), 2021, 21(16): 5555.

[17] Bt B, Hee H I, Teoh O H, et al. Asthmatic versus healthy child classification based on cough and vocalised/ɑ: /sounds[J]. J Acoust Soc Am, 2020, 148(3): EL253.

[18] Habukawa C, Murakami K, Endoh M, et al. Evaluation of airflow limitation using a new modality of lung sound analysis in asthmatic children[J]. Allergol Int, 2015, 64(1): 84-89.

[19] Sakama T, Ichinose M, Obara T, et al. Effect of wheeze and lung function on lung sound parameters in children with asthma[J]. Allergol Int, 2023, 72(4): 545-550.

[20] Swarnkar V, Abeyratne U, Tan J, et al. Stratifying asthma severity in children using cough sound analytic technology[J]. J Asthma, 2021, 58(2): 160-169.

[21] Habukawa C, Murakami K, Endoh M, et al. Treatment evaluation using lung sound analysis in asthmatic children[J]. Respirology, 2017, 22(8): 1564-1569.

[22] Wieczorek K, Ananth S, Valazquez-Pimentel D. Acoustic biomarkers in asthma: A systematic review[J]. J Asthma, 2024, 61(10): 1165-1180.

[23] 上海市医学会儿科分会呼吸学组, 福建省医学会儿科分会呼吸学组,江苏省医学会儿科分会呼吸学组,等. 高质量呼吸音数据库建设及管理规范专家共识[J]. 中华实用儿科临床杂志,2023,38(7):481-485.

[24] Nyirimanzi N, Bransi M, Counil F P, et al. Using mHealth to predict asthma exacerbations in children and adolescents (mobile health for kids with asthma): Protocol for an observational study[J]. JMIR Res Protoc, 2025, 14: e70517.

收稿日期：2026-03-04

（本文编辑：孙海儿）