

· 主题综述 ·

人工智能在肺血管疾病诊治中的研究进展

王一佳 黄志华 高璐阳 赵智慧 赵青 罗勤 柳志红

(中国医学科学院 北京协和医学院 国家心血管病中心 阜外医院, 北京 100037)

【摘要】 肺血管疾病(PVD)指影响肺内血管的各种疾病,主要包括肺动脉高压和肺栓塞。PVD的病理生理学和临床表现复杂,存在异质性,疾病负担严重,其诊断和治疗具有重大挑战。近年来,随着医疗信息化技术的持续发展,人工智能(AI)在疾病诊治中的应用进展迅速,为PVD的诊治提供了新的思路。现从AI在PVD中的数据来源、数据类型及临床应用等方面进行文献综述,以期AI在PVD的早期诊断、早期治疗及规范化管理中的应用提供理论依据。

【关键词】 人工智能;肺血管疾病;肺动脉高压;肺栓塞

【DOI】10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2024.01.002

Artificial Intelligence in Diagnosis and Treatment of Pulmonary Vascular Disease

WANG Yijia, HUANG Zhihua, GAO Luyang, ZHAO Zhihui, ZHAO Qing, LUO Qin, LIU Zhihong

(Fuwai Hospital, National Center for Cardiovascular Diseases, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100037, China)

【Abstract】 Pulmonary vascular disease (PVD) refers to a variety of diseases affecting the blood vessels in the lungs, mainly including pulmonary hypertension and pulmonary embolism. The pathophysiology and clinical manifestations of PVD are complex and heterogeneous, and the disease burden is severe, which presents a major challenge in diagnosis and treatment of PVD. In recent years, with the continuous development of medical information technology, the application of artificial intelligence (AI) in the diagnosis and treatment of diseases has progressed rapidly, providing new ideas for the diagnosis and treatment of PVD. This review provides a literature review of the data sources, data types and clinical applications of AI in PVD, with a view to providing a theoretical basis for the early diagnosis and treatment and standardized management of PVD.

【Keywords】 Artificial intelligence; Pulmonary vascular disease; Pulmonary hypertension; Pulmonary embolism

肺血管疾病(pulmonary vascular disease, PVD)是指由多种因素和/或疾病造成的肺循环(肺动脉、肺静脉和肺毛细血管)结构和/或功能的改变,最终可进展为右心衰竭。PVD主要包括肺动脉高压(pulmonary hypertension, PH)和肺栓塞(pulmonary embolism, PE),其发病率和死亡率较高,通常需复杂的诊断和治疗干预^[1]。PH患病率高,占全球总人口的1%,起病隐匿,预后极差^[2]。据估计,美国每年有15万~25万PE患者,30d死亡率为2.4%~11%^[3]。急性PE在心血管死亡原因中位列第3,仅次于冠心病和脑卒中。总之,PVD负担严重,病理生理学复杂,临床表现多样,进展多变,亟需早期诊断、早期治疗和规范化管理。

随着医疗信息技术的应用和持续深入发展,医学大数据的累积和计算能力的提高促进了人工智能(artificial intelligence, AI)在医疗领域的应用和开发。

AI是指机器模拟人的意识和思维,学习输入的数据并采用多样化的建模方式(算法)处理数据^[4]。目前AI已广泛应用于心血管疾病、肺部疾病等多个研究领域。研究^[5]表明,AI作为一种辅助手段,可降低侵入性操作的频率,同时在人群水平上降低筛查成本,在促进早期诊断、提高诊断率和预测预后方面具有极大的潜力。本综述总结了近年来AI在PVD诊治中的数据来源、数据类型及临床应用,旨在为AI在PVD诊治中的应用提供理论依据,以期加速AI和PVD诊治的深度融合发展。

1 AI在PVD中的数据来源

医疗信息数据可从多种渠道获得,主要包括医院数据库、临床试验数据和患者来源数据等。这些数据可分为两大类:结构化数据和非结构化数据。结构化数据是指以预定义格式记录和存储的数据,如数据库

或电子表格。电子健康数据 (electronic health record, EHR)、实验室检查结果、影像学检查参数和临床试验数据等均为 PVD 的结构化数据^[6]。这类数据被划分成类,便于使用机器进行处理,通常更容易使用 AI 算法进行分析^[7]。当机器学习处理结构化数据时,可对具有不同临床特征的患者进行识别分类并预测临床预后^[8]。例如,根据特定诊断代码或成像报告识别 PVD 患者,使用机器学习方法从记录中提取相关数据训练 AI 算法,以辅助诊断、判断预后和指导个性化治疗^[9-10]。未以预定义格式记录或存储的数据,如临床病历资料或图像,被称为非结构化数据。PVD 诊断和管理中的非结构化数据包括放射成像、病理学结果和患者生成的数据,如可穿戴设备来源数据^[11]。非结构化数据多为文本信息,未划分成类,使用 AI 算法分析更困难,需更先进的技术,如自然语言处理 (natural language processing, NLP) 算法或图像分析提取有意义的信息^[12]。NLP 将非结构化数据的文本信息转换为机器可读的结构化数据后,可进一步使用机器学习技术分析识别与 PVD 相关的特征或风险因素^[13]。

通常, AI 算法可通过整合结构化和非结构化数据得到增强。一项关于非瓣膜性心房颤动的研究^[14]建议使用 AI 算法将基于自由文本信息的 NLP 与结构化 EHR 相结合,以提高数据的完整性。事实证明,这种方法可降低脑卒中和死亡风险。整合结构化和非结构化数据的 AI 算法开发将在管理 PVD 患者、改善其生存和预后方面发挥关键作用。尽管 AI 算法通常更容易分析结构化数据,但非结构化数据提供了额外有价值的信息,可帮助诊断、评估预后和确定治疗方案。

2 AI 在 PVD 中的数据类型

2.1 医学成像技术

在 PVD 的诊治过程中,传统的医学成像技术主要包括胸部 X 线摄影、计算机断层扫描 (computed tomography, CT)、磁共振成像、超声心动图、通气/灌注扫描和正电子发射断层成像等,但这些技术在准确性、可用性和成本效益方面均存在局限性^[15]。将传统医学成像技术与 AI 技术相结合,可大大提高疾病筛查的效率与准确性。深度学习是一种机器学习的分支,它模仿人脑神经网络的结构和功能,通过多层次的神经网络学习和解决复杂的问题,可自动地从原始数据中提取和学习特征。定量 CT (quantitative CT, QCT) 是一种无创、可重复性强的三维影像技术,可运用深度学习的技术较为精准地从标准化成像数据中提取定量数据^[16]。研究^[17-18]表明与普通胸部 CT 相比, QCT 提供了 PH 患者的可重复数据和疾病严重程度的定量数值。Fortmeier 等^[19]发现重度三尖瓣反流患者的超

声心动图会低估平均肺动脉压,然而将 9 个超声心动图参数作为输入变量训练极限梯度提升 (extreme gradient boosting, XGBoost) 算法,可有效预测重度三尖瓣反流患者的平均肺动脉压水平,且能预测经导管三尖瓣置换术后的死亡风险。卷积神经网络 (convolutional neuron network, CNN) 是深度学习的重要模型之一,主要用于图像识别和分析^[20]。肺动静脉病变的分类对于评估 PE 至关重要,肺动脉血管树的变化在慢性血栓栓塞性肺动脉高压 (chronic thromboembolic pulmonary hypertension, CTEPH) 的发病中起至关重要的作用^[21-22]。采用基于胸部 CT 的三维-CNN 算法,可熟练地对动静脉血管树进行分类,从而建立组合图形切割优化结果^[23]。

2.2 EHR

EHR 是 PVD 中 AI 应用的重要数据类型,包含患者基本信息、临床表现、病史、实验室检查结果和药物使用情况等^[24]。EHR 可提供重要的流行病学数据,用于追踪 PVD 的进展,评估大流行病对 PVD 的影响,以改进筛查方法^[25]。一项基于 EHR 的研究^[26]表明,在新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 大流行期间进行的 CT 肺血管造影 (computed tomography pulmonary angiography, CTPA) 频率降低,诊断为 COVID-19 和 PE 的个体 30 d 死亡风险显著高于无 COVID-19 的个体。基于医疗索赔数据的队列研究中, Schuler 等^[27]使用 ICD-9/10 编码、CPT 编码或动脉型肺动脉高压 (arterial pulmonary hypertension, PAH) 药物来筛选 EHR 中可能患有 PAH 的病例。194 例 PAH 和 786 例“非 PAH”用于训练和测试初始的机器学习算法 (machine learning algorithms, MLA)。在测试集中,以 PAH 靶向药物使用时间和强度以及右心导管的 CPT 编码为特征的 MLA 具有较强的预测特征,可从 EHR 数据库中识别出 265 例未确诊的疑似 PAH 病例,这些病例表现出典型的 PAH 人口统计学、合并症和血流动力学特征。研究表明 NLP 有助于识别 EHR 中的 PE 患者。使用 EHR 提高了 PE 患者进行有效观察研究或随机试验的可靠性,从而促进了 PE 的监测管理和预防^[28-29],有助于根据特定风险特征精准决策,制定个体化的治疗方案。

2.3 基因组数据

基因组数据是另一种越来越多地被用于 PVD 研究的数据类型^[30]。基因检测可发现引起 PVD 风险升高的特定基因变异,或疾病的特定亚型,如 PAH^[31]。分子诊断的重点是确定潜在的致病基因,并建立其与预期表型之间的关系。由于人力的缺乏和传统算法技术的不足, AI 算法在促进基因诊断中从表型到基因

型的映射方面不可或缺^[32]。然而,由于遗传和非遗传因素之间因果关系复杂,通过 AI 进行基因型-表型映射具有挑战性^[33]。在临床基因组学中,深度学习用于分析广泛而复杂的基因组数据集^[34]。各种 AI 算法擅长处理不同类型的基因组信息。例如,计算机视觉可识别医学图像(包括病理学图片)中的表型特征,能从图像到基因进行诊断,并为分子检测提出合理的建议。AI 时间序列算法在识别大规模调控元件、基因剪

接和基因功能的功能性 DNA 序列元件方面高度有效^[35-36]。

3 AI 在 PVD 中的临床应用

表 1 总结了近年来 AI 在 PVD 诊断和治疗管理等方面的应用。AI 算法可分析 CT、磁共振成像和超声心动图等各种模式的图像,从而识别与 PVD 相关的特征。此外,AI 还能缩短图像解读时间,自动化测量肺动脉或右心房面积大小等。

表 1 AI 在 PVD 中的临床应用

作者	发表年份	数据类型	AI 算法	研究目的	研究结论
Zhang 等 ^[37]	2023	CTPA	MLA	CTPA 评估 PAP 的全自动 MLA	MLA 可准确分割肺动脉和心脏图像,并评估 PAP 参数
Kogan 等 ^[38]	2023	EHR	XGBoost	应用 EHR 开发 MLA 模型识别疑似 PH 患者	根据 EHR 开发的 MLA 模型在筛查 PH 及 PAH、CTEPH 亚组中表现良好
Fortmeier 等 ^[19]	2022	超声心动图	XGBoost	超声心动图评估重度 TR 患者的 PH	基于超声心动图的 XGBoost 算法可预测严重 TR 患者的 PH,且平均肺动脉压水平越高,经导管三尖瓣介入治疗后的死亡率越高
Schuler 等 ^[27]	2022	EHR	MLA	应用 EHR 筛查 PAH	基于临床和人口统计特征的 MLA 可准确识别 PAH
Swift 等 ^[39]	2021	CMR	MLA	基于 CMR 的 MLA 识别 PAH,使关键特征可视化	基于 CMR 的 MLA 方法可提高 PAH 的诊断准确性,并将关键特征可视化
Bauer 等 ^[40]	2021	生物标志物	MLA	基于蛋白质组生物标志物的 MLA 区分伴或不伴 PAH 的 SSc 患者	8 种蛋白质生物标志物构成的新算法可早期识别 SSc 患者的 PAH,帮助理解 SSc 患者 PAH 的发病机制

注:PAP,肺动脉压;TR:三尖瓣反流;CMR,心脏磁共振;SSc,系统性硬化。

3.1 AI 在 PE 中的临床应用

在 1993 年,马萨诸塞州总医院核医学科在通气/灌注扫描中建立了人工神经网络模型判读图像并报告,结果发现人工神经网络在诊断 PE 方面优于核医学科医师^[41]。在一项回顾性研究^[42]中,研究者运用 AI 算法(视觉分类+自然语言处理技术)分析了 11 913 例胸、腹、盆腔 CT 检查结果(包括图像和文本信息),共识别出 79 例偶发肺栓塞(incidental PE, iPE)和 49 例被漏诊的 PE。PE 患者通常以急性胸痛为主要症状,需与急性冠脉综合征、主动脉夹层等进行准确鉴别诊断。为解决这一问题,Kolossváry 等^[43]开发了一种深度学习算法,将入院胸片结合年龄、性别、心肌损伤标志物和 D-二聚体水平,改善患者分流。Batra 等^[44]在连续 2 555 个未报告 PE 的 CTPA 报告中,使用 AI 工具和人工判读,比较二者发现 iPE 的有效性。结果发现,AI 工具和人工判读的阳性预测值分别为 86.8% 和 97.3%,阴性预测值分别为 99.8% 和 99.9%。AI 工具的潜在应用能帮助检测出更多的 iPE,或可作为分流工具以便更早诊断和干预 iPE。Tian 等^[29]收集加拿大 5 个医学中心的影像学报告,将最大的单中心数据作为训练集($n = 2\ 788$),用其他 4 家中心的数据进行验证($n = 1\ 212$)。结果发现,基

于 NLP 诊断 PE 和深静脉血栓形成的灵敏度为 94%,特异度为 96%,阳性预测值为 73%~80%。NLP 可对 CTPA 报告进行自动、高度准确的回顾性分类。此外,AI 在明确 PE 患者的血栓负荷方面也有一定的价值。Liu 等^[45]发现,基于深度学习算法的 CNN 计算 CTPA 上的急性 PE 血栓负荷与 Qanadli 评分、Mastora 评分和 CTPA 上的右心室功能参数显著相关,有助于减少临床医生的工作量。

3.2 AI 在 PH 中的临床应用

PH 患者通常需多次复查影像检查,监测治疗效果。AI 技术可训练深度学习算法识别 PH 相关的特征或特定征象,避免了重复报告,极大地提高了效率。Zhang 等^[37]构建了一种机器学习模型,可从 CTPA 图像中自动提取肺动脉和心脏形态特征,随后评估肺动脉压参数,以区分不同类别的 PH,该模型对 PAH 诊断的 AUC 值略高于传统心脏磁共振模式^[39]。此外,AI 还可用于分析电子病历,以确定与 PVD 相关的特定风险因素或合并症,从而帮助制定诊疗方案。Kogan 等^[38]建立的 PH 预测模型纳入电子病历数据库中的 165 个预测特征,包括心力衰竭、呼吸急促和心房颤动。该模型在 PAH 和 CTEPH 亚组患者中表现出良好的可行性和性能。此外,将 AI 与蛋白质组学相结合可

促进对 PH 的及时识别。Bauer 等^[40]利用 MLA 对蛋白质组学进行分析,确定了一组包括胶原蛋白 IV、内生长抑素和胰岛素样生长因子结合蛋白-2 等在内的 8 种蛋白质构成的新算法,可提高系统性硬化患者 PAH 的早期诊断,为疾病的发病机制提供重要的研究思路。

4 前景与展望

随着医疗信息技术时代的到来,AI 在 PVD 中的应用具有巨大潜力。与此同时,PVD 本身的复杂性、多样性更为 AI 技术创造了大量的应用需求。AI 可有效分析各种类型的数据,包括医学影像、基因组数据和电子病历,从而提高 PVD 治疗的精确性、有效性和个性化水平。然而,AI 模型的可解释性和伦理相关问题需引起重视。未来的研究应侧重于开发可解释性更强、更透明的 AI 算法,以提高临床医生的信任度和接受度。此外,还需进行大规模的验证研究,以评估 AI 算法在临床实践中的有效性和可推广性。

参 考 文 献

- [1] Tzarova K, Morgan AE, Melendres-Groves L, et al. Imaging in pulmonary vascular disease—Understanding right ventricle-pulmonary artery coupling[J]. *Compr Physiol*, 2022, 12(4):3705-3730.
- [2] Humbert M, Kovacs G, Hoeper MM, et al. 2022 ESC/ERS Guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension[J]. *Eur Heart J*, 2022, 43(38):3618-3731.
- [3] Ho ATN, Bellamy N, Naydenov SK. Trends in mortality of acute pulmonary embolism[J]. *Semin Respir Crit Care Med*, 2021, 42(2):171-175.
- [4] Rajpurkar P, Chen E, Banerjee O, et al. AI in health and medicine[J]. *Nat Med*, 2022, 28(1):31-38.
- [5] Johnson KW, Torres Soto J, Glicksberg BS, et al. Artificial intelligence in cardiology[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2018, 71(23):2668-2679.
- [6] Hulsen T, Friedecky D, Renz H, et al. From big data to better patient outcomes[J]. *Clin Chem Lab Med*, 2022, 61(4):580-586.
- [7] Kaplan A, Cao H, FitzGerald JM, et al. Artificial intelligence/machine learning in respiratory medicine and potential role in asthma and COPD diagnosis[J]. *J Allergy Clin Immunol Pract*, 2021, 9(6):2255-2261.
- [8] Darcy AM, Louie AK, Roberts LW. Machine learning and the profession of medicine[J]. *JAMA*, 2016, 315(6):551-552.
- [9] Jalamangala Shivananjaiyah SK, Kumari S, Majid I, et al. Predicting near-term glaucoma progression: an artificial intelligence approach using clinical free-text notes and data from electronic health records[J]. *Front Med (Lausanne)*, 2023, 10:1157016.
- [10] Sagheb E, Wi CI, Yoon J, et al. Artificial intelligence assesses clinicians' adherence to asthma guidelines using electronic health records[J]. *J Allergy Clin Immunol Pract*, 2022, 10(4):1047-1056.
- [11] McMaster C, Bird A, Liew DFL, et al. Artificial intelligence and deep learning for rheumatologists[J]. *Arthritis Rheumatol*, 2022, 74(12):1893-1905.
- [12] Khosravi B, Rouzrokh P, Erickson BJ. Getting more out of large databases and EHRs with natural language processing and artificial intelligence; the future is here[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2022, 104(suppl 3):51-55.
- [13] Jiang F, Jiang Y, Zhi H, et al. Artificial intelligence in healthcare: past, present and future[J]. *Stroke Vasc Neurol*, 2017, 2(4):230-243.
- [14] Elkin PL, Mullin S, Mardekian J, et al. Using artificial intelligence with natural language processing to combine electronic health record's structured and free text data to identify nonvalvular atrial fibrillation to decrease strokes and death: evaluation and case-control study[J]. *J Med Internet Res*, 2021, 23(11):e28946.
- [15] Johns CS, Wild JM, Rajaram S, et al. Current and emerging imaging techniques in the diagnosis and assessment of pulmonary hypertension[J]. *Expert Rev Respir Med*, 2018, 12(2):145-160.
- [16] Kirby M, Smith BM. Quantitative CT scan imaging of the airways for diagnosis and management of lung disease[J]. *Chest*, 2023, 164(5):1150-1158.
- [17] Dwivedi K, Sharkey M, Condliffe R, et al. Pulmonary hypertension in association with lung disease: quantitative CT and artificial intelligence to the rescue? State-of-the-art review[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2021, 11(4):679.
- [18] Watadani T, Sakai F, Johkoh T, et al. Interobserver variability in the CT assessment of honeycombing in the lungs[J]. *Radiology*, 2013, 266(3):936-944.
- [19] Fortmeier V, Lachmann M, Körber MI, et al. Solving the pulmonary hypertension paradox in patients with severe tricuspid regurgitation by employing artificial intelligence[J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2022, 15:381-394.
- [20] Sollini M, Antunovic L, Chiti A, et al. Towards clinical application of image mining: a systematic review on artificial intelligence and radiomics[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2019, 46(13):2656-2672.
- [21] Zhou C, Chan HP, Sahiner B, et al. Automatic multiscale enhancement and segmentation of pulmonary vessels in CT pulmonary angiography images for CAD applications[J]. *Med Phys*, 2007, 34(12):4567-4577.
- [22] Otani N, Watanabe R, Tomoe T, et al. Pathophysiology and treatment of chronic thromboembolic pulmonary hypertension[J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24(4):3979.
- [23] Nardelli P, Jimenez-Carretero D, Bermejo-Pelaez D, et al. Pulmonary artery-vein classification in CT images using deep learning[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2018, 37(11):2428-2440.
- [24] Bellasi A, Raggi P. What electronic health records can and cannot tell us in the era of big data[J]. *Atherosclerosis*, 2022, 358:55-56.
- [25] Knight R, Walker V, Ip S, et al. Association of COVID-19 with major arterial and venous thrombotic diseases: a population-wide cohort study of 48 million adults in England and Wales[J]. *Circulation*, 2022, 146(12):892-906.
- [26] Tilliridou V, Kirkbride R, Dickinson R, et al. Pulmonary embolism severity before and during the COVID-19 pandemic[J]. *Br J Radiol*, 2021, 94(1123):20210264.
- [27] Schuler KP, Hemnes AR, Annis J, et al. An algorithm to identify cases of pulmonary arterial hypertension from the electronic medical record[J]. *Respir Res*, 2022, 23(1):138.
- [28] Bikdeli B, Lo YC, Khairani CD, et al. Developing validated tools to identify pulmonary embolism in electronic databases: rationale and design of the PE-EHR + study[J]. *Thromb Haemost*, 2023, 123(6):649-662.
- [29] Tian Z, Sun S, Eguale T, et al. Automated extraction of VTE events from narrative radiology reports in electronic health records: a validation study[J]. *Med Care*, 2017, 55(10):e73-e80.
- [30] Krebs K, Milani L. Harnessing the power of electronic health records and genomics for drug discovery[J]. *Annu Rev Pharmacol Toxicol*, 2023, 63:65-76.
- [31] Southgate L, Machado RD, Gräf S, et al. Molecular genetic framework underlying pulmonary arterial hypertension[J]. *Nat Rev Cardiol*, 2020, 17(2):85-95.
- [32] Liang H, Tsui BY, Ni H, et al. Evaluation and accurate diagnoses of pediatric diseases using artificial intelligence[J]. *Nat Med*, 2019, 25(3):433-438.
- [33] Lello L, Avery SC, Tellier L, et al. Accurate genomic prediction of human height[J]. *Genetics*, 2018, 210(2):477-497.
- [34] Dias R, Torkamani A. Artificial intelligence in clinical and genomic diagnostics[J]. *Genome Med*, 2019, 11(1):70.
- [35] Jaganathan K, Kyriazopoulou Panagiotopoulou S, McRae JF, et al. Predicting splicing from primary sequence with deep learning[J]. *Cell*, 2019, 176(3):535-548. e24.

- 中华结核和呼吸杂志, 2022, 45(8):813-818.
- [11] Xu Z, Zhang H, Zhang C, et al. Association between genotype, presentation, and outcome in childhood idiopathic and hereditary pulmonary arterial hypertension [J]. *J Clin Med*, 2022, 11(24):7331.
- [12] Ishizuka M, Zou W, Whalen E, et al. Hereditary pulmonary arterial hypertension burden in pediatrics: a single referral center experience [J]. *Front Pediatr*, 2023, 11:1050706.
- [13] Zhang HS, Liu Q, Piao CM, et al. Genotypes and phenotypes of Chinese pediatric patients with idiopathic and heritable pulmonary arterial hypertension—A single-center study [J]. *Can J Cardiol*, 2019, 35(12):1851-1856.
- [14] Zhang X, Zhang C, Li Q, et al. TGF- β receptor mutations and clinical prognosis in Chinese pediatric patients with idiopathic/hereditary pulmonary arterial hypertension [J]. *Pulm Circ*, 2022, 12(2):e12076.
- [15] 中华医学会儿科学分会新生儿学组, 中华儿科杂志编辑委员会. 早产儿支气管肺发育不良临床管理专家共识 [J]. *中华儿科杂志*, 2020, 58(5):358-365.
- [16] Zani A, Chung WK, Deprest J, et al. Congenital diaphragmatic hernia [J]. *Nat Rev Dis Primers*, 2022, 8(1):37.
- [17] Rosenzweig EB, Bates A, Mullen MP, et al. Cardiac catheterization and hemodynamics in a multicenter cohort of children with pulmonary hypertension [J]. *Ann Am Thorac Soc*, 2022, 19(6):1000-1012.
- [18] Hansmann G, Sallmon H, Roehr CC, et al. Pulmonary hypertension in bronchopulmonary dysplasia [J]. *Pediatr Res*, 2021, 89(3):446-455.
- [19] Ingram DG, Singh AV, Ehsan Z, et al. Obstructive sleep apnea and pulmonary hypertension in children [J]. *Paediatr Respir Rev*, 2017, 23:33-39.
- [20] Maloney MA, Ward SLD, Su JA, et al. Prevalence of pulmonary hypertension on echocardiogram in children with severe obstructive sleep apnea [J]. *J Clin Sleep Med*, 2022, 18(6):1629-1637.
- [21] Platt C, Longthorpe C, Sit J, et al. Pulmonary hypertension in juvenile-onset systemic lupus erythematosus: a case series [J]. *Clin Exp Rheumatol*, 2023, 41(9):1934-1939.
- [22] 邢燕, 宋红梅, 吴晓燕, 等. 小儿结缔组织病并发的肺动脉高压临床分析 [J]. *中华儿科杂志*, 2008, 46(11):822-826.
- [23] 朱佳, 包敏, 刘小惠, 等. 儿童风湿病合并肺动脉高压随访及预后分析 [J]. *中华实用儿科临床杂志*, 2022, 37(24):1873-1878.
- [24] 李东晓, 张尧, 张宏武, 等. 高同型半胱氨酸血症的诊断、治疗与预防专家共识 [J]. *罕少疾病杂志*, 2022, 29(6):1-4.
- [25] Gupta A, Kabra M, Gupta N, et al. Combined methylmalonic aciduria and homocystinuria presenting as pulmonary hypertension [J]. *Indian J Pediatr*, 2021, 88(12):1244-1246.
- [26] Humbert M, Labrune P, Simonneau G. Severe pulmonary arterial hypertension in type I glycogen storage disease [J]. *Eur J Pediatr*, 2002, 161(suppl 1):S93-S96.
- [27] Shindo A, Ueda K, Minatsuki S, et al. Novel *AGL* variants in a patient with glycogen storage disease type III b and pulmonary hypertension caused by pulmonary veno-occlusive disease: a case report [J]. *Front Genet*, 2023, 14:1148067.
- [28] Yang C, Niu D, Jeng M, et al. Late-onset Pompe disease with left-sided bronchomalacia [J]. *Respir Care*, 2015, 60(2):e26-e29.
- [29] Li HP, Xie WM, Huang X, et al. Pulmonary hypertension in glycogen storage disease type II [J]. *Chin Med J(Engl)*, 2018, 131(11):1375-1376.
- [30] Vaksman G, Nelken B, Deshildre A, et al. Pulmonary arterial occlusive disease following chemotherapy and bone marrow transplantation for leukaemia [J]. *Eur J Pediatr*, 2002, 161(5):247-249.
- [31] 郭秋霞, 张美玉, 王吉刚. 单倍型造血干细胞移植后血栓性微血管病致肺动脉高压一例并文献复习 [J]. *中华血液学杂志*, 2020, 41(2):164-166.
- [32] 陈静, 顾龙君, 汤静燕, 等. 自身造血干细胞移植治疗儿童晚期恶性实体肿瘤 [J]. *中华儿科杂志*, 2004, 42(12):924-927.
- [33] Limsuwan A, Pakakasama S, Hongeng S. Reversible course of pulmonary arterial hypertension related to bone marrow transplantation [J]. *Heart Vessels*, 2011, 26(5):557-561.
- [34] Levy M, Moshous D, Szezepanski I, et al. Pulmonary hypertension after bone marrow transplantation in children [J]. *Eur Respir J*, 2019, 54(5):1900612.
- [35] 李强强, 顾虹. 儿童肺动脉高压治疗进展 [J]. *中国合理用药探索*, 2022, 19(5):1-6.

收稿日期:2023-12-29

(上接第 6 页)

- [36] Wang J, Cao H, Zhang JZH, et al. Computational protein design with deep learning neural networks [J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1):6349.
- [37] Zhang N, Zhao X, Li J, et al. Machine learning based on computed tomography pulmonary angiography in evaluating pulmonary artery pressure in patients with pulmonary hypertension [J]. *J Clin Med*, 2023, 12(4):1297.
- [38] Kogan E, Didden EM, Lee E, et al. A machine learning approach to identifying patients with pulmonary hypertension using real-world electronic health records [J]. *Int J Cardiol*, 2023, 374:95-99.
- [39] Swift AJ, Lu H, Uthoff J, et al. A machine learning cardiac magnetic resonance approach to extract disease features and automate pulmonary arterial hypertension diagnosis [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2021, 22(2):236-245.
- [40] Bauer Y, de Bernard S, Hickey P, et al. Identifying early pulmonary arterial hypertension biomarkers in systemic sclerosis: machine learning on proteomics from the DETECT cohort [J]. *Eur Respir J*, 2021, 57(6):2002591.
- [41] Scott JA, Palmer EL. Neural network analysis of ventilation-perfusion lung scans [J]. *Radiology*, 1993, 186(3):661-664.
- [42] Wildman-Tobriner B, Ngo L, Mammarrappalli JG, et al. Missed incidental pulmonary embolism: harnessing artificial intelligence to assess prevalence and improve quality improvement opportunities [J]. *J Am Coll Radiol*, 2021, 18(7):992-999.
- [43] Kolossvry M, Raghu VK, Nagurney JT, et al. Deep learning analysis of chest radiographs to triage patients with acute chest pain syndrome [J]. *Radiology*, 2023, 306(2):e221926.
- [44] Batra K, Xi Y, Al-Hreish KM, et al. Detection of incidental pulmonary embolism on conventional contrast-enhanced chest CT: comparison of an artificial intelligence algorithm and clinical reports [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2022, 219(6):895-902.
- [45] Liu W, Liu M, Guo X, et al. Evaluation of acute pulmonary embolism and clot burden on CTPA with deep learning [J]. *Eur Radiol*, 2020, 30(6):3567-3575.

收稿日期:2023-11-23