

脉搏血氧仪在急性呼吸窘迫综合征诊断相关研究进展

孙建¹ 刘晓琴^{2*}

1. 青海大学 临床医学院 青海西宁 810000

2. 青海省人民医院 重症医学科 青海西宁 810000

摘要: 脉搏血氧仪 (Pulse Oximeter) 利用分光光度法的原理来量化血液中的氧合血红蛋白量, 可以连续无创的监测动脉血氧饱和度^[9]。急性呼吸窘迫综合征 (Acute respiratory distress syndrome, ARDS) 是重症患者呼吸衰竭的常见病因, 临床上常表现为呼吸窘迫和顽固性低氧血症^[2]。随着急性呼吸窘迫综合征全球新定义的发表, 目前脉搏血氧仪指标 (例如脉搏血氧饱和度与氧浓度之比 (SpO_2/FiO_2)) 可用于ARDS患者的诊断和风险评估。该文主要从脉搏血氧仪的历史演进、工作原理、目前存在的优略、急性呼吸窘迫综合征的历史演进及当下治疗现状这几方面进行综述, 并对未来研究方向提出展望。

关键词: 脉搏血氧仪; 急性呼吸窘迫综合征; 诊断标准

引言

急性呼吸窘迫综合征 (Acute respiratory distress syndrome, ARDS) 是一种急性、弥漫性、炎症性肺损伤, 由肺炎、感染、创伤、输血、烧伤、误吸或休克等易感因素诱发^[1]。是重症监护病房 (ICU) 常见的危重呼吸道疾病。ARDS急性期的形态学特征是弥漫性肺泡损伤 (如水肿、炎症、透明膜形成或出血)^[2]。其具有很高的发病率和死亡率, 住院死亡率为35%–40%^[3]。ARDS全球新定义正式采用脉搏血氧饱和度与氧浓度之比值 (SpO_2/FiO_2) 作为动脉氧分压与氧浓度之比 (PaO_2/FiO_2) 的替代指标以满足ARDS中低氧血症的诊断标准, 脉搏血氧仪应用于ARDS的诊断和管理, 可以促进全世界对ARDS的更多和更早的认识, 从而促进ARDS患者的早期识别和治疗^[4]。ARDS患者的临床治疗和护理占用大量的医疗资源, 增加了患者家庭和社会的经济负担。在这篇综述中我们探究脉搏血氧仪在急性呼吸窘迫综合征诊断中应用的相关研究进展, 进一步明确ARDS患者的早期诊断和治疗, 从而缩减其在重症医学科的治疗时间, 减轻患者家庭及社会负担, 并为后续研究提供参考。

***基金项目:** 青海省人民医院-苏州大学联合培养高层次卫生人才项目专项课题 (2025-qhsrmyysd-04)

作者简介: 孙建 (1997-), 男, 硕士研究生, 规培医师, 研究方向: 重症医学。

通讯作者: 刘晓琴, 副主任医师, 硕士生导师。

一、脉搏血氧仪

(一) 脉搏血氧仪的历史演变

1974年3月29日, 日本光电公司向日本专利局提交了一份名为“光度血液分析仪”的专利申请^[5], 世界第一台现代脉搏血氧仪诞生。在脉搏血氧仪诞生前, J. R. Squire (伦敦, 1940年) 是第一个意识到用压力袖带从手掌中排出血液之前和之后红光和红外光透射率的差异与饱和度有关的人, 气动组织压缩引起的红光和红外光传输变化允许计算饱和度^[6]。1949年, Wood利用这一想法, 根据耳血氧仪中光密度随压力变化的比值连续计算绝对饱和度。脉搏血氧仪的诞生使医护人员开始连续、无创、安全的监测患者动脉血氧饱和度, 但此时医护人员对其基本原理和相关局限性了解甚少^[7]。1999年JAMES E. SINEX^[7]回顾了脉搏血氧仪的原理, 着重于认识到这种工具的局限性。脉氧仪的局限主要体现在三方面: 校准假设、光学干扰和信号伪影。信号伪影被认为是导致错误和误报的重要原因, 在1990年代, 脉搏血氧仪中采用了几种信号处理技术, 试图减少运动伪影。Masimo信号提取技术 (SETTM) 就是这样一种技术^[8]。2015年Amal Jubran^[9]再次对脉搏血氧仪的应用与存在的问题进行了进一步的阐述, 发现更多的局限性因素: 静脉注射染料 (用于诊断目的)、低灌注状态 (即低心输出量、血管收缩和低体温)、镰状细胞性贫血患者脉搏血氧测定读数不准确。此时脉搏血氧仪已普遍用于监测重症监护机构中的氧饱和度。通过预先警告临床医生患者存在低氧血症,

针对低氧血症临床医生给予相关处理,从而避免患者产生严重的并发症。在今年 Davide Chiumello 等人^[10]的一项关于 ARDS 患者心肺监测研究中再次明确脉搏血氧仪测量血氧饱和度是评估患者动脉氧饱和度的一种有效、低成本、无创的替代方案。对患有 ARDS 的患者进行仔细的心肺监测对于改善预后和通过机械通气支持制定治疗方案至关重要。

在脉搏血氧仪出现的这五十余年中,研究者对其应用及局限进行了更深的发掘,逐步完善脉搏血氧仪的精准性和可适用范围,研究出后续不同类型的脉搏血氧仪,对于 ARDS 患者的诊断提供了更便捷的诊断思路,也有机会在综合征的早期阶段识别患者,并识别 ARDS 的其他表型,并使研究人群更好地与临床实践相结合^[4],为医学事业的发展打下更稳固的基础。

(二) 脉搏血氧仪的原理

脉搏血氧仪的原理与光谱分析相同:通过溶液中成分独特的光吸收特性对其进行检测和定量。脉搏血氧仪探头中的两个 LED 分别通过皮肤血管床(例如手指或耳垂的血管床)发出特定波长的光。远端的光电二极管检测器测量每个波长的透射光强度,从而可以得出血氧饱和度。通过每秒测量数百次透射光,脉搏血氧仪能够区分动脉血的可变脉动分量(可称为交流信号或 AC)与由组织、静脉血和非脉动动脉血组成的信号不变的静态分量(即直流信号或 DC)。红光信号(AC 660nm/DC 660nm)与红外信号(AC 940nm/DC 940nm)的比值反映了还原血红蛋白与氧合血红蛋白的相似比值,然后可以将其转换为氧饱和度^[7]。脉搏血氧仪的发现及完善离不开技术水平的发展及一代代临床工作者对治疗理念的不断更新,脉搏血氧仪对重症监护室的模式发展产生了深刻的影响。

(三) 脉搏血氧仪的优略

在急性呼吸窘迫综合征的全球新定义公布之前,需要测量动脉血氧分压(PaO_2)与 FiO_2 的比值来满足 ARDS 诊断的低氧血症标准,然而,动脉血气分析是侵入性的,成本高昂,在许多资源有限的环境中无法实现。相比之下,脉搏血氧仪可以持续使用、准确、廉价且无创,并且所需的设备或专业知识很少。脉搏血氧仪广泛用于重症患者的临床监测和决策,它具有持续可用、非侵入性、易于解读、易于在各个护理环境中使用等特点。但是碳氧血红蛋白、高铁血红蛋白、糖化血红蛋白、镰状细胞病、灌注不良状态、酸血症、指甲油和运动伪影都会影

响脉搏血氧饱和度的准确性^{[4][11][12]}。一些针对危重患者的研究发现,酸血症会降低根据 SpO_2 估算 SaO_2 的准确性^[13]。对于血氧饱和度高于97%时准确度会降低,并且皮肤色素沉着较深的患者准确度可能会降低^[4]。

明确脉搏血氧仪的优略,有利于我们在临床工作中实时判断危重症患者目前动脉血氧合状态(患者是否缺氧),准确判读氧饱和和读数是否精准,是否立即给予无创机械通气纠正患者氧合水平,在这方面,血氧仪是一种极好的工具。在紧急情况下,通过持续监测,脉搏血氧仪可以快速检测缺氧的进展并反映治疗效果。

二、急性呼吸窘迫综合征

(一) 急性呼吸窘迫综合征诊断定义的发展

急性呼吸窘迫综合征(ARDS)这个概念的于1967年 Ashbaugh 等^[14]首次提出,报道的12名患者的呼吸窘迫综合征表现为急性发作的呼吸急促、缺氧和各种刺激后的顺应性丧失;但局限在于早期对所涉及的病理生理学缺乏了解,对各种药物、呼吸器和液体疗法进行临床试验后——其中一些价值值得怀疑例如抗生素、间歇性正压通气,而另一些似乎有益,例如洋地黄、静脉注射盐酸妥拉唑林、皮质类固醇。1994年,欧美共识会议(American-European Consensus Conference, AECC)使急性肺损伤(acute lung injury, ALI)和 ARDS 的定义更加清晰统一^[15]。人们认为 ARDS 一词应保留用于此类疾病中最严重的一端。因此,所有患有 ARDS 的患者都患有 ALI,但并非所有患有 ALI 的患者都患有 ARDS。ALI 诊断标准:①急性起病;②动脉氧分压/吸入氧分数($\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$) <300 mmHg(不考虑 PEEP 水平);③胸部 X 射线片示双肺弥漫性渗出;④肺毛细血管楔嵌(pulmonary capillary wedge pressure, PCWP) <18 mmHg 或没有左心房高压的证据。如 $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2 \leq 200$ mmHg,则为 ARDS。该标准的不足在于:对起病时间没有限定,定义致病事件的时间过程(致病事件肯定有顺序,时间过程对于理解整个过程至关重要),且未考虑呼吸机 PEEP 及氧浓度对氧合的影响。2012年提出了 ARDS 的柏林定义^[16]:(1)明确了起病时间:对于被定义为 ARDS 的患者,发病必须在已知的临床损伤或新的或恶化的呼吸道症状的1周内;(2)考虑到肺动脉导管的使用减少,以及以心力衰竭或液体超载形式出现的静压性水肿可能与 ARDS 共存,因此,肺动脉楔压标准从定义中删除了;(3)胸部影像学:双侧浸润影,不能用积液、肺不张或结节来完全解释;(4)通过 $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ 的不同将其分为

轻、中、重3个独立类别,更有助于病例严重程度的识别。该定义的局限性在于:胸部X射线摄影和CT在某些临床环境中不可用;在没有机械通气条件的地方,无法满足其对无创或有创通气的要求;无创通气(noninvasive ventilation, NIV)或高流量氧疗(high-flow nasal cannula oxygen therapy, HFNC)的患者中,准确的 FiO_2 很难确定;超声等新技术的引入并未明确。2007年, Todd W. Rice, MD等人的^[17]一项实验研究中选中672人(采用较低潮气量呼吸机策略的患者)的 SpO_2 (值 $<97\%$)和 PaO_2 的相应测量值进行比较,以确定S/F和P/F之间的关系。确定了与P/F比200(ARDS)和300(ALI)相关的S/F阈值,首次将脉搏血氧饱和度作为评估ARDS诊断中低氧血症标准的替代指标^[17]。随着多项进展支持了扩展该定义的必要性,包括使用高流量鼻氧、扩大使用脉搏血氧仪代替动脉血气、使用超声进行胸部成像,以及需要在资源有限的环境中如何适用该定义^[1]。2023年7月,ARDS全球新定义正式上线美国呼吸与危重症医学杂志,全球新定义对柏林定义存在的问题给予明确处理,提出了四项主要建议:1)包括经鼻高流量氧疗,最低流量为 >30 L/min;2)使用 $PaO_2: FiO_2 < 300$ mmHg或脉搏血氧仪测得的氧饱和度 $SpO_2: FiO_2 < 315$ (如果脉搏血氧仪测得的氧饱和度 $<97\%$)来识别低氧血症;3)保留双侧不透明度作为成像标准,但添加超声作为成像方式,尤其是在资源有限的地区;4)在资源有限的环境中,不需要呼气末正压、氧气流量或特定的呼吸支持设备^[1]。全球新定义调整了校正公式,如果海拔为 >1000 m,则应用以下校正系数: $(PaO_2 \text{ 或 } SpO_2) / FiO_2 \times (\text{气压} / 760)$ ^[1]。在没有胸片或CT的情况下有证据表明,如果操作者受过检测双侧实变和非心源性肺水肿的培训,超声是可靠的,这种方法在资源有限的地区尤其有价值^[1]。脉搏血氧仪是扩大资源可变环境中ARDS和其他危重疾病的及时诊断、管理和研究的绝佳工具^[4],通过使用脉搏血氧饱和度测量进行筛查和诊断,增加和更早地识别ARDS可能有利于临床试验的开展^[18]。目前针对ARDS的干预措施(例如低潮气量通气)不太可能因为 SpO_2/FiO_2 比值被错误分类从而对ARDS的患者造成伤害^[19]。将脉搏血氧仪应用于ARDS的诊断和管理,包括正式采用 SpO_2/FiO_2 比值作为 PaO_2/FiO_2 的替代以满足ARDS中低氧血症的诊断标准,促进全世界对ARDS的更多和更早的认识,从而促进临床实践和研究^[4]。

综上,脉搏血氧仪是21世纪ARDS定义、研究和

管理不可或缺的工具^[4]。ARDS全球新定义的公布,使ARDS的诊断管理不再局限于医疗发达的地区,对患者低氧血症的判断也不再仅仅依赖动脉血气的结果。该定义必将推动医学重要领域的进步。

(二)全球新定义下ARDS的治疗现状

ARDS概念的提出距今已57年,当前ARDS的治疗除积极处理原发病外仍然是以支持治疗为主^[20]。ARDS治疗中糖皮质激素的作用一直存在争议,在ARDS发作两周后开始使用甲基强的松龙治疗可能会有害^[21]。在ARDS的纤维化期,适当使用糖皮质激素可能有助于减轻肺纤维化。对于病程较长(如超过2-3周)、存在肺纤维化倾向(通过肺部影像学检查发现有纤维化迹象,如肺间质增厚、网格状改变等)的患者,在严格控制感染的情况下,小剂量(如甲基强的松龙每日0.5-1 g)、短疗程(如3-5 d)使用糖皮质激素可能有一定益处^[22]。一项关于吸入一氧化碳(iNO)对新冠相关性ARDS患者结果影响的研究表明,外源性吸入一氧化碳对改善氧合作用能起到一定帮助,但无法降低ALI/ARDS的死亡率^[23]。研究发现,急性呼吸窘迫综合征(ARDS)患者进行有创通气期间,6ml/kg预测体重的潮气量可保护患者的肺^[24]。在较高水平的呼气末正压(PEEP)可以防止肺泡塌陷,减少呼吸机引起的肺损伤^[25]。俯卧位通气不仅可以改善氧合促进肺复张,还可以降低患者病死率和机械通气时间^[26]。由于ARDS患者对治疗反应存在明显的个体差异性的内在原因,这些治疗没有显示额外的益处,仍需要进一步的研究和数据确认其推荐级别。

三、展望

在对ARDS定义的不断修订和该疾病认识的几十年中,我们取得了不断地进步,但该病住院死亡率仍然高。在2020年的一项大型跨国研究中,临床医生未能在40%的患者中识别出ARDS,并且在首次满足ARDS标准时仅识别出三分之一的患者^[27],未来我们需要探索新的治疗方法,进一步加强临床工作者对于该疾病的认知。脉搏血氧仪在ARDS患者的早期识别诊断中做出了重要的贡献。全球约有2%的人口生活在海拔1500米以上的地区,在那里,低气压、低氧水平、严寒和干燥的条件、强辐射以及气候变化的影响构成了重大的健康挑战^[28]。研究表明,随着海拔的升高,大气压力和吸入氧气的分压降低^[29],海拔 >1500 m的患者的氧分压(PaO_2)和动脉血氧饱和度(SaO_2)值明显低于平原地区同年龄组健康成年人^[28],并且高原缺氧是影响ARDS进展的一个因素^[29]。

一些研究建立了海拔2600 m有创机械通气患者 SpO_2/FiO_2 与 PaO_2/FiO_2 的相关性及有效性^[30],但对于生活在1500m以上的有创机械通气患者,没有研究建立单一的 SpO_2/FiO_2 值与给定的 PaO_2/FiO_2 相对应,我们未来可能需要验证不同海拔水平的ARDS患者的P/F与S/F是否满足全球新定义中的高海拔校准公式。

参考文献

- [1]Matthay M A, Arabi Y, Arroliga A C, et al. A new global definition of acute respiratory distress syndrome[J]. American journal of respiratory and critical care medicine, 2024, 209(1): 37–47.
- [2]Ranieri V M, Rubenfeld G D, Taylor Thompson B, et al. Acute respiratory distress syndrome: the Berlin Definition[J]. JAMA: Journal of the American Medical Association, 2012, 307(23).
- [3]Brown S M, Grissom C K, Moss M, et al. Nonlinear imputation of PaO_2/FiO_2 from SpO_2/FiO_2 among patients with acute respiratory distress syndrome[J]. Chest, 2016, 150(2): 307–313.
- [4]Wick K D, Matthay M A, Ware L B. Pulse oximetry for the diagnosis and management of acute respiratory distress syndrome[J]. The Lancet Respiratory Medicine, 2022, 10(11): 1086–1098.
- [5]Severinghaus J W. Takuo Aoyagi: discovery of pulse oximetry[J]. Anesthesia & Analgesia, 2007, 105(6): S1–S4.
- [6]Squire J R. Instrument for measuring quantity of blood and its degree of oxygenation in web of the hand[J]. Clin Sci, 1940, 4: 331–339.
- [7]Sinex J E. Pulse oximetry: principles and limitations[J]. The American journal of emergency medicine, 1999, 17(1): 59–66.
- [8]Pollard V, Prough D S. Signal extraction technology: a better mousetrap?[J]. Anesthesia & Analgesia, 1996, 83(2): 213–214.
- [9]Amal J .Pulse oximetry.[J].Critical care (London, England),2015,19(1):272.
- [10]Chiumello D, Fioccola A. Recent advances in cardiorespiratory monitoring in acute respiratory distress syndrome patients[J]. Journal of Intensive Care, 2024, 12(1): 17.
- [11]Chan E D, Chan M M, Chan M M. Pulse oximetry: understanding its basic principles facilitates appreciation of its limitations[J]. Respiratory medicine, 2013, 107(6): 789–799.
- [12]Pilcher J, Ploen L, McKinstry S, et al. A multicentre prospective observational study comparing arterial blood gas values to those obtained by pulse oximeters used in adult patients attending Australian and New Zealand hospitals[J]. BMC pulmonary medicine, 2020, 20: 1–9.
- [13]Wilson B J, Cowan H J, Lord J A, et al. The accuracy of pulse oximetry in emergency department patients with severe sepsis and septic shock: a retrospective cohort study[J]. BMC emergency medicine, 2010, 10: 1–6.
- [14]Ashbaugh D G, Bigelow D B, Petty T L, et al. Acute respiratory distress in adults[J]. The Lancet, 1967, 290(7511): 319–323.
- [15]Bernard G R, Artigas A, Brigham K L, et al. The American–European Consensus Conference on ARDS. Definitions, mechanisms, relevant outcomes, and clinical trial coordination[J]. American journal of respiratory and critical care medicine, 1994, 149(3): 818–824.
- [16]Ranieri V M, Rubenfeld G D, Taylor Thompson B, et al. Acute respiratory distress syndrome: the Berlin Definition[J]. JAMA: Journal of the American Medical Association, 2012, 307(23).
- [17]Rice T W, Wheeler A P, Bernard G R, et al. Comparison of the SpO_2/FiO_2 ratio and the PaO_2/FiO_2 ratio in patients with acute lung injury or ARDS[J]. Chest, 2007, 132(2): 410–417.
- [18]Schmidt M F S, Gernand J, Kakarala R. The use of the pulse oximetric saturation to fraction of inspired oxygen ratio in an automated acute respiratory distress syndrome screening tool[J]. Journal of critical care, 2015, 30(3): 486–490.
- [19]Simonis F D, Neto A S, Binnekade J M, et al. Effect of a low vs intermediate tidal volume strategy on ventilator-free days in intensive care unit patients without ARDS: a randomized clinical trial[J]. Jama, 2018, 320(18): 1872–1880.
- [20]罗薇薇, 黄添姘, 张召才.急性呼吸窘迫综合征相关临床研究: 现状与挑战[J/OL].武汉大学学报(医学版), 1–7[2024–12–24].<https://doi.org/10.14188/j.1671-8852.2024.0493>.
- [21]National Heart, Lung, and Blood Institute Acute Respiratory Distress Syndrome (ARDS) Clinical Trials

Network. Efficacy and safety of corticosteroids for persistent acute respiratory distress syndrome[J]. *New England Journal of Medicine*, 2006, 354(16): 1671–1684.

[22]金发光, 陈键, 赵淇. 急性呼吸窘迫综合征基础研究与临床救治新进展[J/OL]. *空军军医大学学报*, 1–10[2025-01-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1526.R.20241118.1329.002.html>.

[23]Stoll S E, Böttiger B W, Dusse F, et al. Impact of Inhaled Nitric Oxide (iNO) on the Outcome of COVID-19 Associated ARDS[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2024, 13(19): 5981.

[24]Wanzala J N, Atim M R, Obungoloch J. Design of fuzzy logic-based ARDS Berlin definition for ventilator adjustments to ensure lung protection[J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2023, 25(5): 1935–1951.

[25]National Heart, Lung, and Blood Institute ARDS Clinical Trials Network. Higher versus lower positive end-expiratory pressures in patients with the acute respiratory distress syndrome[J]. *New England Journal of Medicine*, 2004, 351(4): 327–336.

[26]Ferrando C, Suarez-Sipmann F, Mellado-Artigas R,

et al. Clinical features, ventilatory management, and outcome of ARDS caused by COVID-19 are similar to other causes of ARDS[J]. *Intensive care medicine*, 2020, 46: 2200–2211.

[27]Adams J Y, Rogers A J, Schuler A, et al. Association between peripheral blood oxygen saturation (SpO₂)/fraction of inspired oxygen (FiO₂) ratio time at risk and hospital mortality in mechanically ventilated patients[J]. *The Permanente Journal*, 2020, 24.

[28]Guo L, Sun J, He Z, et al. Understanding Acute Respiratory Distress Syndrome in High-Altitude environments: a comprehensive review of diagnosis and treatment[J]. *Medical Science Monitor: International Medical Journal of Experimental and Clinical Research*, 2023, 29: e939935–1.

[29]Liu X, Pan C, Si L, et al. Definition of acute respiratory distress syndrome on the plateau of Xining, Qinghai: A verification of the Berlin Definition altitude-PaO₂/FiO₂-corrected criteria[J]. *Frontiers in Medicine*, 2022, 9: 648835.

Ortiz G, Bastidas A, Garay-Fernández M, et al. Correlation and validity of imputed PaO₂/FiO₂ and SpO₂/FiO₂ in patients with invasive mechanical ventilation at 2600 m above sea level[J]. *Medicina intensiva*, 2022, 46(9): 501–507.