

体外二氧化碳清除技术在呼吸危重症中的临床应用进展

王振红 冀霞 陈成艳 潘凤娜 刘长青 魏莉

临沂市人民医院呼吸重症监护病房, 山东临沂 276000

通信作者: 魏莉, Email: weil68219@163.com

【摘要】 体外二氧化碳清除技术(ECCO₂R)是一种新兴的体外生命支持手段,通过高效清除血液中的二氧化碳(CO₂),显著降低机械通气需求,从而减少呼吸机相关性肺损伤(VILI)。近年来, ECCO₂R 在急性呼吸窘迫综合征(ARDS)、慢性阻塞性肺疾病急性加重(AECOPD)、终末期肺病围术期支持,以及特殊病理状态(如哮喘持续状态、肺创伤)中的应用表现出重要临床价值。然而,该技术的广泛应用受到适应证选择、并发症管理(如出血与血栓形成)及经济成本等方面的限制。此外,关于 ECCO₂R 对患者长期预后及病死率的影响,现有研究尚存争议。本综述系统梳理了 ECCO₂R 在呼吸危重症中的应用现状和研究进展,分析其临床优势与不足,并探讨未来研究方向,以期对 ECCO₂R 的应用与研究提供参考。

【关键词】 体外二氧化碳清除技术; 呼吸危重症; 研究进展

DOI: 10.3969/j.issn.1008-9691.2026.04.023

Progress in the clinical application of extracorporeal carbon dioxide removal in respiratory critical illness

Wang Zhenhong, Ji Xia, Chen Chengyan, Pan Fengna, Liu Changqing, Wei Li

Department of Respiratory Intensive Care Unit, Linyi People's Hospital, Linyi 276000, Shandong, China

Corresponding author: Wei Li, Email: weil68219@163.com

【Abstract】 Extracorporeal carbon dioxide removal (ECCO₂R) is an emerging extracorporeal life support techniques that significantly reduces the need for mechanical ventilation by efficiently removing carbon dioxide from the blood thereby mitigating ventilator-associated lung injury (VALI). In recent years, the use of ECCO₂R in acute respiratory distress syndrome, acute exacerbation of chronic obstructive pulmonary disease, perioperative support for end-stage lung disease, as well as in specific pathological states (e.g., persistent asthma, pulmonary trauma) has demonstrated significant clinical value. However, the widespread use of this technique is limited by the selection of indications, management of complications (e.g., bleeding and thrombosis), and economic costs. In addition, existing studies on the impact of ECCO₂R on long-term patient prognosis and mortality are controversial. This review systematically compiles the current status and research progress of ECCO₂R application in respiratory critical care, analyzes its clinical advantages and shortcomings, and discusses the future research direction, with a view to providing a reference for the application and research of ECCO₂R.

【Key words】 Extracorporeal carbon dioxide removal; Respiratory critical illness; Advances in clinical application

DOI: 10.3969/j.issn.1008-9691.2026.04.023

体外二氧化碳清除技术(extracorporeal carbon dioxide removal, ECCO₂R)作为一种新兴的体外生命支持手段,通过有效清除血液中的二氧化碳(carbon dioxide, CO₂),在降低机械通气需求和预防呼吸机相关性肺损伤(ventilator-induced lung injury, VILI)方面展现出重要的临床价值^[1]。近年来,该技术在急性呼吸窘迫综合征(acute respiratory distress syndrome, ARDS)、慢性阻塞性肺疾病急性加重(acute exacerbation of chronic obstructive pulmonary disease, AECOPD)及其他特殊病理状态(如围术期肺保护、哮喘持续状态、肺创伤等)中的应用逐

渐受到关注。然而,尽管 ECCO₂R 的安全性和效率因技术进步有所提升,其临床推广仍面临适应证界定、患者管理策略以及高成本和设备复杂性等多方面挑战。此外,关于 ECCO₂R 对患者长期预后及病死率影响的研究结果尚存争议^[2]。因此,系统梳理 ECCO₂R 的研究进展、总结其应用价值并探讨相关问题,对推动其在呼吸危重症领域的应用具有重要意义。

1 ECCO₂R 的基本原理

气体交换是维持生命的核心生理功能之一, CO₂ 的清除主要依赖于肺泡与毛细血管之间的弥散

机制。在正常生理状态下, CO_2 以碳酸氢盐(70%)、氨基甲酰血红蛋白(20%~25%)及溶解态(5%~10%)形式运输,并通过肺高效排出^[3]。然而,在 ARDS 和 AECOPD 等病理状态下,肺泡气体交换功能受损, CO_2 潴留导致顽固性高碳酸血症,从而引发多系统损害,如颅内压升高、肺血管收缩及肺动脉高压等。同时,氧化应激和肺泡液体清除障碍进一步加剧肺损伤。这些生理机制为 ECCO₂R 的发展提供了理论依据,其通过模拟肺部气体交换功能辅助清除 CO_2 ,从而减少对机械通气的依赖并降低肺损伤风险^[4],有效弥补了传统治疗的局限性。其核心技术包括以下 3 个方面。

1.1 血液回路: ECCO₂R 技术通过血管插管将静脉血或动脉血引入体外回路。血液被泵送至气体交换装置(膜肺),然后再回输至体内。整个循环过程模拟了人体肺部气体交换功能。

1.2 气体交换膜的作用: ECCO₂R 的关键部件是气体交换膜[通常由聚合物膜制成,如聚-4-甲基-1-戊烯(poly-4-methyl-1-pentene, PMP)]。血液流经膜肺时,与膜另一侧的气体(通常是吸入的空气或氧气)通过半透膜进行气体交换, CO_2 从血液中弥散到气体侧被清除^[5-6]。气体交换膜的具体作用包括 ① 高效 CO_2 弥散: 气体交换膜的高弥散系数能迅速将血液中的 CO_2 转移至外部气体回路。② 低血液流量要求: 由于 CO_2 的溶解度和弥散速率较高, ECCO₂R 通常需要较低的血流量(<1 500 mL/min),因此减少了对心血管系统的负担^[7-8]。③ 血液和气体的分隔: 膜肺设计确保血液与气体之间不会发生直接接触,从而降低凝血和炎症反应风险。

1.3 其他辅助系统: ECCO₂R 系统通常配备血泵(维持血流动力学稳定性)和抗凝管理系统,以防止血栓形成或过度出血。

2 ECCO₂R 与体外膜肺氧合(extracorporeal membrane oxygenation, ECMO)的异同点

ECCO₂R 和 ECMO 均是基于体外循环的生命支持技术,通过将静脉血引出体外并利用膜肺(气体交换器)进行气体交换,实现 CO_2 的清除和部分或全部的气体交换功能。两者均依赖血泵维持体外血

液流动,并配备抗凝管理系统以防止血栓形成。它们在呼吸功能严重受损或衰竭的患者中应用,通过减轻机械通气的压力和潮气量(tidal volume, VT),有效降低 VILI 的风险,为患者提供重要的呼吸支持。然而,二者应用范围和工作机制存在显著差异(表 1)。

3 ECCO₂R 的临床应用

3.1 ECCO₂R 在 ARDS 中的应用: ARDS 患者的治疗目标在于维持基本气体交换的同时实施“超保护性肺通气”,通过降低 VT、平台压(plateau pressure, Pplat)、驱动压力,以降低 VILI 的发生风险^[9]。然而,单纯的超保护性肺通气往往伴随 CO_2 潴留,且严重的高碳酸血症和呼吸性酸中毒与病死率升高有关,也可能对大脑和心血管系统以及其他肺外器官产生不利影响。ECCO₂R 通过清除体内过量 CO_2 ,降低通气需求和机械通气参数,为 ARDS 患者的治疗提供了一种重要选择。研究表明, ECCO₂R 可有效改善 ARDS 患者的酸碱平衡和优化肺保护性通气指标,并降低严重高碳酸血症及呼吸性酸中毒的发生风险,改善患者预后^[10]。ECCO₂R 能有效降低 VT 和通气压力,同时维持适当的气体交换功能,证实 ECCO₂R 辅助下实施超保护性肺通气的可行性^[11]。欧洲专家组在 2020 年的一项共识中指出, ARDS 作为 ECCO₂R 在重症监护病房(intensive care unit, ICU)中治疗的主要适应证,其主要治疗目标是通过控制 CO_2 水平实现 ARDS 的超保护性肺通气^[11]。然而,尽管 ECCO₂R 在理论上具有上述优势,其在 ARDS 患者中的临床应用仍面临诸多挑战。一项保护性通气联合静脉-静脉体外肺辅助随机临床试验比较了使用 ECCO₂R 辅助的低 VT 通气与标准治疗通气对急性低氧性呼吸衰竭患者 90 d 病死率的影响;结果显示,两组 90 d 病死率比较差异无统计学意义,且不良事件发生率较高,说明 ECCO₂R 的应用可能并未带来预期的生存获益^[12]。此外, ECCO₂R 可减少新型冠状病毒感染相关的 ARDS 后出现难治性 II 型呼吸衰竭患者的呼吸支持需求,但对长期预后的改善尚未充分证据^[13]。此外, ECCO₂R 联合连续血液净化治疗重症新型冠状病毒感染合并 ARDS

表 1 ECCO₂R 与 ECMO 的差异^[9]

技术手段	氧合	CO_2 清除	血流动力学支持	血流速率	血管通路	需要抗凝治疗	并发症发生率
ECMO	是	是	是(VV-ECMO 较小)	高	动脉-静脉(无泵),静脉-静脉	是	高
ECCO ₂ R	否	是	否	低	动脉-静脉,静脉-静脉	是	低

注: VV-ECMO 为静脉-静脉体外膜肺氧合

和高碳酸血症患者可能赢得治疗时间和机会,并降低 VILI 发生率^[14]。目前的研究尚未充分证实 ECCO₂R 能够显著降低 ARDS 患者的病死率^[15]。这可能与病例选择、设备性能、操作熟练程度以及整体疾病管理策略等因素密切相关^[16-17]。最近一项多中心回顾性队列研究也显示, ECCO₂R 在改善 pH 值, 动脉血二氧化碳分压 (arterial partial pressure of carbon dioxide, PaCO₂), RR, VT 和分钟通气量方面起到一定作用^[18]。欧洲重症监护医学学会的指南^[19]中指出, ECCO₂R 可在特定情况下应用于非新型冠状病毒感染相关的 ARDS 中, 但不建议将其常规应用于所有 ARDS 患者。Zhang 等^[20]在 12 例急性呼吸衰竭患者中进行了 ECCO₂R 的初步研究, 结果显示, ECCO₂R 降低了 RR、驱动压力、PaCO₂ 和血乳酸 (lactic acid, Lac), 明显改善了 pH 值和氧合指数 (oxygenation index, PaO₂/FiO₂)。此外, ECCO₂R 的应用还可能伴随一定的并发症, 如出血、血栓形成和感染等。因此, 在临床实践中, 需要严格筛选适合接受 ECCO₂R 治疗的患者, 并在治疗过程中进行密切监测, 以及时发现和处理潜在并发症^[21]。综上所述, ECCO₂R 在 ARDS 患者中的应用具有一定的潜在价值, 但其临床效益尚需更多大规模随机对照试验的验证。

3.2 ECCO₂R 在慢性阻塞性肺疾病 (chronic obstructive pulmonary disease, COPD) 中的应用: COPD 是最常见的慢性呼吸系统疾病, 在我国呈高患病率、高病死率和高疾病负担的流行病学特征。COPD 的特征是气流受限、肺弹性减退和动态过度充气, 高碳酸血症是 AECOPD 的常见并发症, 其中高碳酸血症的出现不仅反映了疾病严重程度, 还可能加重患者的呼吸肌疲劳和全身性并发症, 任何增加肌肉疲劳的临床事件都会增强呼吸功并加重高碳酸血症性酸中毒, 尤其在 AECOPD 和难治性高碳酸血症中。无创机械通气 (noninvasive ventilation, NIV) 是 AECOPD 治疗的标准方法, 但约 20% 的患者会因 NIV 失败而需要有创机械通气 (invasive mechanical ventilation, IMV), 而 IMV 通常与更高的病死率和并发症 (如呼吸机相关性肺炎) 发生率相关, 且 NIV 失败后需要 IMV 的患者病死率比立即接受 IMV 治疗的患者更高^[22-23]。ECCO₂R 能清除体内多余的 CO₂, 从而减轻呼吸肌疲劳, 降低机械通气负荷, 改善呼吸机泵功能衰竭和呼吸性酸中毒^[23]。研究显示, ECCO₂R 可降低插管需求, 减少 IMV 相

关并发症, 缩短 ICU 住院时间, 并可能改善患者的生存率。一项病例对照研究显示, ECCO₂R 可有效降低 IMV 风险, 缩短 IMV 持续时间, 但超过 1/3 的患者出现了并发症^[24]。研究表明, ECCO₂R 能显著改善患者的 pH 值和 PaCO₂, 在 26 例接受 ECCO₂R 治疗的患者中, 85% 避免了气管插管, 相较于 IMV, ECCO₂R 显著缩短了 ICU 停留时间, 减少了呼吸机相关并发症 (如呼吸机相关性肺炎)。此外, ECCO₂R 显示出潜在的生存获益, 90 d 病死率低于 IMV 组 (15% 比 28%)^[2]。但在 NIV 失败的 AECOPD 高风险患者中, ECCO₂R 会增加 ICU 住院时间和总住院时间, 而 90 d 病死率差异无统计学意义^[25]。一项荟萃分析表明, ECCO₂R 能有效提高 pH 值、降低 PaCO₂ 和 RR, 而不会明显影响氧合^[15]。研究显示, 使用专用设备的 ECCO₂R 是治疗 ARDS 或 COPD 危重症患者高碳酸血症有效且安全的方法, 不良事件发生率, 且新型 ECCO₂R 设备也相继进入临床^[26-27]。然而, 一些研究者亦指出, ECCO₂R 可能增加不良事件 (如大出血) 的发生风险, 且对长期预后的改善作用不确切。近期研究显示, ECCO₂R 可减少 COPD 急性加重期间对 IMV 的需求, 但增加不良反应的发生风险, 如大出血, 这可能与血小板活化相关^[28-29]。

目前, ECCO₂R 主要用于 COPD 患者的 3 种临床场景: ① 早期启动, 用于有插管和 IMV 风险的 NIV 治疗失败的 COPD 患者; ② 在 NIV 失败时, 帮助患者避免 IMV; ③ 协助 COPD 患者从 IMV 中撤机^[15, 30-31]。欧洲圆桌会议也对 ECCO₂R 在 COPD 中的应用进行了严格界定^[1]。因此, 尽管这些研究显示了 ECCO₂R 在 COPD 患者中的潜在益处, 但其应用仍处于探索阶段。在临床实践中, 应谨慎评估其风险和收益, 特别是考虑到可能的并发症, 如出血等。

3.3 ECCO₂R 在终末期肺病围术期的应用: 终末期肺病是指一组严重且不可逆的肺部疾病, 包括 COPD、肺纤维化和晚期肺气肿等。此类患者常面临呼吸功能的极度衰竭, 在外科手术 (如肺移植或肺减容手术) 中, 如何有效管理围术期的呼吸支持是临床中的重要挑战^[32]。研究显示, ECCO₂R 可在术前稳定患者状态、术中降低机械通气相关肺损伤风险、术后促进功能恢复。也有研究表明, ECCO₂R 可用于优化围术期患者的肺保护策略, 特别是在需要降低机械通气的肺损伤风险时^[33]。目前, ECCO₂R 在终末期肺病围术期的应用主要以

病例报告为主。有学者对 20 例终末期肺病的病例进行分析,结果显示,95% 的患者成功桥接至肺移植^[34]。Bermudez 等^[35]使用 Hemolung 呼吸辅助系统作为肺移植的桥接手段。同时, ECCO₂R 成功应用于基础肺功能严重受损的肺肿瘤切除患者的术中支持^[36]。2016 年, ECCO₂R 作为肺减容手术的桥梁应用于终末期肺气肿患者中^[37]。2017 年, ECCO₂R 成功应用于肺巨型大疱切除术的围手术期管理中,显著提高了手术成功率^[38]。2023 年,美国胸外科协会发布专家共识^[39]提出:在终末期肺病的患者中, ECCO₂R 可用于术前、术中及术后管理中。此外, ECCO₂R 对肺创伤患者也有一定的益处。Wells 等^[40]研究显示, ECCO₂R 能够有效抑制呼吸驱动,在机械通气下维持更稳定的肺内气体交换与呼吸力学状态,从而促进清醒状态下广泛双侧连枷胸患者的肋骨骨折愈合。相比 ECMO, ECCO₂R 更适用于非氧合支持但需 CO₂ 清除的情况,其侵入性较低^[41]。然而,由于研究主要基于病例报告,且其成功实施需要多学科团队的紧密配合及针对具体患者制定个性化治疗方案,因此其广泛推广仍需进一步验证。

此外, ECCO₂R 也应用在哮喘患者中。哮喘是一种常见的慢性炎症性气道疾病,其病理生理特征涉及气道的慢性炎症、气道高反应性、气道重塑以及气流受限。哮喘患者在急性发作时,尤其是在重症患者中, IMV 可能是治疗的一部分。虽然机械通气有助于改善氧合和促进 CO₂ 排除,但它也伴随肺动态过度充气及气道损伤、气胸等风险^[42]。据统计,需要 IMV 的严重哮喘患者死亡风险为 6.5%~10.3%^[43]。ECCO₂R 在哮喘中的应用尚处于探索阶段,主要以病例报告为主,可作为传统治疗无效患者的辅助手段^[44]。Bromberger 等^[45]分析了 26 例接受 ECCO₂R 治疗的哮喘持续状态的危重症患者,结果显示,撤机拔管率为 76.9%,出院率为 100.0%,且无严重不良并发症发生,以导管相关的深静脉血栓最常见,发生率为 26.1%。尽管有一定的临床数据提示 ECCO₂R 在严重急性哮喘患者中的潜在价值,但需要更多的大样本研究来明确其疗效和安全性。对于传统治疗无效的重症哮喘患者, ECCO₂R 可能提供一种有效的辅助治疗选择^[46]。

4 总结与展望

ECCO₂R 作为一种新兴的体外生命支持技术,在 ARDS、COPD 及终末期肺病等领域具有广阔的应用前景。然而,其临床推广仍面临多重挑战,包括

适应证选择、设备复杂性及并发症管理等问题。未来研究应聚焦于以下方向:①明确 ECCO₂R 的最佳适应证和患者筛选标准;②优化设备性能及操作流程,以降低不良事件发生率;③探索 ECCO₂R 对患者长期预后的影响及潜在获益。通过进一步的多中心随机对照试验和高质量临床研究, ECCO₂R 有望为呼吸危重症患者提供更为安全、有效的治疗选择,为该领域的发展奠定坚实基础。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Combes A, Auzinger G, Capellier G, et al. ECCO₂R therapy in the ICU: consensus of a European round table meeting [J]. Crit Care, 2020, 24 (1): 490. DOI: 10.1186/s13054-020-03210-z.
- [2] Azzi M, Aboab J, Alviset S, et al. Extracorporeal CO₂ removal in acute exacerbation of COPD unresponsive to non-invasive ventilation [J]. BMJ Open Respir Res, 2021, 8 (1): e001089. DOI: 10.1136/bmjresp-2021-001089.
- [3] Combes A, Brodie D, Aissaoui N, et al. Extracorporeal carbon dioxide removal for acute respiratory failure: a review of potential indications, clinical practice and open research questions [J]. Intensive Care Med, 2022, 48 (10): 1308-1321. DOI: 10.1007/s00134-022-06796-w.
- [4] Brodie D, Slutsky AS, Combes A. Extracorporeal life support for adults with respiratory failure and related indications: a review [J]. JAMA, 2019, 322 (6): 557-568. DOI: 10.1001/jama.2019.9302.
- [5] Duscio E, Cipulli F, Vasques F, et al. Extracorporeal CO₂ removal: the minimally invasive approach, theory, and practice [J]. Crit Care Med, 2019, 47 (1): 33-40. DOI: 10.1097/CCM.0000000000003430.
- [6] Ghasem N. Modeling and simulation of the impact of feed gas perturbation on CO₂ removal in a polymeric hollow fiber membrane [J]. Polymers (Basel), 2022, 14 (18): 3783. DOI: 10.3390/polym14183783.
- [7] Diehl JL, Boisramé-Helms J, Chardon-Couteau A, et al. The role of extracorporeal removal of CO₂ (ECCO₂R) in the management of respiratory diseases [J]. Rev Mal Respir, 2017, 34 (6): 598-606. DOI: 10.1016/j.rmr.2017.02.003.
- [8] Morelli A, Del Sorbo L, Pesenti A, et al. Extracorporeal carbon dioxide removal (ECCO₂R) in patients with acute respiratory failure [J]. Intensive Care Med, 2017, 43 (4): 519-530. DOI: 10.1007/s00134-016-4673-0.
- [9] Combes A, Schmidt M, Hodgson CL, et al. Extracorporeal life support for adults with acute respiratory distress syndrome [J]. Intensive Care Med, 2020, 46 (12): 2464-2476. DOI: 10.1007/s00134-020-06290-1.
- [10] İnal V, Efe S. Extracorporeal carbon dioxide removal (ECCO₂R) in COPD and ARDS patients with severe hypercapnic respiratory failure. A retrospective case-control study [J]. Turk J Med Sci, 2021, 51 (4): 2127-2135. DOI: 10.3906/sag-2012-151.
- [11] Combes A, Fanelli V, Pham T, et al. Feasibility and safety of extracorporeal CO₂ removal to enhance protective ventilation in acute respiratory distress syndrome: the SUPERNOVA study [J]. Intensive Care Med, 2019, 45 (5): 592-600. DOI: 10.1007/s00134-019-05567-4.
- [12] McNamee JJ, Gillies MA, Barrett NA, et al. Effect of lower tidal volume ventilation facilitated by extracorporeal carbon dioxide removal vs standard care ventilation on 90-day mortality in patients with acute hypoxemic respiratory failure: the REST randomized clinical trial [J]. JAMA, 2021, 326 (11): 1013-1023. DOI: 10.1001/jama.2021.13374.
- [13] Cambria G, Spelde AE, Olia SE, et al. Extracorporeal carbon dioxide removal to de-escalate venovenous extracorporeal membrane oxygenation in severe COVID-19 acute respiratory distress syndrome [J]. J Cardiothorac Vasc Anesth, 2024, 38 (3):

- 717–723. DOI: 10.1053/j.jvca.2023.12.029.
- [14] Chen Y, Wang SH, Huang JR, et al. Application of extracorporeal carbon dioxide removal combined with continuous blood purification therapy in ARDS with hypercapnia in patients with critical COVID-19 [J]. Clin Hemorheol Microcirc, 2021, 78 (2): 199–207. DOI: 10.3233/CH-201080.
 - [15] Zhu Y, Zhen WF, Zhang XN, et al. Extracorporeal carbon dioxide removal in patients with acute respiratory distress syndrome or chronic obstructive pulmonary disease: a systematic review and meta-analysis [J]. Blood Purif, 2023, 52 (2): 103–113. DOI: 10.1159/000525983.
 - [16] Tiruvoipati R, Akkanti B, Dinh K, et al. Extracorporeal carbon dioxide removal with the hemolung in patients with acute respiratory failure: a multicenter retrospective cohort study [J]. Crit Care Med, 2023, 51 (7): 892–902. DOI: 10.1097/CCM.0000000000005845.
 - [17] Worku E, Brodie D, Ling RR, et al. Venovenous extracorporeal CO₂ removal to support ultraprotective ventilation in moderate–severe acute respiratory distress syndrome: a systematic review and meta-analysis of the literature [J]. Perfusion, 2023, 38 (5): 1062–1079. DOI: 10.1177/02676591221096225.
 - [18] Tiruvoipati R, Akkanti B, Dinh K, et al. Extracorporeal carbon dioxide removal with the hemolung in patients with acute–on–chronic respiratory failure: a multicenter retrospective cohort study [J]. ASAIO J, 2024, 70 (7): 594–601. DOI: 10.1097/MAT.0000000000002155.
 - [19] Lassola S, Battaglini D, De Rosa S. Advancing extracorporeal carbon dioxide removal technology: bridging basic science and clinical practice [J]. Med Gas Res, 2025, 15 (2): 288–298. DOI: 10.4103/mgr.MEDGASRES-D-24-00051.
 - [20] Zhang RH, Tian C, Cai SH, et al. Efficacy and safety of a low–flow extracorporeal carbon dioxide removal system in acute respiratory failure, a pilot study in China [J]. Blood Purif, 2023, 52 (2): 132–139. DOI: 10.1159/000525867.
 - [21] 徐永昊, 刘宜坤, 席寅, 等. 体外二氧化碳清除在急性呼吸窘迫综合征救治中的应用价值 [J]. 中华医学杂志, 2024, 104 (15): 1242–1246. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20231026-00907.
 - [22] Chandra D, Stamm JA, Taylor B, et al. Outcomes of noninvasive ventilation for acute exacerbations of chronic obstructive pulmonary disease in the United States, 1998–2008 [J]. Am J Respir Crit Care Med, 2012, 185 (2): 152–159. DOI: 10.1164/rccm.201106-10940C.
 - [23] Alessandri F, Pugliese F, Mascia L, et al. Intermittent extracorporeal CO₂ removal in chronic obstructive pulmonary disease patients: a fiction or an option [J]. Curr Opin Crit Care, 2018, 24 (1): 29–34. DOI: 10.1097/MCC.0000000000000471.
 - [24] Braune S, Sieweke A, Brettner F, et al. The feasibility and safety of extracorporeal carbon dioxide removal to avoid intubation in patients with COPD unresponsive to noninvasive ventilation for acute hypercapnic respiratory failure (ECLAIR study): multicentre case–control study [J]. Intensive Care Med, 2016, 42 (9): 1437–1444. DOI: 10.1007/s00134-016-4452-y.
 - [25] Barrett NA, Hart N, Daly KJR, et al. A randomised controlled trial of non–invasive ventilation compared with extracorporeal carbon dioxide removal for acute hypercapnic exacerbations of chronic obstructive pulmonary disease [J]. Ann Intensive Care, 2022, 12 (1): 36. DOI: 10.1186/s13613-022-01006-8.
 - [26] Taccone FS, Rinaldi S, Annoni F, et al. Safety and effectiveness of carbon dioxide removal CO₂RESET device in critically ill patients [J]. Membranes (Basel), 2023, 13 (7): 686. DOI: 10.3390/membranes13070686.
 - [27] Tiruvoipati R, Ludski J, Gupta S, et al. Evaluation of the safety and efficacy of extracorporeal carbon dioxide removal in the critically ill using the PrismaLung⁺ device [J]. Eur J Med Res, 2023, 28 (1): 291. DOI: 10.1186/s40001-023-01269-2.
 - [28] Duggal A, Conrad SA, Barrett NA, et al. Extracorporeal carbon dioxide removal to avoid invasive ventilation during exacerbations of chronic obstructive pulmonary disease: VENT–AVOID trial–a randomized clinical trial [J]. Am J Respir Crit Care Med, 2024, 209 (5): 529–542. DOI: 10.1164/rccm.202311-20600C.
 - [29] Smadja DM, Chocron R, Rivet N, et al. Platelet activation and severe bleeding during extracorporeal carbon dioxide removal in chronic obstructive pulmonary disease patients [J]. ASAIO J, 2025, 71 (2): e20–e22. DOI: 10.1097/MAT.0000000000002241.
 - [30] Schmidt M, Jaber S, Zogheib E, et al. Feasibility and safety of low–flow extracorporeal CO₂ removal managed with a renal replacement platform to enhance lung–protective ventilation of patients with mild–to–moderate ARDS [J]. Crit Care, 2018, 22 (1): 122. DOI: 10.1186/s13054-018-2038-5.
 - [31] Diehl JL, Piquilloud L, Vimperc D, et al. Physiological effects of adding ECCO₂R to invasive mechanical ventilation for COPD exacerbations [J]. Ann Intensive Care, 2020, 10 (1): 126. DOI: 10.1186/s13613-020-00743-y.
 - [32] Martin AK, Ramakrishna H. Extracorporeal carbon dioxide removal (ECCO₂R): a potential perioperative tool in end–stage lung disease [J]. J Cardiothorac Vasc Anesth, 2021, 35 (8): 2245–2248. DOI: 10.1053/j.jvca.2021.04.014.
 - [33] Braune SA, Kluge S. Extracorporeal lung support in patients with chronic obstructive pulmonary disease [J]. Minerva Anesthesiol, 2013, 79 (8): 934–943.
 - [34] Schellongowski P, Riss K, Staudinger T, et al. Extracorporeal CO₂ removal as bridge to lung transplantation in life–threatening hypercapnia [J]. Transpl Int, 2015, 28 (3): 297–304. DOI: 10.1111/tri.12486.
 - [35] Bermudez CA, Zaldonis D, Fan MH, et al. Prolonged use of the hemolung respiratory assist system as a bridge to redo lung transplantation [J]. Ann Thorac Surg, 2015, 100 (6): 2330–2333. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2015.02.104.
 - [36] Redwan B, Semik M, Dickgreber N, et al. Single site cannulation veno–venous extracorporeal lung support during pulmonary resection in patients with severely compromised pulmonary function [J]. ASAIO J, 2015, 61 (3): 366–369. DOI: 10.1097/MAT.0000000000000193.
 - [37] Redwan B, Ziegeler S, Semik M, et al. Single–site cannulation venovenous extracorporeal CO₂ removal as bridge to lung volume reduction surgery in end–stage lung emphysema [J]. ASAIO J, 2016, 62 (6): 743–746. DOI: 10.1097/MAT.0000000000000421.
 - [38] Redwan B, Biancosino C, Giebel F, et al. Perioperative single–site veno–venous extracorporeal CO₂ removal for minimally invasive giant bulla resection [J]. Perfusion, 2017, 32 (8): 698–701. DOI: 10.1177/0267659117716758.
 - [39] Hartwig M, van Berkel V, Bharat A, et al. The American Association for Thoracic Surgery (AATS) 2022 expert consensus document: the use of mechanical circulatory support in lung transplantation [J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2023, 165 (1): 301–326. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2022.06.024.
 - [40] Wells AH, Oswald TJ, Samra N, et al. Extracorporeal carbon dioxide removal in the management of complex bilateral flail chest injury [J]. ASAIO J, 2019, 65 (7): e75–e77. DOI: 10.1097/MAT.0000000000000942.
 - [41] Tonetti T, Zanella A, Pérez–Torres D, et al. Current knowledge gaps in extracorporeal respiratory support [J]. Intensive Care Med Exp, 2023, 11 (1): 77. DOI: 10.1186/s40635-023-00563-x.
 - [42] Leatherman J. Mechanical ventilation for severe asthma [J]. Chest, 2015, 147 (6): 1671–1680. DOI: 10.1378/chest.14-1733.
 - [43] Lozano–Espinosa M, Antolín–Amérigo D, Riera J, et al. Extracorporeal membrane oxygenation (ECMO) and beyond in near fatal asthma: a comprehensive review [J]. Respir Med, 2023, 215: 107246. DOI: 10.1016/j.rmed.2023.107246.
 - [44] Ekechukwu N, Batra S, Orsi D, et al. Outcomes of extracorporeal life support (ECLS) in acute severe asthma: a narrative review [J]. Lung, 2024, 202 (2): 91–96. DOI: 10.1007/s00408-023-00667-x.
 - [45] Bromberger BJ, Agerstrand C, Abrams D, et al. Extracorporeal carbon dioxide removal in the treatment of status asthmaticus [J]. Crit Care Med, 2020, 48 (12): e1226–e1231. DOI: 10.1097/CCM.0000000000004645.
 - [46] Esposito R, Esposito I, Imperatore F, et al. Decapneization as supportive therapy for the treatment of status asthmaticus: a case report [J]. J Med Case Rep, 2021, 15 (1): 200. DOI: 10.1186/s13256-021-02689-6.

(收稿日期: 2025-04-02)

(责任编辑: 邸美仙)