·综　述·

ECMO 在儿童器官移植中的应用进展

焦国慧[1]，陈静瑜[2,3]，苗晶晶[1]，王玉姬[1]，骆庆峰[1]

[1] 国家药品监督管理局医疗器械技术审评中心，北京 100081
[2] 南京医科大学附属无锡人民医院无锡肺移植中心，无锡 214023
[3] 浙江大学医学院附属第二医院肺移植中心，杭州 310052

通信作者：王玉姬，E-mail：wangyj@cmde.org.cn
骆庆峰，E-mail：luoqf@cmde.org.cn

【摘要】器官移植作为治疗儿童终末期器官功能衰竭的手段，随着手术技术、器官保存技术和免疫抑制药物的发展，手术成功率和受者长期生存质量均得到不断提升。体外膜肺氧合（extracorporeal membrane oxygenation，ECMO）在儿童器官移植中的应用，早期以心肺移植为主，逐渐拓展至对肝、肾等腹腔脏器移植围术期发生的心肺并发症的支持，以及用于供体的维护过程。随着 ECMO 技术和器械的不断升级，其在儿童终末期器官衰竭支持治疗中的地位越来越显著，让更多的器官功能衰竭患儿重获新生。

【关键词】器官移植；儿童；体外膜肺氧合；围术期支持
【中图分类号】R617；R72　　【文献标志码】A　　【文章编号】1674-9081(2025)06-1541-07
DOI：10.12290/xhyxzz.2024-0752

Advancements in the Application of ECMO in Pediatric Organ Transplantation

JIAO Guohui[1], CHEN Jingyu[2,3], MIAO Jingjing[1], WANG Yuji[1], LUO Qingfeng[1]

[1]Center for Medical Device Evaluation, National Medical Products Administration, Beijing 100081, China
[2]Wuxi Lung Transplant Center, Wuxi People's Hospital Affiliated to Nanjing Medical University, Wuxi, Jiangsu 214023, China
[3]Center for Lung Transplantation, Second Affiliated Hospital, Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou 310052, China

Corresponding authors: WANG Yuji, E-mail: wangyj@cmde.org.cn
LUO Qingfeng, E-mail: luoqf@cmde.org.cn

【**Abstract**】Organ transplantation has emerged as a therapeutic modality for children with end-stage organ failure. With advancements in surgical techniques, organ preservation methods, and immunosuppressive therapies, both the success rate of transplantation and the long-term quality of life of recipients have continued to improve. Initially applied primarily in cardiothoracic transplantation, extracorporeal membrane oxygenation (ECMO) has gradually expanded its role in pediatric organ transplant recipients to include perioperative support for cardiopulmonary complications in abdominal organ transplants such as liver and kidney, as well as in the maintenance of deceased donors. With ongoing refinements in ECMO technology and equipment, its significance in supporting children with end-stage organ failure has become increasingly prominent, offering renewed hope and survival for a growing number of pediatric patients with organ failure.

基金项目：国家药品监督管理局体外循环器械重点实验室开放课题（2024YB01）；国家科技重大专项-四大慢病（2023YFC2507100）
引用本文：焦国慧，陈静瑜，苗晶晶，等. ECMO 在儿童器官移植中的应用进展［J］. 协和医学杂志，2025，16（6）：1541-1547. doi：10.12290/xhyxzz.2024-0752.

【Key words】organ transplantation; pediatrics; extracorporeal membrane oxygenation; perioperative support
Funding: National Medical Products Administration Key Laboratory for Extracorporeal Circulation Devices: Open Project (2024YB01); National Science and Technology Major Project for Noncommunicable Chronic Diseases (2023YFC2507100)
Med J PUMCH, 2025,16(6):1541-1547

器官移植作为儿童终末期器官功能衰竭的治疗手段，随着手术技术、器官保存技术和免疫抑制药物的发展，手术成功率和受者长期生存质量不断得到提升。儿童器官移植受者群体的获益还来自于器官分配政策的优化以及儿科重症技术的进步，其中体外膜肺氧合（extracorporeal membrane oxygenation，ECMO）技术已用于儿童患者的心肺功能支持以及桥接至移植手术治疗中。

1 ECMO 在儿童患者中的应用

1975 年，ECMO 首次被报道用于治疗严重的新生儿胎粪吸入综合征合并肺动脉高压，近年来，儿科 ECMO 的使用数量不断增加[1-2]。用于儿科的 ECMO 支持模式主要包括静脉-静脉（V-V）或静脉-动脉（V-A）ECMO。低体重患儿因股静脉较细，置管困难且耗材受限，多选择中心 V-A 置管模式。呼吸支持为主的 ECMO 常用于病毒性肺炎、误吸的患儿，心脏支持为主的 ECMO 主要用于先天性心脏病、感染性休克、心肌炎和心肌病的患儿[3-4]。这些患儿使用 ECMO 的结局在不断改善，也伴随着 ECMO 使用的相对禁忌证在不断减少[5]。ECMO 用于儿童患者的并发症除了在成人患者中常见的出血、血栓和感染等，还有其特殊之处，例如神经心理问题，及其对儿童未来记忆、运动和认知功能的影响[6]。2022 年发布的《体外膜氧合在儿童危重症应用的专家共识》作为我国首次发布的系统化、规范化的儿童 ECMO 实践共识，将近年来国内外在儿童危重症领域 ECMO 的使用经验和证据进行了总结[7]。

ECMO 在儿童器官移植受者中的应用，早期以心肺移植为主，逐渐拓展至对肝、肾等腹腔脏器移植围术期发生的心肺并发症的支持，以及用于供体的维护过程。早期数据显示，采用 ECMO 桥接治疗的儿童受者预后较差，但如果患者顺利度过围术期，长期结局并不劣于未使用 ECMO 支持的受者[2, 8]。2022 年，接受造血干细胞移植（hematopoietic cell transplantation，HCT）或免疫效应细胞治疗的患儿使用 ECMO 的全球共识发布[4]，进一步带来了儿科重症领域的技术提升。患儿疾病的严重程度、病程以及一定时期内疾病的可逆性会影响 ECMO 支持下的生存结局[9-10]。在患儿的选择标准上应考虑疾病可逆性、复发和无病生存的可能性等因素。目前认为 ECMO 主要在非恶性血液系统疾病的 HCT 患者中使用，而对于恶性血液系统疾病的患者，一般认为如果复发的风险较低且预期可获得理想的无病生存期，可考虑 ECMO 治疗。但近期也有研究[11]发现，在血液肿瘤患者中使用 ECMO 治疗，可改善部分患者的生存期。ECMO 还可用于 HCT 术后长期生存的患者，当其出现闭塞性细支气管炎且伴有慢性呼吸衰竭急性加重时，在等待肺移植过程中可接受 ECMO 桥接治疗[12]。

ECMO 用于儿童实体器官移植，在心肺移植领域有大量的队列研究结果发表，肝肾移植领域中也从病例报道进入开展队列研究的时代，为指导临床实践提供了新的证据[13]。本文将总结这一领域的最新进展，为未来开展进一步的研究提供思路。

2 ECMO 在儿童实体器官移植围术期的应用

2.1 心脏移植

ECMO 可用于心脏移植术前辅助心脏功能和术后移植物功能障碍治疗[14]，新生儿和婴幼儿采用中心插管，年长儿可采用外周插管模式。儿童心脏移植受者中，由于原发性移植物功能障碍而需要 ECMO 支持的患者死亡率接近 40%[15]，我国一项研究报道了 47 例儿童心脏移植受者中 9%使用 ECMO 支持治疗原发性移植物功能障碍，最终均存活出院[16]，但相关研究报道仍十分有限。

既往认为等待心脏移植的儿童患者在所有实体器官移植的受者中死亡率最高，在建立的一些预后预测模型中，使用 ECMO 往往作为风险因素纳入模型[17]。有研究表明，等待心脏移植过程中使用 ECMO 的儿童受者，移植术后住院时间超过 30 d 的患者比例增加[18]。2000—2020 年间，韩国最大的三家心脏移植中心完成的 145 例儿童手术中，30 例使用了 ECMO，与 ECMO 使用相关的并发症成为等待期间死亡的重要因素[19]。儿童心脏移植术后，7.9%的受者需要 ECMO 的支持，5 岁以下受者以及术前就需要 ECMO 支持的受者更可能在术后需要 ECMO 的支持，随着

术后 ECMO 支持时间的增加，患者的生存率也逐渐下降。患者出院后的长期生存与是否使用 ECMO 无明显相关[20]。在复杂先天性心脏病（congenital heart disease，CHD）患者中，Fontan 术后远期可能出现肝硬化，最终需要心脏-肝脏联合移植，如果术中需要 ECMO 支持，这些患者有较高的死亡率，提示需更早进行干预，而非等到心肺功能衰竭而不得不使用 ECMO 支持[21]。实际上，这些结论可能受到了儿童受者原发病复杂性、是否合并肾功能不全和肺血管阻力升高、供受体的匹配性以及早期技术成熟程度等因素的影响[22]。

ECMO 应用于心脏移植受者在全球范围内已超过 30 年，基于移植队列的研究证据也在不断更新。Auerbach 等[23]分析了小儿心脏移植学会数据库中<18 岁患者的结局，与心肌病接受心脏移植的患儿相比，CHD 患儿移植时年龄更小，缺血时间（ischemia time，IT）长于 4.5 h 的比例更高，并更有可能需要在移植时使用 ECMO 或机械通气。IT 与早期移植物丢失相关，但随着时代的迁移，患儿存活率不断提高。根据美国器官共享联合网络（united network of organ sharing，UNOS）的登记数据，移植低左心室射血分数供心的受者往往需要 ECMO 的支持治疗[24]。常规心脏移植供受体体重比（donor recipient weight ratio，DRWR）为 0.8～2.5，ECMO 的支持带来了 DRWR 的不断突破，扩大了可用供心的数量[25]。

心室辅助装置（ventricle assistant device，VAD）的应用，为心力衰竭患者移植前的过渡治疗提供了另一种选择，ECMO 还可桥接至 VAD 使用，不仅缩短了移植等待时间[26]，等待心脏移植的儿童受者死亡率也进一步下降[27]。在儿童机构间机械循环支持登记队列（Interagency Registry for Mechanically Assisted Circulatory Support，INTERMACS）中，150 例 INTERMACS 1～2 级的儿童受者，在 VAD 植入前使用 ECMO，并未增加总体死亡率[28]。2010—2019 年间美国儿童 VAD 的植入率逐渐增加，移植术后 1 年结果与未植入 VAD 的患者相似，是否使用 ECMO 桥接至 VAD 对生存结局无显著影响[29]。对于术后发生严重移植物功能障碍的患者，V-A ECMO 支持的患者比使用 VAD 患者的结局更好[30]。由于 VAD 和 ECMO 的临床应用场景及目的不同，尚无直接证据表明二者孰优孰劣，因此应制订个体化策略，最终让患者获得更好的生存质量。

等待心脏移植的婴儿死亡风险较高，且 VAD 在小婴儿中的使用情况并不理想。新生儿以及婴儿 CHD 患者需要体积更小且能提供持续心脏辅助的设备[31]，虽然 ECMO 的使用可能与患儿卒中发生有关，但仍有利于患儿存活[32]。在心力衰竭患儿中，可能需要 VAD 与 ECMO 联合应用。1 例 2 岁心力衰竭患儿接受 VAD 支持治疗后出现病毒性肺炎及呼吸衰竭，联合使用 V-V ECMO 并加强抗凝治疗，4 d 后肺功能改善，从而接受了心脏移植手术[33]。

2.2 肺移植

ECMO 在儿童肺移植受者中，主要应用于囊性纤维化（cystic fibrosis，CF）、重症肺炎呼吸衰竭、间质性肺纤维化和肺动脉高压（pulmonary arterial hypertension，PAH）。2022 年，美国共完成了 21 例儿童肺移植，采用机械通气或 ECMO 桥接至肺移植的儿童受者比例接近 40%[34]。1989—2020 年，美国器官移植数据库纳入了 109 例婴儿肺移植数据，其中 7 例术后需要 ECMO 支持的患儿均死亡[35]。基于国际心肺移植学会（International Society of Heart and Lung Transplantation，ISHLT）队列（1990—2017 年）2232 例儿童肺移植受者的分析表明，非 CF 儿童肺移植受者年龄更小，使用 ECMO 的比例更高[36-37]。

一项单中心随访 16 年的儿童肺移植队列研究纳入了 42 例 12 岁以下患儿，与 75 例 12～17 岁患儿相比，12 岁以下患儿术后使用 ECMO 的比例更高，但术后移植物存活率、随访 8 年的患儿生存率未见明显差异。虽然 12 岁以下儿童肺移植围术期管理更具挑战性，但总体预后不劣于 12～17 岁的儿童肺移植受者群体[38]。一项纳入美国器官移植数据库 954 例 18 岁以下儿童肺移植受者的数据分析显示，40 例在围术期接受了 ECMO 支持治疗，相较于未采用 ECMO 支持的受者，死亡风险未增加[39]。其中对于特发性肺动脉高压（idiopathic pulmonary arterial hypertension，IPAH）儿童肺移植受者的研究也提示，是否使用 ECMO 并不影响其生存期[40]。ECMO 的使用与院内死亡率高度有关，但并未明显增加 1 年死亡和二次移植的复合终点事件发生率[41]。

临床上通常鼓励采用清醒 ECMO 支持，同时加强围术期物理治疗和康复训练，以提高 ECMO 桥接至肺移植治疗的成功率[42]。V-V ECMO 常用于感染或 CF 相关呼吸衰竭患儿桥接至肺移植治疗。V-A ECMO 常用于心肺联合移植以及 PAH 患儿的围术期支持治疗[43-44]。2013—2020 年，德国汉诺威医学院收治的 12 例 PAH 患儿其平均年龄为 11.9 岁，所有患儿术中需要 V-A ECMO 支持并延续使用至术后，平均支持时间 185 h，中位机械通气时间为 28 h，术后

2 年均存活。虽然样本量有限，但该研究结果提示，儿科患者术后使用 V-A ECMO 有助于早期拔除气管插管，促进移植肺发挥作用和心室逆重塑[45]。2007—2019 年我国儿童肺移植尚处于起步阶段，患儿以 IPAH 为主，均为双肺移植，且在术中使用了 ECMO 支持[46]。2019—2023 年，我国儿童肺移植术中使用 ECMO 辅助的比例仍超过 50%，基于患者原发病和心肺功能，转流方式以 V-A 或 V-A-V 模式为主。

美国目前每年有 35%等待肺移植的患儿术前需采用机械通气支持治疗，约 5%的患儿需要 ECMO 桥接治疗[42]。根据 2005—2017 年 ISHLT 肺移植数据，当肺移植中心的年手术量超过 35 例时，ECMO 的桥接与死亡风险增加无明显关联[47]，且接受 ECMO 桥接肺移植的儿童受者更可能被分配获得成人供体[48]。使用 ECMO 桥接需要注意颈部插管不稳定的问题，警惕术后出现慢性移植物功能不全。

2.3 肝脏、肾脏移植

ECMO 在儿童腹部器官移植中的应用报道主要来自肝移植，肝移植术后呼吸衰竭的原因包括急性呼吸窘迫综合征、输血相关肺损伤、肝肾综合征和肺内出血。如出现感染性休克和肝功能衰竭的情况，可能需要中心插管 V-A ECMO 支持模式，外周静脉插管会增加肝静脉阻塞的风险，置管位置不当会导致移植肝脏水肿。ECMO 相关的主要并发症是出血和血栓形成[49]。2002—2018 年，美国器官移植数据库中有 34 例儿童肝移植受者在围术期使用 ECMO，用于可逆的严重呼吸或心功能衰竭且常规治疗无效的支持治疗，中位使用时间为 1 d，总生存率为 55.9%[50]。晚期肝硬化患者往往伴有肝肺综合征（hepatopulmonary syndrome，HPS），肝硬化儿童 HPS 的发生率为 3%～20%，ECMO 可提供呼吸支持，进行抢救以及等待肺功能恢复期间的过渡治疗[51]。ECMO 用于治疗肝移植围术期 HPS，多采用 V-V ECMO 模式，荟萃分析提示中位支持时间为 13 d，出院存活率为 82.4%[52]。1 例13 岁患儿肝移植术后因 HPS 使用 V-V ECMO 支持长达 92 d，在对脾肾分流进行栓塞以及房间隔缺损闭合处理后，成功撤除了 ECMO[53]。研究表明，约 20%的肝内胆管闭锁（biliary atresia，BA）患者发展为急性肝功能衰竭，在等待肝移植期间死亡率增加，通过在肝移植术中使用 V-V ECMO 支持，可顺利渡过围术期[54]。

ECMO 在儿童肾移植中的研究十分有限，仅见于个案报道。5 例因先天性肾功能衰竭合并肺发育不全/PAH 的患儿，出生后即需要肾脏替代治疗和 ECMO 支持治疗，ECMO 使用天数为 4～23 d，4 例患儿存活，等待并接受肾移植治疗，PAH 症状得到缓解[55]。另有来自 30 月龄肾移植患儿的个案报道，由于术中出现心脏骤停而使用 ECMO 支持，随访至术后 1 年，患儿存活且系统功能逐渐发育[56]。

3 ECMO 应用于儿童器官移植的发展趋势及展望

越来越多的研究开始关注何种因素与 ECMO 的应用风险增加有关，主要从术后住院时间和并发症的角度展开探讨。目前 ECMO 在儿童器官移植中的应用经验有限，很难获得高质量的临床证据形成共识或推荐意见，基于病例报道和队列数据的分析可提示与生存相关的影响因素，从而促进多中心联合研究。由于儿童患者往往存在先天心脏结构异常，例如卵圆孔未闭、房间隔缺损等，加之 ECMO 本身带来的血栓风险，增加儿童患者栓塞事件的发生概率[53]。因此，应特别注意儿童群体的原发病和血流动力学特征带来的特殊性。ECMO 设备的研发在不断进展，未来发展方向包括更微型化的 ECMO 装置，采用新材料的管路和氧合器设计，包括氧合器材料结构改进提升氧合效率、管路材料表面修饰降低血栓风险，以及研发可穿戴的长期人工肺等。例如，Avalon Elite® 双腔导管已在儿科患者中使用，用于呼吸支持治疗[57]。此外，右心辅助与 ECMO 的联合支持为合并肺疾病的心脏移植等待患者提供了新的治疗选择。TandemLife Protek Duo（TandemLife，美国）双腔导管通过颈内静脉插管提供右心支持，已用于接受 melody 肺动脉瓣置换以及 VAD 的青少年患者[58]。各国对儿童移植受者的生存率以及生存质量日益重视，促进了针对儿童受者的新器械研发，将有利于儿童受者群体得到更为及时的救治。

儿科群体的生理特点、疾病特征以及治疗面临的风险，对儿科医疗器械的技术开发、验证和生产提出了更多要求。在开展临床研究时，需考虑人群的可富集性和评价指标的可操作性。预期用于儿童的医疗器械产品，应从型号规格的划分、安全有效验证方面提交所适用群体的支持性资料，如果存在特殊设计，需结合相关诊疗规范和指南文献分析其临床应用的必要性。一些 ECMO 的管路带有涂层，若血管直径和器械尺寸不匹配，涂层脱落可能带来局部异物沉积、炎症、栓塞等风险，影响患儿的生长发育。对于长期植入的产品，需关注儿科患者和植入材料的长期适配性

以及永久植入材料留存在体内对患者远期健康的影响。儿科医疗器械临床研究的开展存在诸多难点，如将成人已有医疗器械临床使用数据外推至儿童群体，需进一步按照不同的年龄段区分目标人群，考虑的因素包括原发疾病诊断和治疗差异以及评价指标、使用部位的差异等。

4 小结

ECMO 技术的不断成熟，逐渐成为儿童器官移植围术期重要的支持手段。儿科医疗器械在研发、监管和成本等方面存在诸多难题[59]。我国颁布了一系列的法规和政策，以期加强对儿科医疗器械研发、创新和注册的鼓励与支持，调动企业研发的积极性，促进新技术的推广和应用。ECMO 在儿童终末期器官衰竭的支持治疗中地位越来越显著，未来应不断提高 ECMO 的管理水平，并开展大规模、多中心的前瞻性临床研究，以提供更多高质量的循证医学证据。

作者贡献： 焦国慧负责文献检索和论文撰写；陈静瑜、骆庆峰负责论文设计和修订；苗晶晶、王玉姬负责论文修订。

利益冲突： 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

[1] Bianzina S, Singh Y, Iacobelli R, et al. Use of point-of-care ultrasound (POCUS) to monitor neonatal and pediatric extracorporeal life support [J]. Eur J Pediatr, 2024, 183 (4): 1509-1524.

[2] Reid T D, Kratzke I, Dayal D, et al. The role of extracorporeal membrane oxygenation in pediatric abdominal transplant patients: a qualitative systematic review of literature [J]. Pediatr Transplant, 2021, 25 (3): e13939.

[3] Valencia E, Nasr V G. Updates in pediatric extracorporeal membrane oxygenation [J]. J Cardiothorac Vasc Anesth, 2020, 34 (5): 1309-1323.

[4] Di Nardo M, Ahmad A H, Merli P, et al. Extracorporeal membrane oxygenation in children receiving haematopoietic cell transplantation and immune effector cell therapy: an international and multidisciplinary consensus statement [J]. Lancet Child Adolesc Health, 2022, 6 (2): 116-128.

[5] Ohsumi A, Date H. Perioperative circulatory support for lung transplantation [J]. Gen Thorac Cardiovasc Surg, 2021, 69 (4): 631-637.

[6] Sakurai K, Singhal N. Extracorporeal membrane oxygenation in children: a brief review [J]. J Paediatr Child Health, 2022, 58 (9): 1525-1531.

[7] 儿童体外膜氧合专家共识撰写组，中华医学会儿科学分会急救学组. 体外膜氧合在儿童危重症应用的专家共识 [J]. 中华儿科杂志, 2022, 60 (3): 183-191.
Consensus Writing Group of Pediatric Extracorporeal Membrane Oxygenation, the Subspecialty Group of Critical Care Medicine, the Society of Pediatrics, Chinese Medical Association. Experts consensus on the application of extracorporeal membrane oxygenation in critically ill children [J]. Chin J Pediatr, 2022, 60 (3): 183-191.

[8] Kirshbom P M, Bridges N D, Myung R J, et al. Use of extracorporeal membrane oxygenation in pediatric thoracic organ transplantation [J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2002, 123 (1): 130-136.

[9] Azoulay E, Russell L, Van de Louw A, et al. Diagnosis of severe respiratory infections in immunocompromised patients [J]. Intensive Care Med, 2020, 46 (2): 298-314.

[10] An H Y, Kang H J, Park J D. Outcomes of extracorporeal membrane oxygenation support in pediatric hemato-oncology patients [J]. Acute Crit Care, 2024, 39 (1): 108-116.

[11] Mowrer M C, Lima L, Nair R, et al. Pediatric hematology and oncology patients on extracorporeal membrane oxygenation: outcomes in a multicenter, retrospective cohort, 2009-2021 [J]. Pediatr Crit Care Med, 2024, 25 (11): 1026-1034.

[12] Zhang Z R, Ding H, Liu F, et al. Successful bilateral lung transplantation and simultaneous Nuss technique correction of pectus excavatum post-allogeneic haematopoietic stem cell transplantation [J]. Interact Cardiovasc Thorac Surg, 2020, 30 (2): 319-320.

[13] Gajkowski E F, Herrera G, Hatton L, et al. ELSO guidelines for adult and pediatric extracorporeal membrane oxygenation circuits [J]. ASAIO J, 2022, 68 (2): 133-152.

[14] Su J A, Kelly R B, Grogan T, et al. Extracorporeal membrane oxygenation support after pediatric orthotopic heart transplantation [J]. Pediatr Transplant, 2015, 19 (1): 68-75.

[15] Bearl D W, Jeewa A, Auerbach S R, et al. Clinical approach to mechanical circulatory support in the transplant patient from the Pediatric Heart Transplant Society [J]. Pediatr Transplant, 2022, 26 (8): e14391.

[16] 蔡子文，张泰隆，王寅，等. ECMO 在儿童心脏移植中的应用 [J]. 器官移植, 2023, 14 (1): 49-55.
Cai Z W, Zhang T L, Wang Y, et al. Application of ECMO in pediatric heart transplantation [J]. Organ Transplant, 2023, 14 (1): 49-55.

[17] Raymundo S, Wilhalme H, Chaudhary A, et al. Pediatric risk to orthotopic heart transplant (PRO) score: insights from United Network for Organ Sharing (UNOS) waitlist mortality findings [J]. Pediatr Transplant, 2023, 27 (6): e14525.

[18] Gupta D, Bansal N, Jaeger B C, et al. Prolonged hospital length of stay after pediatric heart transplantation: a machine learning and logistic regression predictive model from the Pediatric Heart Transplant Society [J]. J Heart Lung Transplant, 2022, 41 (9): 1248-1257.

[19] Jeung M S, Kim M J, Huh J, et al. The waiting list mortality of pediatric heart transplantation candidates in Korea before the pediatric ventricular assist device era [J]. J Korean Med Sci, 2021, 36 (44): e283.

[20] Godown J, Bearl D W, Thurm C, et al. Extracorporeal membrane oxygenation use in the first 24 hours following pediatric heart transplantation: incidence, risk factors, and outcomes [J]. Pediatr Transplant, 2019, 23 (4): e13414.

[21] Wu W K, Siegrist K K, Ziogas I A, et al. Perioperative characteristics and outcomes of Fontan versus non-Fontan patients undergoing combined heart-liver transplantation: a retrospective cohort study [J]. J Cardiothorac Vasc Anesth, 2024, 38 (3): 745-754.

[22] Nair A G, Sleeper L A, Smoot L B, et al. Extracorporeal membrane oxygenation support after heart transplantation in children-outcomes of a single center cohort [J]. Pediatr Crit Care Med, 2020, 21 (4): 332-339.

[23] Auerbach S R, Arshad A, Azeka E, et al. Impact of prolonged ischemic time on pediatric heart transplantation outcomes: improved outcomes in the most recent era [J]. J Heart Lung Transplant, 2024, 43 (7): 1142-1152.

[24] Masotti E S, Morrison J M, Fierstein J L, et al. Optimal donor allograft function: the search for the lowest acceptable donor left ventricular ejection fraction in pediatric heart transplantation [J]. Transplantation, 2023, 107 (7): 1554-1563.

[25] Wen S Y, Zhou Y, Qiao W H, et al. Infant heart transplantation with extremely oversized donor heart: is the donor-recipient size matching too conservative? [J]. ESC Heart Fail, 2023, 10 (2): 1431-1434.

[26] Miana L A, Da Silva G V R, Caneo L F, et al. Rational use of mechanical circulatory support as a bridge to pediatric and congenital heart transplantation [J]. Braz J Cardiovasc Surg, 2018, 33 (3): 242-249.

[27] Colvin M M, Smith J M, Ahn Y S, et al. OPTN/SRTR 2021 annual data report: heart [J]. Am J Transplant, 2023, 23 (2 Suppl 1): S300-S378.

[28] Peer S M, Koehl D A, Cantor R S, et al. Effect of preoperative extracorporeal membrane oxygenation therapy on postventricular assist device outcomes: an analysis of the STS Pedimacs database [J]. Eur J Cardiothorac Surg, 2022, 62 (6): ezac485.

[29] Das B B, Trivedi J, Deshpande S R, et al. Recent era outcomes of mechanical circulatory support in children with congenital heart disease as a bridge to heart transplantation [J]. ASAIO J, 2022, 68 (3): 432-439.

[30] Bermudez C A, McMullan D M. Extracorporeal life support in preoperative and postoperative heart transplant management [J]. Ann Transl Med, 2017, 5 (20): 398.

[31] Conway J, Cantor R, Koehl D, et al. Survival after heart transplant listing for infants on mechanical circulatory support [J]. J Am Heart Assoc, 2020, 9 (21): e011890.

[32] Frandsen E L, Banker K A, Mazor R L, et al. Waitlist and posttransplant outcomes of critically ill infants awaiting heart transplantation managed without ventricular assist device support [J]. Pediatr Transplant, 2022, 26 (6): e14308.

[33] Townsend M L, Sadat-Hossieny S, Latifi S Q, et al. Temporary veno-venous ECMO for acute respiratory illness in pediatric Berlin heart patient [J]. World J Pediatr Congenit Heart Surg, 2022, 13 (4): 510-511.

[34] Valapour M, Lehr C J, Schladt D P, et al. OPTN/SRTR 2022 annual data report: lung [J]. Am J Transplant, 2024, 24 (2S1): S394-S456.

[35] Carvajal H G, Merritt T C, Canter M W, et al. Improved outcomes of infant lung transplantation over 3 decades [J]. Ann Thorac Surg, 2022, 114 (1): 184-192.

[36] Nelson J S, Maul T M, Aughtman S L, et al. A shifting landscape: practice patterns and outcomes of cystic fibrosis and non-cystic fibrosis pediatric lung transplantation [J]. Pediatr Transplant, 2021, 25 (7): e14086.

[37] Himebauch A S, Yehya N, Schaubel D E, et al. Poor functional status at the time of waitlist for pediatric lung transplant is associated with worse pretransplant outcomes [J]. J Heart Lung Transplant, 2023, 42 (12): 1735-1742.

[38] Iablonskii P, Carlens J, Mueller C, et al. Indications and outcome after lung transplantation in children under 12 years of age: a 16-year single center experience [J]. J Heart Lung Transplant, 2022, 41 (2): 226-236.

[39] Koh W, Zang H, Ollberding N J, et al. Extracorporeal membrane oxygenation bridge to pediatric lung transplantation: modern era analysis [J]. Pediatr Transplant, 2023, 27 (6): e14570.

[40] Ahmed H F, Morales D L S, Hayes D, Jr. ECMO bridge to lung transplant in children with idiopathic pulmonary arterial hypertension [J]. Lung, 2024, 202 (5): 753-755.

[41] Thompson K, Staffa S J, Nasr V G, et al. Mortality after

lung transplantation for children bridged with extracorporeal membrane oxygenation [J]. Ann Am Thorac Soc, 2022, 19 (3): 415-423.

[42] Chiel L E, Winthrop Z A, Fynn-Thompson F, et al. Extracorporeal membrane oxygenation and paracorporeal lung assist devices as a bridge to pediatric lung transplantation [J]. Pediatr Transplant, 2022, 26 (5): e14289.

[43] Skansebo E, Broomé M, Magnusson J, et al. Extended use of extra corporeal membrane oxygenation as bridge to lung transplantation in two patients [J]. J Cardiothorac Surg, 2020, 15 (1): 16.

[44] Sommer W, Warnecke G. Lung transplantation for pediatric pulmonary arterial hypertension-quo vadis? [J]. Cardiovasc Diagn Ther, 2021, 11 (4): 1178-1189.

[45] Jack T, Carlens J, Diekmann F, et al. Bilateral lung transplantation for pediatric pulmonary arterial hypertension: perioperative management and one-year follow-up [J]. Front Cardiovasc Med, 2023, 10: 1193326.

[46] Yue B Q, Wu B, Zhang J, et al. Pediatric lung transplantation in the largest lung transplantation center of China: embarking on a long road [J]. Sci Rep, 2020, 10 (1): 12471.

[47] Halpern A L, Kohtz P D, Helmkamp L, et al. Improved mortality associated with the use of extracorporeal membrane oxygenation [J]. Ann Thorac Surg, 2019, 108 (2): 350-357.

[48] Sainathan S, Ryan J, Sharma M, et al. Outcome of bridge to lung transplantation with extracorporeal membrane oxygenation in pediatric patients 12 years and older [J]. Ann Thorac Surg, 2021, 112 (4): 1083-1088.

[49] Di Nardo M, Cousin V L, Alunni-Fegatelli D, et al. Extracorporeal membrane oxygenation after liver transplant in children: a review of the ELSO registry [J]. ASAIO J, 2024, 70 (7): 621-624.

[50] Ziogas I A, Johnson W R, Matsuoka L K, et al. Extracorporeal membrane oxygenation in pediatric liver transplantation: a multicenter linked database analysis and systematic review of the literature [J]. Transplantation, 2021, 105 (7): 1539-1547.

[51] Sánchez Pérez B, Pérez Reyes M, Aranda Narvaez J, et al. New therapeutic strategy with extracorporeal membrane oxygenation for refractory hepatopulmonary syndrome after liver transplant: a case report [J]. World J Transplant, 2024, 14 (1): 89223.

[52] Wu W K, Grogan W M, Ziogas I A, et al. Extracorporeal membrane oxygenation in patients with hepatopulmonary syndrome undergoing liver transplantation: a systematic review of the literature [J]. Transplant Rev (Orlando), 2022, 36 (2): 100693.

[53] Huang J, Yoeli D, Sundaram S S, et al. Extracorporeal membrane oxygenation as rescue therapy in a pediatric liver transplant recipient with very severe hepatopulmonary syndrome [J]. Pediatr Transplant, 2022, 26 (2): e14185.

[54] Shimura K, Matsumoto S, Ide K, et al. Rescue venovenous extracorporeal membrane oxygenation for the deterioration of acute respiratory distress syndrome in pediatric liver transplantation [J]. Pediatr Transplant, 2022, 26 (6): e14305.

[55] Short K, McBride M, Anderson S, et al. Survival of infants with severe congenital kidney disease after ECMO and kidney support therapy [J]. Pediatrics, 2024, 153 (3): e2023062717.

[56] Rybalko A, Pytal A, Kaabak M, et al. Case report: successful use of extracorporeal therapies after ECMO resuscitation in a pediatric kidney transplant recipient [J]. Front Pediatr, 2020, 8: 593123.

[57] Fujita S, Ushijima T, Shinohara G, et al. Veno-venous extracorporeal membrane oxygenation support of pulmonary insufficiency using Avalon Elite® cannula in pediatric patients [J]. J Artif Organs, 2024, 27 (3): 301-305.

[58] Vijayakumar N, Badheka A, Chegondi M, et al. Successful use of Protek Duo cannula to provide veno-venous extra-corporeal membrane oxygenation and right ventricular support for acute respiratory distress syndrome in an adolescent with complex congenital heart disease [J]. Perfusion, 2021, 36 (2): 200-203.

[59] Espinoza J, Shah P, Nagendra G, et al. Pediatric medical device development and regulation: current state, barriers, and opportunities [J]. Pediatrics, 2022, 149 (5): e2021053390.

（收稿：2024-09-23 录用：2024-11-22 在线：2024-12-31）
（本文编辑：李 娜）