**儿童ECMO支持期间的神经监测**



翻译：周娜 广州市妇女儿童医学中心

审校：于新迪 上海交通大学医学院附属上海儿童医学中心

**摘要**

对于患有严重心脏或呼吸衰竭的儿童来说，体外膜氧合（ECMO）是一种可以挽救生命的干预措施。它越来越多的被用于治疗较为复杂严重的疾病。对于接受ECMO治疗的儿童来说，神经损伤（包括缺血性中风、颅内出血、缺血缺氧性损伤和癫痫发作）是发病和死亡的重要原因。这篇综述讨论了ECMO患者神经损伤的流行病学和病理生理学，并回顾了儿童中神经功能监测的现状，包括计算机断层扫描和超声检查的结构成像、近红外光谱和经颅多普勒超声的脑血流监测，以及脑电图和血浆生物标志物的生理监测。本文强调了该领域的新需求和新进展，这些将提高对ECMO神经损伤的检查率并有助于减轻患者的神经系统后遗症。

**前言**

体外膜氧合（ECMO）是体外生命支持的一种形式，常规用于治疗传统干预措施难以治愈的严重心脏或呼吸衰竭患者。1976年报道了第一例接受 ECMO 治疗的呼吸衰竭新生儿。此后，ECMO技术的应用大幅增加。截至目前体外生命支持组织登记了172,000 次 ECMO辅助支持，其中约儿童患者占50%。ECMO的适应症包括呼吸系统疾病如呼吸窘迫综合征、先天性或后天性心脏病因供氧不足导致的严重心功能障碍或在体外心肺复苏（ECPR）情况下提供循环支持的应急措施。

ECMO指的是滚轴泵或离心泵将血液驱入氧合器进行气体交换，最后动脉血通过管道回到患者体内。该循环系统通过静脉插管将患者血液引流出来通过泵的作用进入氧合器，进行氧合并去除 CO2，氧合血根据 ECMO 模式通过静脉或动脉管道回输至患者体内。尽管ECMO可提供数天至数月的心肺支持，但它与神经损伤的风险显著相关。接受ECMO支持的儿童有癫痫发作、颅内出血（ICH）和缺血性中风的风险，这些并发症与幸存者的死亡率和长期发病率的增加有关。确定ECMO适应症时最基本的原则是如何识别患有潜在可逆疾病的儿童，否则如果没有ECMO支持这些儿童很可能会有较高的死亡或发病率。诸多因素影响了谁最有可能从 ECMO中获益，目前具有呼吸和心脏ECMO相关测试特征的预测模型已经问世。

**ECMO模式**

根据引流和回输插管的位置，体外膜氧合具有多种配置和模式。静脉-静脉(V-V)和静脉-动脉(V-A)是两种最常见的模式。V-V ECMO主要用于呼吸支持，可以通过使用双腔插管或通过不同静脉中的两个单腔插管来完成。V-A ECMO主要用于心脏支持，通常使用一根静脉插管进行引流作用和一根动脉插管进行回输动脉血。

若通过颈部插管进行V-V或V-A ECMO，最常使用右侧颈内静脉。这可能会造成一定程度的脑静脉引流阻塞，最终导致颅内压升高和脑灌注压降低。一些中心对年龄较小的患者通过增加头部引流达到减压脑静脉的作用，但此方法的分析结果并未显示出任何益处。

与V-V相比，接受V-A支持的儿童神经并发症发生率较高。管路中的气体或血栓会阻塞脑血管导致缺血性中风。如果动脉插管位于颈动脉，动脉插管同侧的脑灌注依赖于对侧颈动脉和完整的 Willis 环。研究表明，与股动脉插管相比，颈动脉插管的神经系统并发症发生率更高。颈动脉置管的V-A ECMO撤离时可以结扎或修复颈动脉。修复可以保持双侧颈动脉血流，若需要二次ECMO 时可对同一动脉进行二次置管。

**围ECMO期神经损伤的病理生理学**

***脑灌注***

ECMO患者神经损伤的病理生理学因素较多且复杂，大脑对脑血流的紊乱极其敏感。ECMO通过多种方式干扰脑血流。结扎右颈总动脉和右颈内静脉不但减少了通过右颈动脉的顺行血流，增加了通过左颈动脉的血流，而且影响静脉回流。此时右大脑半球的灌注依赖于Willis环的完整性，若Willis环存在解剖学变异，则无法支持大脑半球的侧支血流。V-A ECMO中的非搏动血流与人类脑血管反应性的改变和微循环灌注障碍有关。生理条件下，脑小动脉的自主调节可确保一定范围灌注压下有足够的脑血流量，但ECMO可能会损害脑的自主调节使大脑容易受到缺血和出血双重损伤。

在接受ECMO的婴儿中，经颅多普勒（TCD）提供了脑血流动力学改变的一些观察结果。早期研究发现平均搏动指数（PI）随着ECMO启动而降低，并且在高ECMO流量下随时间延长而降低，但在低ECMO流量下实际上会有增加的趋势。研究人员推测PI的增加与脑血流量（CBF）增加相关，从而导致ICH。 但其他研究表明，与健康或其他危重患者相比，使用 ECMO的CBF速度（CBFV）显著降低并且存在年龄相关的变异性。这些发现可能与ECMO患儿经常使用镇静剂导致脑代谢需求减少有一定相关性。

***炎症***

除了改变CBF之外，ECMO还与严重的炎症反应相关。患者的血液广泛暴露于管路的异物表面会引发类似于全身炎症反应综合征的级联反应，加剧了插管前危重疾病已经存在的炎症反应。ECMO启动后，血液与ECMO回路表面之间相互作用并激活补体系统，使得活化C3和TNF-α早期升高。活化C3是补体级联反应的效应分子之一，称为“过敏毒素”，可导致血管舒张、募集免疫细胞并触发其他促炎症反应。在 ECMO 的儿童中已经证实TNF-α、IL-6和IL-8等炎症因子呈现的增高趋势。除了这些炎症介质外，ECMO 还通过激活因子 XII 激活接触途径从而引起炎症和凝血级联反应。

***栓塞症***

ECMO患者的非出血性脑损伤与预后较差息息相关。 由于血液大量暴露于人工材料，ECMO会诱导促凝血的发生。血小板激活、组织因子释放和接触系统激活使平衡转向凝血并增加血栓形成的风险。管路中的血栓形成可导致氧合器功能障碍、管路故障和弥散性血管内凝血（DIC）。管路的DIC状态常常导致患者发生DIC以及出血并发症。氧合器远端回路中的血栓形成尤其令人担忧，因为在V-A ECMO中凝块有引起患者动脉栓塞的风险。由于管路的促血栓特性所以ECMO需要抗凝。ECMO抗凝的最佳策略仍未知，最佳的药物、剂量、监测方法和输注血液制品的阈值目前尚不明确。普通肝素输注、活化凝血时间以及抗Xa因子监测法已成为标准做法。 比伐卢定输注结合活化部分凝血活酶时间监测已成为普通肝素的替代品。

**围ECMO期急性脑损伤的流行病学**

由于ECMO前事件（如缺氧、低血压、酸中毒、心脏骤停）、合并症以及与ECMO本身相关的因素的存在，使用ECMO的儿童面临神经损伤的风险且发生率高达25%。ECMO最常见的神经系统并发症是癫痫发作、ICH和缺血性卒中。

***癫痫发作***

在使用ECMO的儿童中癫痫发作是很常见的并发症之一，发生率为 6% - 23%，发生率不同可能与不同机构的监测标准不同有关。 ELSO报告的癫痫发作率为7% - 8.4%，具体取决于适应症和年龄组。相反，在具有广泛视频脑电图 (EEG) 监测项目的机构进行的单中心研究中，脑电图和电临床癫痫发作率高达11% - 23%。这些研究中亚临床癫痫发作较为常见，在癫痫发作患者中的发病率高达83%，这表明亚临床癫痫发作在临床上可能未被充分诊断，并强调了ECMO期间进行神经监测的必要性。

大多数癫痫发作在ECMO的前48小时内，首次癫痫发作很少发生在 ECMO 72小时之后。 多项研究显示，约一半发生癫痫的患者会有癫痫持续状态。 ECMO儿童发生癫痫发作的危险因素包括心脏适应症、ECPR、ECMO前心脏骤停、左心发育不良综合征、缺血性卒中和乳酸性酸中毒。

使用ECMO 的儿童癫痫发作的原因有多种，通常是脑出血或缺血性中风等结构性损伤发生的首要现象。癫痫发作也与ECMO儿童的预后较差相关，尽管这些研究通常没有针对结构性脑损伤进行相应调整。

***颅内出血***

对于接受 ECMO 治疗的患者来说，抗凝十分重要且必要。据报道ICH是最严重的并发症之一，发生率为4-16%。使用ECMO的儿童发生ICH时，需要做出有关停止抗凝或调整抗凝目标、预后以及是否继续进行 ECMO 辅助的艰难决策。由于神经影像学检测没有固定标准，ICH的检查结果存在差异。当脑出血紧急发生，症状一般较为严重且存活率低至20%。历史教训是如果患者出现大面积ICH无法在ECMO下存活，需要停止ECMO并调整临床治疗方向。 另一方面，使用MRI评估颅内微出血在 ECMO 幸存者中非常常见，但临床意义尚不明确。进一步的前瞻性研究检测接受ECMO 治疗的儿童的亚临床脑出血，将为临床决策提供更好的信息。

***缺血性损伤***

ECMO患者的缺血性损伤的原因较多，有两种常见模式：低灌注状态引起的全身缺血缺氧性损伤和血栓栓塞性损伤（例如动脉栓塞导致的原位血栓形成、来自ECMO回路的栓子）。与未发生缺血性中风的儿童相比，使用 ECMO的患者伴发缺血性损伤的死亡率较高，生存率低至25%。

接受ECMO的儿童中发生缺血性损伤的发生率为2% - 17%。ECMO患者缺乏标准化的神经影像学方案。与MRI相比，CT和超声检测缺血性损伤的敏感性较低，真实发生率会更高。使用标准化、通用成像的前瞻性研究将有助于了解缺血性损伤真实的发病率，但鉴于转运危重患者的固有风险以及缺乏广泛使用的便携式技术，该研究仍具有挑战。

在一项为期 10 年的回顾性研究中，81名新生儿在ECMO后接受了常规脑部 MRI检查，其中6%的梗塞主要发生在动脉血管区域，V-A 和 V-V ECMO两组之间的梗塞发生率没有差异。在对878名使用V-A ECMO的成年患者进行的为期8年的回顾性研究中，近8%的患者被诊断出与ECMO相关的神经损伤，其中5%为缺血性中风。在一项由677名新生儿组成的大型回顾性队列中，缺血性卒中发生率为 5%，其中30名患儿患有动脉缺血性卒中，4名患儿伴发静脉窦血栓。在另一项针对179名ECMO患者的研究中，82名患者接受了至少一次CT扫描，49名出现脑损伤，其中27名出现缺血性脑损伤。这些患者中41% 发生双侧梗塞，15%发生右侧孤立性梗塞，15%发生左侧孤立性梗塞。在报告的系列病例中，ECMO患者缺血性损伤的分布是可变的，影响因素包括插管部位和Willlis环的完整性，这将影响静脉压和脑灌注。

**结果**

和普通重症监护病房人群相比，接受ECMO支持的严重呼吸或心力衰竭儿童的死亡风险较高。出院存活率因年龄和适应症而异，新生儿和儿童 ECPR的存活率 最低（42%），新生儿呼吸ECMO最高（73%）。

接受ECMO支持并存活至出院的儿童经常因ECMO住院期间的神经损伤而面临神经系统的长期缺陷。ECMO支持的危重症幸存者中10%至60%存在认知缺陷、行为问题、运动障碍和较低的生活质量。改善ECMO支持儿童的神经监测可以识别神经系统高危的病理生理状态并尽早发现神经损伤。下一步将确定旨在改变这些状态的干预措施以降低神经系统并发症的发病率并改善预后。

**围ECMO期的神经监测**

***神经系统检查***

虽然神经系统检查是确定神经功能的金标准，但接受 ECMO 治疗的患者往往无法获得可靠的检查。在使用ECMO设备时患者需要镇静和麻醉，以此保护病人和管路的安全性，尤其是儿童患者。如果是清醒ECMO，由于代谢紊乱和监护室环境导致的精神状态的可逆变化（脑病和谵妄），经常干扰临床医生对患者的神经系统的评估结果。一些中心强调神经系统检查的重要性，提倡进行镇静模式或“神经系统唤醒测试”。虽然可以直接评估神经功能但存在潜在的风险，包括增加患者的痛苦和疼痛，增加颅内压和脑灌注压，尽管也有证据表明这并不一定会改变脑损伤患者的代谢和氧合。神经系统唤醒测试并不能连续进行，且有时患者的状况可能会在很大程度上影响镇静的调整。因此，临床医生经常依靠各种方式对神经功能进行辅助评估。

***定量瞳孔测量***

尽管ECMO治疗期间患者的神经系统检查受到一定限制，但可以进行瞳孔反射的检测，自动瞳孔测量在神经科的重症患者中得到更广泛的使用和研究。该方法可以评估瞳孔反射的静态和动态两个方面，并在儿科患者中建立了规范数据。一项对28名患有急性脑损伤或脑病的儿童进行的研究，包括 1,171 次颅内压 （ICP）测量结果，发现当颅内压大于20 mmHg时，神经瞳孔指数（NPi）、结合专有算法的瞳孔反应性测量、瞳孔大小变化百分比、收缩速度和扩张速度均减低。尽管瞳孔反应性与ICP 测量呈负相关，但NPi并不能预测入组时ICP正常的患者后续出现的ICP 升高。在前72小时内进行评估时，异常 NPi（小于3）也与严重脑损伤的成年患者不良神经系统结果相关。 在一项对100名接受 V-A ECMO 治疗的成年患者的研究中，在 ECMO 启动后24至72小时内的任何时间，NPi小于3预测90天死亡率的特异性为100%。 定量瞳孔测量也应用于评估镇静儿童的疼痛，由于存在如药物治疗和代谢状况等诸多潜在的混杂因素，仍需更多的研究了解影响瞳孔反应性的相关因素。

**结构成像**

***超声波***

颅脑超声是目前最常见的便携式、无创成像技术，适用于ECMO支持的儿童，已成为临床实践中常规神经监测的一部分。目前ELSO神经监测指南建议定期进行颅脑超声检查，前3-5天每天一次，然后根据临床情况（例如新发癫痫发作或血红蛋白突然下降）调整检查的间隔时间。尽管颅脑超声很易接受，但也存在一定的局限性，除了视野限制和诊断标准的可变性之外，还包括前囟是否闭合的年龄限制。其次，颅脑超声异常与幸存者的长期神经发育结果的关联有限，通常只能预测严重病变。对50例ECMO后新生儿脑MRI研究的评估显示，MRI和超声检查结果并不一致，超声结果正常的患者中有一半发现MRI异常。因此，颅脑超声可以被用作主要的神经影像筛查方式，需要CT或MRI进行验证性检测。

颅脑超声检测的异常分为血管闭塞异常（包括动脉缺血性中风或静脉血栓形成）、原发性出血（脑实质、脑外和脉络丛）以及其它异常（局灶性发育不良、脑积水、进展性血肿、脑室周围白质软化、皮质层坏死、豆纹状血管病和弥漫性缺氧缺血性脑病）。TCD还可以评估颅内血管的阻力指数（包括颈内动脉、基底动脉、Willis环、上矢状窦、盖伦静脉和直窦）。初步实验表明前囟轻微受压时阻力指数变异性大于10% 与ECMO的神经系统并发症相关。

***CT***

对于无法进行颅脑超声检测的大龄儿童，头颅CT仍然是ECMO的首选成像方式。 CT提供了大脑的完整视图，能够以高灵敏度和最小操作者间的差异来识别 ICH。然而CT在识别早期缺血性损伤方面并不敏感。CT使用越多，神经系统异常的检出率越高，但也存在神经系统并发症漏检的可能。根据严重程度，检测到的异常可能显著影响患者的治疗效果，必要时可改变抗凝管理策略，甚至停止ECMO支持。

在没有便携式CT的情况下，头部CT的主要限制之一是需要院内转运以及相关的潜在并发症，因此限制了其在怀疑急性神经损伤的情况下的使用。此外CT与辐射暴露风险相关，这是进行头部CT检查决策时需要权衡的另一个因素。虽然对比-增强CT可通过血管造影和灌注成像研究血流情况，但ECMO患者血流动力学的改变会显著影响此类成像的准确性。

**CBF监测**

***TCD 超声检查***

TCD是一种无创、便携且廉价的实时监测CBFV的方法。 通过不同声窗的声波可以测量Willis环周围所有大脑动脉的CBFV和PI。PI反映下游血管阻力，可能会因脑灌注或自动调节失调、颅内高压、脑顺应性差或远端狭窄而改变。TCD的一般应用包括评估颅内压、测量脑血管自动调节、评估血管痉挛、检测脑栓塞或大血管闭塞。ECMO会导致TCD波形变化，但这些应用在接受ECMO治疗的患者中仍处于研究阶段。

在接受ECMO治疗的儿童中，CBFV与神经损伤之间存在不同的关联。在一项针对27名患者的研究中，CBFV与神经损伤（包括局灶性缺陷、癫痫发作或严重脑电图异常）之间没有统计学上的差异。另一项针对18名儿童的研究发现脑出血患者的CBFV升高，且在发现损伤前2-6天有升高的趋势。

除了提供 ECMO儿童脑血流动力学信息外，TCD还可用于实时快速识别可能需要干预的神经损伤原因（如导致中风的栓子）。TCD也有一定的局限性，约10-20%的患者没有足够的声窗来进行可靠的声波传输。该技术的性能依赖于熟练的操作者，因此其可用性受到限制。这些特点使得TCD更适合间断性评估而非连续监测。

***微血管成像***

微血管成像是一种新兴的多普勒超声检查技术，可以提供囟门未闭婴儿大脑深层浅层结构中微血管高分辨率的可视化。该方法可以识别血管迂曲度、灌注不均匀性或不对称性以及血管充血的情况。一项针对30名患者的研究证明了该技术的可行性，虽然基底神经节异常与神经系统结果没有相关性，但白质血管充血显示与不良神经系统结果（死亡、癫痫发作或脑血管损伤）存在显著相关性。

**生理监测**

***脑氧饱和度***

近红外光谱（NIRS）是一种连续监测局部脑氧饱和度（crSO2）的方法。 在婴儿和儿童的ECMO中，在插管至ECMO后氧和血红蛋白浓度降低游离血红蛋白浓度随之升高，甚至在第一小时内恢复到基线。最近的研究分析了NIRS监测与神经系统结果之间的相关性。在一项关于34名新生儿的研究中，crSO2 < 50% 以及与基线相比至少20% 的变化（ΔcrSO2）与死亡或脑损伤相关。迄今为止，对153名婴儿和儿童进行的最大规模单中心研究证实了这一点，其中这两个因素再次与出院的不良结局相关（死亡或存活出院但小儿脑功能类别 PCPC评分>2、与基线 PCPC相比有所下降）。另一项针对63名患者的研究发现了类似的相关性，使用了略不同的结果定义神经系统损伤（包括任何明显的神经损伤）为 crSO2 < 50% 和ΔrScO2 >20% 提供的阳性预测值分别为78%和80%。

脑氧饱和度测量的另一个活跃研究领域是脑自动调节的测定。在6名V-A ECMO的新生儿中，ECMO流量减少与脑血管自动调节丧失相关，多部位氧合血红蛋白浓度与平均动脉血压之间的相关证明了这一点。最近一项对29名接受V-A或V-V ECMO治疗的儿童进行的试点研究证明了连续评估大脑自动调节的可行性。研究人员发现接受 ECMO治疗时发生急性神经系统事件的儿童平均脑氧合反应指数较高、自动调节受损的时间比例也较高，且脑氧合反应指数大于0.3。

使用 NIRS 测量脑血氧饱和度具有提供连续监测的独特优势，并且可以轻松集成到多模式监测系统中。NIRS的局限性包括监测区域的高度受限，因此NIRS仅提供脑氧饱和度的区域测量。虽然持续监测脑的氧合和自动调节的效用有望，仍需进一步的研究来确定这些干预措施的效果。

***脑电图***

脑电图通过测量皮质电活动提供有关大脑生理学的相关信息。可为危重儿童提供持续无创监测。与脑血氧饱和度提供的区域信息不同，完整的脑电图电极阵列提供有关整体皮质功能的信息。除了展示癫痫发作电图外，脑电图背景还可以提供有关CBF的间接信息。随着脑灌注减少，脑电图最初显示较快频率活动的丧失，随后慢速频率活动增加，最终活动抑制。即使在危重状态下，由于镇静和其他因素影响基线脑电图结果已经异常时，以上这些变化也可以被检测到。

最大的脑电图监测案例之一研究了112 名使用ECMO的儿童，其中99人接受了至少1天的连续视频脑电图（cEEG）监测，发现癫痫发作高达16%。在癫痫发作的患者中，大多数没有临床相关性的电图记录，超过一半表现出电图癫痫持续状态。在该队列中，电图癫痫发作患者的死亡率和神经系统预后不良更为常见。另一项针对70名接受cEEG监测的ECMO儿童的研究发现，23% 的儿童出现电图癫痫发作，7% 的儿童出现电图癫痫持续状态。 第三个由19名患者组成的较小病例系列进一步支持了这些发现，21%的患者出现电图癫痫发作。在这些研究中，大多数癫痫发作在ECMO启动后的前48 小时内被监测到。

脑电图背景的变化也可能预示神经损伤。有研究发现12% 的局灶性背景异常，其中大多数与急性神经影像学异常相关。另有研究也表明脑电图信号的局灶性减慢和局灶性衰减通常与神经影像学损伤有关。在所有研究中，癫痫发作的发生也与随后检测到的神经损伤高度相关。

振幅积分脑电图（aEEG）是一种更简单的监测大脑电活动的方法，它可提供时间压缩的脑电图追踪，是新生儿缺氧缺血性脑病神经监测的常用方法。研究发现aEEG前24小时背景评分>17（满分32）高度预测不良结果（阳性预测值为95%）。尽管aEEG的电极蒙太奇减少了灵敏度和定位异常的能力，但相对简单、易于使用使其成为完整蒙太奇cEEG的有力替代方案。

连续脑电图为ECMO期间的神经监测提供了巨大的希望，但它也有一定的挑战。多数cEEG监测是连续性记录间歇性分析，因此并不能实时检测到变化的发生。重症监护环境中的大量设备可能会在录音中产生电气伪影，需要进行故障排除。对于这些儿童来说导线连接和维护也很困难，尤其在灌注状态不佳和水肿发生时。因此，cEEG提供了极其有价值的信息，同时也需要熟练且经验丰富的技术人员来进行重要的研究。

***血浆生物标志物***

血浆生物标志物在危重疾病中已得到广泛研究，在使用ECMO的儿科患者中也有一定的研究。对一间儿科重症监护病房的22名和80名儿童进行的前瞻性研究确定了 GFAP、MCP1、NSE 和S100b的峰值水平与不良结局（死亡或由PCPC 确定的神经功能障碍的存活）之间的相关性。两个中心的观察队列并未发现炎症生物标志物与长期神经行为结果之间存在任何关联；但与存活出院的儿童相比，死亡儿童的IL-6和纤溶酶原激活剂抑制剂-1水平明显升高。

血浆生物标志物具有探测病理生理级联的优势，并且可识别改善 ECMO预后的可变因素。区分中枢神经系统全身和外周的生物标志物仍然是确定神经损伤与危重症的特定相关性的一个混杂因素。外周生物标志物的检测还依赖于血脑屏障的破坏，这是一种随损伤发生的病理生理过程，但可能与严重程度并不直接相关。对该人群血浆生物标志物的进一步研究将有助于阐明更多的问题。

**知识差距和未来方向**

更多的使用神经监测策略可以深入了解ECMO期间的生理变化以及神经损伤的发生。目前神经监测主要用于确定神经系统的预测因素，但随着研究的进一步完善，神经监测策略可能为ECMO患者提供精准药物医疗，调整治疗以提供个体优化的脑灌注并可降低神经损伤的发生率。例如ECMO启动时动脉CO2分压显著下降与神经系统的不良事件和死亡率相关。动脉CO2分压具有重要的脑血管调节效应，ECMO管路的技术改进（如调整流速或定量去除血液中的CO2）可提供一种主动改变CBF的方法达到神经保护的目的。神经监测也可用于将血压控制在自动调节范围内的情况。调整ECMO流量也是改善血流动力学并减少微循环损伤的一种手段。

实现这些目标的第一步是制定持续的监测策略。在当前使用的技术中NIRS和EEG可连续监测，但两者是连续性记录间断性评估。能够检测神经监测重要变化的自动化算法的开发将有助于推动这一事业。定量脑电图就是从脑电图背景中提取趋势以提供预后价值。鉴于ECMO 患者的临床神经学检查存在明显的局限性，我们还需要影像学研究来确认神经系统的急性损伤。使用ECMO转运患者并非易事，进一步优化和采用便携式床边成像方式可能有助于提高检测急性损伤的发生率。迄今为止临床医生不得不依靠 CT 扫描或超声进行脑成像，但这些方法在检测急性损伤的时间和空间分辨率上受限。随着技术的不断发展，如便携式且与ECMO电路兼容的MRI最终可能会进一步增强神经损伤检测的能力。

**结论**

体外膜氧合对于患有严重心肺衰竭的儿童来说是一种挽救生命的方法，但神经损伤仍然是严重的并发症之一，会对长期预后产生负面影响。多种因素（包括但不限于危重疾病和镇静需要）限制了临床监测神经功能损伤或恶化的能力。 本文回顾了神经监测的多种方法，每种方法都有自己的特色和局限性。增加此类技术的使用将加深我们对ECMO患者发生的神经损伤的理解、提供预测此类损伤的能力，并最终制定合理治疗策略以改善预后。