

心肺复苏后神经功能预后检测技术研究进展

鲁晓荣¹, 檀立端^{2*}, 冯晓飞²

¹承德医学院研究生学院, 河北 承德

²承德市中心医院急诊科, 河北 承德

收稿日期: 2026年2月28日; 录用日期: 2026年3月23日; 发布日期: 2026年3月31日

摘要

心脏骤停是威胁生命健康的重要因素之一, 存活患者常遗留不同程度的神经功能损伤, 对心肺复苏后患者进行早期神经功能评估对患者神经功能预后具有重要意义。目前推荐的可以用来评估神经功能预后的工具包括血清学标志物、临床评估、神经电生理检测及影像学检查。文章梳理了上述技术的原理、应用价值、局限性及最新研究进展, 探讨实施多模态联合评估策略及未来发展方向, 以期为临床实践提供决策参考。

关键词

心脏骤停, 神经功能预后, 检测技术

Research Progress on Neurological Function Prognosis Detection Techniques after Cardiopulmonary Resuscitation

Xiaorong Lu¹, Liduan Tan^{2*}, Xiaofei Feng²

¹Graduate School of Chengde Medical University, Chengde Hebei

²Department of Emergency, Chengde Central Hospital, Chengde Hebei

Received: February 28, 2026; accepted: March 23, 2026; published: March 31, 2026

Abstract

Cardiac arrest is a critical factor threatening life and health. Survivors often suffer varying degrees of neurological impairment. Early neurological function assessment for patients after cardiopulmonary

*通讯作者。

resuscitation holds significant importance for predicting neurological outcomes. Currently recommended tools for assessing neurological prognosis include serum biomarkers, clinical evaluation, neuroelectrophysiological testing, and imaging studies. This article reviews the principles, application value, limitations, and recent research advances of the aforementioned techniques. It further discusses the implementation of multi-modal combined assessment strategies and future development directions, aiming to provide a reference for clinical practice.

Keywords

Cardiac Arrest, Neurological Prognosis, Detecting Techniques

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

美国心脏病协会(American Heart Association, AHA)于 2025 年发布的报告[1]中显示, 2023 年美国任何年龄群体中, 经紧急医疗服务(Emergency Medical Services, EMS)接诊的院外心脏骤停(Out-of-Hospital Cardiac Arrest, OHCA)的发生率为 83.4/10 万, 存活出院率 10.2%, 8.1% 的患者获得神经功能良好(CPC 1~2 级)的结局。中国 2022 年中国心脏骤停与心肺复苏报告指出经 EMS 接诊的 OHCA 发生率为 95.1/10 万, 且呈明显上升趋势, 神经功能预后良好率仅为 0.8% [2]。并且, 在 OHCA 后复苏的患者中, 超过 80% 的患者会发生缺氧缺血性脑损伤(Hypoxic-Ischemic Brain Injury, HIBI)进而导致昏迷, 其中约 2/3 的患者会在出院前死亡, 死亡原因大部分是因为预测有不良神经功能预后从而停止生命支持治疗(Withdrawal of Life-Sustaining Therapy, WLST) [3]。因此, 准确预测患者神经功能预后, 对于避免不恰当的 WLST 发生、减少对神经功能预后不佳的患者进行长期治疗造成的医疗资源浪费及患者家属经济负担至关重要。临床上预测心肺复苏后患者神经功能预后的手段包括血清学标志物、临床评估、神经电生理检测及影像学检查, 现将心肺复苏后神经功能预后检测技术进行综述。

2. 血清学标志物

2.1. 神经元特异性烯醇化酶

神经元特异性烯醇化酶(Neuron Specific Enolase, NSE)于 1965 年被 Moore 和 McGregor 发现, 主要存在于神经细胞及神经内分泌细胞中, 其在外周循环中的含量可忽略, 其与缺血性脑卒中后的神经功能缺损相关, 神经细胞损伤后, 细胞内 NSE 被释放到脑脊液与外周循环中, 且其浓度升高的程度与神经功能受损的严重程度呈正相关, 因而被美国神经病学学会(American Academy of Neurology)推荐预测心肺复苏患者脑低灌注后的不良神经结局, 然而由于一些研究结果的冲突, 这一建议并未得到广泛实施[4]。Sandroni 等[3]分析的 16 个评估 NSE 的研究中提示, 在自主循环恢复(Return Of Spontaneous Circulation, ROSC)后, 血清 NSE 值增高预示患者在 24、48 和 72 小时假阳性率(False Positive Rate, FPR)为 0% 的神经功能预后不良结局, 对应的阈值范围分别为 39.8~172 $\mu\text{g/L}$, 34~120 $\mu\text{g/L}$, 33~79 $\mu\text{g/L}$ 。敏感性分别为 7.6%~56%, 24.6%~60.2%, 39.3%~52.6%。在临床实践中, 为更好预测患者神经预后情况, 应选取适当的 NSE 阈值来平衡诊断的敏感性和特异性。2021 年欧洲复苏委员会和欧洲重症监护学会发布的复苏后护理指南[5]推荐可以将心脏骤停后 48 小时和(或) 72 小时的 NSE > 60 $\mu\text{g/L}$ 作为神经预后不良的指标。尽管

Lee 等[6]的单中心回顾性研究结论与指南推荐一致,但仍需要大样本、多中心研究来证实这一推荐指标的临床可实践性。此外,NSE水平还受溶血、非神经内分泌来源的肿瘤、检测方式、样本存储条件(时间和温度)的影响。除神经元外,NSE也存在于脑外多种器官及组织中[4],因此改进样本采集及存储方式有助于帮助其在临床推广。

2.2. S100B

S100B是存在于人星形胶质细胞内的钙结合蛋白,星形胶质细胞对缺氧敏感,因此在发生OHCA后,S100B会释放到血清中,被认为有可能是神经元损伤和BBB破坏相关的标志物;且因为其半衰期为2小时,所以血清S100B持续升高能够提示其被组织不断释放。S100B通常与NSE共同作为判断复苏后患者神经功能预后的指标,二者初始升高水平与患者神经功能预后呈负相关。Pascal Stammet [7]通过调查来自于29个地域700名院外心脏骤停患者,分析687名患者的血清标本,认为血清S100B水平对于预测患者神经功能预后在24小时内最有意义,而在48和72小时无显著临床价值。且S100B的水平不受延长TTM的影响,常与NSE联用提高预测价值。

2.3. Tau 蛋白

Tau蛋白存在于中枢神经细胞的轴突内,心脏骤停发生后,血脑屏障被破坏,Tau蛋白进入血液循环,因此Tau蛋白也可以反映神经细胞受损情况,进而预测心肺复苏后患者神经功能预后,且有研究证实在第48小时和72小时,Tau对于预测神经功能预后方面比NSE具有更高的准确性[8]。总Tau(T-Tau)反应神经组织的损伤情况,在停搏后72小时,95%特异度Tau的临界值为7.9 $\mu\text{g/L}$,灵敏度为71%[9];磷酸化Tau(p-Tau)通常作为阿尔兹海默病(Alzheimer's Disease, AD)潜在的特征性生物学标志物[10]。最近有研究认为AD与脑缺血有着相同的病理特征和发病机制[11]。因此有学者认为p-Tau可以作为评判早期神经损伤严重程度的指标并进行探究。Nshton [9]的一项多中心前瞻性队列研究认为在心脏骤停的第24小时,p-Tau在血液中的高水平对于预测神经功能预后方面,与T-Tau有着相同的准确性。而在第48小时或72小时,这种准确性将会显著降低。其原因是p-Tau在最初的24小时内由于神经元损伤被大量释放进入血液循环;而在随后的48小时至72小时中,血液中的p-Tau被迅速清除,且不再以较高的速率分泌入血,循环中p-Tau水平较前明显降低,接近神经功能结局良好患者的浓度。因此,p-Tau在24小时内的高水平能够提示初始神经损伤的严重程度,其预测价值与T-Tau相当;48小时至72小时T-Tau浓度持续增加在提示中枢神经系统持续性损伤上有较高的价值。

2.4. 神经丝轻链蛋白

神经丝轻链蛋白(Neurofilament Light, NfL)是神经元细胞骨架结构内的一种蛋白亚型,是标志神经元损伤的一种重要蛋白质,OHCA发生导致神经元损伤后,NfL会释放到脑脊液及外周血液循环中[12]。Marion Moseby-Knappe 等[13]人的多中心大样本量前瞻性试验证明了NfL在第24小时、48小时及72小时相较于NSE、S100B、Tau蛋白都表现出较高的敏感性,其ROC曲线下面积均显著大于其他三种生物标志物。在上述四种标志物中,NfL是心脏骤停后24小时预测不良结局更为准确的生物学标志物,且不受年龄、性别、ROSC时间、是否接受旁观者心肺复苏、入院时血清中乳酸浓度及溶血的影响,因此可以作为其他预测神经功能预后手段的补充,尤其是在发生溶血时,作为NSE的补充手段,并能成为早期预测神经功能不良结局方面有前途的生物标志物,对预防过早WLST导致患者死亡有重要作用[14]。然而NfL由超高灵敏度的单分子蛋白检测技术(Single-molecule Array, Simoa)测定,其在临床常规实验室使用有限,因此NfL并未在临床广泛应用[15]。

2.5. 神经胶质纤维酸性蛋白

神经胶质纤维酸性蛋白(Glial Fibrillary Acidic Protein, GFAP)主要分布于中枢神经系统的星型胶质细胞,参与神经胶质细胞骨架的构成,几乎只在中枢神经系统表达,在神经细胞损伤之后血清浓度增加,可作为预测心脏骤停后神经功能预后的指标。Klitholm 等[16]的研究结果提示 GFAP 在心脏骤停后第 48 及 72 小时对于神经功能预后的预测价值高于 NSE。这点在一项纳入 819 名患者的大型研究中得到证实,该研究表明在所有时间点,GFAP 在预测神经功能结局方面的价值都优于 NSE [15]。在其他研究中,同样认为 GFAP 是 OHCA 后第 48 小时预测神经功能结局的可靠指标[8] [17]。但是由于在特异度 $\geq 95\%$ 时,灵敏度过低,因此在临床上并不能保证其预测结局的可靠性[15]。

2.6. 泛素羧基末端水解酶-L1

泛素羧基末端水解酶-L1 (Ubiquitin Carboxyl-Terminal Hydrolase-L1, UCH-L1)存在于神经组织中,在维持神经系统功能的稳定性作用重大[18],OHCA 后,神经细胞受损,UCH-L1 被释放,通过受损的 BBB 进入外周血液循环。很多试验都表明 UCH-L1 与神经系统受损的严重程度及神经功能预后相关。周梦菊等[19]对 175 名心脏骤停后体外心肺复苏自主循环恢复患者的 logistic 多因素回归分析发现 UCH-L1 是复苏后患者神经功能结局的独立预测因子。且 UCH-L1 与 GFAP 联合使用,相对于二者单独使用对神经功能结局预测价值及特异性更高,优于 NSE。Wihersaari 等[20]通过评估 249 名 OHCA 患者血清 UCH-L1 水平,明确了第 24 小时 UCH-L1 在预测第 12 个月的神经功能不良结局的临界值为 9.1 ng/mL,敏感性为 66.1%,特异性为 62.9%。但证实 UCH-L1 单独在心脏骤停后第 24 和第 48 小时对预测神经预后的能力有限。在 UCH-L1 预测神经功能结局的价值研究方面,需要进一步研究探索。

NSE 是目前指南唯一推荐的生物学标志物,然而,其截断值尚未统一,且证据仍不充分,易受溶血等因素的影响。因此,在临床应用时需要结合其他生物学标志物、影像学检查及神经电生理检测共同评估;血清 S100B、Tau 蛋白及 NfL 在早期预测神经功能预后方面有很大价值,可以作为 NSE 的补充指标,但 NfL 受到检测方式的限制,在临床上应用较为困难;对于 GFAP 的研究相对较少,且敏感度较低,因而需要同其他标志物共同预测神经功能结局。在探究血清标志物对预测神经功能预后的研究中,许多研究会将两种生物学标志物联合评估,如 NSE 与 S100B、GFAP 与 Tau 蛋白、GFAP 与 NfL、Tau 与 NfL、GFAP 与 UCH-L1 等,生物学标志物联合评估对于预测神经结局的价值往往大于单独应用,这提示在临床实践中,不应局限于一项指标,应结合多种检测手段对患者进行综合评估。NSE 及 S100B 在多数医院实验室可检测,成本较低,适合作为常规筛查手段;Tau 蛋白、NfL、GFAP 及 UCH-L1 尚未在临床实验室普及,并依赖试剂盒检测,因此成本较高且耗时长,限制了其在临床实践中的应用。

3. 临床评估

脑干反射包括瞳孔对光反射(Pupillary Light Reflex, PLR)及角膜反射(Cornral Reflex, CR)。听觉脑干电位(Auditory Brainstem Response, ABR)是评估脑干功能的定量测量方法,然而这种测量方法因其复杂程度和对高水平专业知识的要求在临床难以推广;瞳孔对光反射是一种简单评估脑干功能的方法,在预测昏迷心脏骤停患者神经功能结局方面优于 ABR,CA 后 72 小时患者双侧 PLR 消失是 6 个月神经功能不良结局的预测因子[21],目前瞳孔对光反射的测量包括手电筒测量标准瞳孔对光反射(sPLR)及自动红外瞳孔测量法(AIP)测量定量瞳孔对光反射(qPLR),AIP 是一种对瞳孔进行定量测量的工具,它可以提供客观且准确的 PLR 数据,其敏感性与特异性明显优于 sPLR [22]。关于成年 CA 患者神经功能预后的 meta 分析中[23],通过对比 sPLR 与 qPLR 的准确性提示在预测神经功能结局价值方面,晚期 sPLR 价值最大,早期 qPLR 具有与其相似的特异性。国际双盲性多中心研究[24]提示,在第 24 h, 48 h, 72 h, qPLR 在预测

3个月神经功能不良结局比sPLR更准确。qPLR因其客观性、准确性、可重复性使其成为预测神经功能结局的可靠预测工具。但qPLR单独使用易受药物或周围环境影响,与其他AIP测量数据如瞳孔大小、反应潜伏期、收缩和扩张速度整合为神经学瞳孔指数(Npi)可能有更好的预后价值。临床评估可在床旁进行,且无患者转运风险,成本低,耗时短,易于在临床推广。

4. 神经电生理检测

4.1. 脑电图

心脏骤停后出现的肌阵挛状态通常与脑电图尖波、爆发抑制及持续周期性放电对应,这往往提示神经功能结局的不良预后因素。全身周期性放电是皮质神经元失去其功能的表现,因此伴有节律性周期性脑电图的CA后昏迷患者,在48h内无论是否使用强化抗癫痫治疗,在第3个月神经功能结局无差异性[25][26]。2021年美国临床神经生理学会(American Clinical Neurophysiology Society, ACNS)提出的危重症患者脑电图标准化术语[27]中,抑制(有或没有周期性放电)与爆发抑制与不良神经结局相关,且爆发抑制预测价值更高[28],系统评价认为在ROSC 24h之后这种预测价值更为准确[29],因为大多数患者CA后会出现抑制型EEG,神经功能结局良好患者往往会在24h内转变为连续正常电压EEG,未转变的患者大多意味不良神经结局。2021年欧洲复苏理事会与重症医学会指南将ROSC后24h抑制背景认为是预后不良的可靠标志,由于爆发抑制出现时间及幅度没有统一标准,暂未将其纳入神经功能预后的预测指标[5]。

4.2. 脑电双频指数

脑电双频指数(Bispectral Index, BIS)通过额颞区的电极来记录潜在的脑电图和头皮肌电图信号,是一种快速、简单的定量脑电图。许多研究已经确定了BIS检测CA后神经功能结果之间的关系。大规模观察性研究[30]中,TTM前12h内平均BIS > 26可以预测良好神经功能结局,当与其他变量(如ROSC时间、PH值、入院时血清中乳酸水平等因素)共同分析时,其预测神经功能结果的价值显著增加,特别是在24h~48h之间;单中心前瞻性观察性研究[31]表明第12h的BIS ≤ 25可以作为OHCA患者的不良神经结局的预测因子。单中心回顾性研究[32]认为,BIS预测神经功能结局的阈值随时间有不同变化,在CPR开始后4h < 40, 12.5h < 23, ROSC后24h < 45为预测神经功能不良结局的阈值。另一项前瞻性观察性研究[33]也表明,CA后24h内BIS出现0值对于预测神经功能不良结局的特异性为84%,且与0值持续时间相关。这表明BIS有助于在ROSC后24h内段预测神经功能结局。且相较于EEG, BIS几乎不需要专业培训即可解读,这为临床使用带来便利。

4.3. 躯体感觉诱发电位

躯体感觉诱发电位(Somatosensory Evoked Potential, SSEP)通过刺激腕部正中神经,来评估丘脑-皮质特异感觉投射系统。N20为刺激20ms后出现的负峰,P25为刺激25ms后的正峰,N20-P25为二者之间的振幅。单中心前瞻性研究[34]表明,SSEP同时具有预测神经功能良好与不良结局的能力,该研究通过调整SSEP振幅对神经功能结局预测价值的敏感性和特异性,认为CA后72h后N20基线临界值 $2\mu\text{V}$, N20-P25 > $3.2\mu\text{V}$ 可以预测神经功能良好结局;N20基线临界值 $0.88\mu\text{V}$, N20-P25阈值为 $1\mu\text{V}$ 可以预测神经功能不良结局,且敏感性和特异性在可接受范围之间。目前研究结果普遍认为N20振幅与神经损伤的严重程度呈反比,但基于敏感度和特异度的考量,不同研究对于临界值的选择不一[29][35][36],这可能会限制SSEP在临床实践中的应用。

神经电生理检测均可床旁进行、无转运风险; BIS操作简便、无需专业培训; EEG及SSEP需专业人员判读,虽有所限制,但其临床推广价值仍较高。

5. 影像学及床旁可视化技术

5.1. CT

心肺复苏后昏迷患者的 HIBI 是导致死亡、影响神经功能的重要因素，早期的脑水肿在 CT 上表现为灰质/白质(GM/WM)比率，即 GWR 降低。目前对判断神经功能预后的时间点无一致共识，在 ROSC 后 24 h 内头颅 CT 检查中 GWR 在 1.16~1.22 之间常提示神经系统的不良结局，但多个研究的敏感性不同[37]，回顾性观察研究[38]表明延迟头颅 CT 扫描(ROSC 后 72~96 h)相较于早期 CT 扫描(ROSC 后 6 h)预测神经功能价值更高。CT 平扫虽然是评估心脏骤停患者脑缺氧最常用的手段，但其对于早期脑缺氧性改变的敏感性低于 CT 灌注成像(CTP)，CTP 可以提供大脑血流(CBF)信息，能够提示大脑各部分的血供情况，当 $CBF < 20 \text{ ml}/100\text{g}/\text{min}$ 时，神经元功能可逆性降低； $CBF < 10 \text{ ml}/100\text{g}/\text{min}$ 时，数分钟内即可出现不可逆性神经元损伤，这说明 CTP 可以作为判断神经系统损伤，预测神经功能预后的潜力指标[39]，一项前瞻性队列研究[40]首次验证了其在院内脑死亡之间的预测价值，但需要未来大量研究来明确其临界值。

5.2. MRI

GWR 在早期神经功能预后尚有争议，与之相比，在超早期(ROSC 后 6 h 内)弥散加权 MRI (DWI)高信号、表观弥散系数(ADC)低信号是预测早期神经功能结局有价值的工具[41]。此外单中心回顾性研究[42]使用弥散加权成像 Alberta 早期 CT 评分(DWI-ASPECTS)评估 6 个月神经功能结局，认为 DWI-ASPECTS 评分与神经结局呈负相关；弥散张量成像(DTI)较前者提供了更多的信息，可以评估急性、亚急性及迟发性心脏骤停后脑部微结构的损伤，其中平均扩散率(MD)反映扩散的大小，分数各向异性(FA)反映扩散方向。前瞻性多中心队列研究[43]认为游离水校正 MD (对灰质敏感)与 FA (对白质敏感)可以区分神经功能良好与不良结局，且二者组合可能会增加对于神经系统不良结局预测的准确性。另一项前瞻性队列研究[44]也表明标准化全脑白质 FA (WWW-FA)可以准确预测 6 个月时的神经功能结局。

5.3. 经颅多普勒超声

神经系统结局主要取决于脑供养的需求是否满足，经颅多普勒超声(Transcranial Doppler Sonography, TCD)通过检测脑血管血流动力学指标搏动指数(PI)来反映脑灌注情况。前瞻性观察性研究[45]认为 ROSC 早期脑血流及大脑中动脉(MCA)PI 可能与神经系统结果相关；回顾性研究[46]认为 TCD 血管舒缩反应性(Vasomotor Response, VMR)的降低与 1 个月神经不良结局有关，且不受年龄、糖尿病及高血压病史、镇静等的影响。但由于 TCD 对专业技术要求高，且易受评估者主观影响，在临床推广需要更多研究佐证。

5.4. 近红外光谱

近红外光谱(Near Infrared Spectrum Instrument, NIRS)是另一种检测脑氧供情况的技术，NIRS 发射近红外光(700~950 nm)的探针，发色团(主要是氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白)会吸收 NIRS 中不同的波长，依据吸收波长的不同，可以区分氧合血红蛋白及脱氧血红蛋白，从而计算二者之间的比例，转化为脑氧饱和度：区域脑氧饱和度(rSco2)或组织氧饱和度指数(TOI) [47]。目前文章表明 rSco2 有助于预测 CA 患者预后、优化 CPR 策略并指导神经保护，但 rSco2 帮助预测神经功能潜力有限，需要进一步研究来评估 NIRS 对神经功能预测的价值[48]。

5.5. 视神经鞘直径

CA 后患者可能会出现颅内压(ICP)增高，并与不良神经功能结局相关，当 ICP 升高时，视神经鞘直径(ONSD)增宽，因此 ONSD 可以反映 ICP 的变化，有研究表明 ONSD 增宽与 CA 后神经功能不良结局

密切相关，且 ONSD 通过超声测量，相较于腰椎穿测测量风险更低，相较于其他影像学检查更具临床价值。Meta 分析[49]显示大多数文章使用 ≥ 5.4 mm 作为区分神经功能结局的临界值，前瞻性队列研究[50]认为在 CA 后 1~3 天重复测量 ONSD 可以增加预测不良神经结局的价值，但对预测良好神经结局无益。

CT 普及但需转运，对重症患者存在风险；MRI 临床价值高但耗时长、费用较高，基层开展较为困难。TCD、NIRS、ONSD 均可床旁完成，无转运风险，其中 ONSD 超声测量简便、成本低，临界值明确，最具临床推广优势。

Table 1. The optimal monitoring time and characteristics of each detection technology

表 1. 各监测技术最佳监测时间及特点

监测指标	最佳时间	推荐截断值/阈值	备注
血清学标志物			
NSE	48 h~72 h	$>60 \mu\text{g/L}$	指南推荐；但易受溶血等因素影响
S100B	24 h 内	$>0.25 \mu\text{g/L}$	不受 TTM 影响，常与 NSE 联用
Tau	p-Tau 24 h T-Tau 48 h~72 h	$>24 \mu\text{g/L}$ $>7.9 \mu\text{g/L}$	有研究显示在 48 h~72 h，准确性优于 NSE
NfL	24 h	$>478 \mu\text{g/L}$	敏感性优于 NSE、S100B、Tau，不受溶血干扰；检测技术复杂、成本高
GFAP	72 h	$>1696 \mu\text{g/L}$	多项研究表明预测价值优于 NSE
UCH-L1	24 h	$>9.1 \mu\text{g/L}$	预测价值有限，与 GFAP 联合应用预测价值更高
临床评估			
NPi	24 h~72 h	≤ 2	客观、准确、可重复；与其他数据整合更佳
神经电生理检测			
脑电图	24 h 后	抑制背景	指南将抑制背景作为预后不良的可靠标志
BIS	24 h 内	4 h < 40 , 12.5 h < 23 , 24 h < 45	便利；但阈值随时间变化，尚未统一
SSEP	72 h 后	良好结局: $N20 > 2 \mu\text{V}$, $N20\text{-}P25 > 3.2 \mu\text{V}$ 不良结局: $N20 < 0.88 \mu\text{V}$, $N20\text{-}P25 < 1 \mu\text{V}$	临界值尚未统一
影像学及床旁可视化技术			
CT	/	$\text{CBF} < 10 \text{ ml}/100\text{g}/\text{min}$	包括 GWR、延迟 CT 扫描、CTP 多种技术；但尚无统一标准；时间节点无一致共识
MRI	6 h 内	DWI 高信号，ADC 低信号	尚无统一标准，多指标组合预测价值可能更高
TCD	/	$\text{PI} > 1.49$	专业技术要求高，易受主观影响
NIRS	/	$>30\%$	有助于预测良好神经功能预后，但潜力有限
ONSD	1~3 天	$\geq 5.4 \text{ mm}$	无创评估颅内压，风险低

6. 展望

近年来有关心脏骤停后神经功能预测手段不断更新,包括临床评估、血清学标志物、神经电生理检测及影像学检查,各项技术有其最佳监测时间及特点(见表1),不同评估方法各有其优劣,临床评估简单易行,但对专业知识要求较高,易受主观因素影响;血清学检查客观准确,但目前关于血清学标志物没有统一标准,不同研究结果的截断值不同,且易受储存条件及治疗手段的影响;神经电生理检查可以对患者进行连续监测,但同样受评估者及截断值的限制;影像学检查受使用场所及时间限制。尽管如此,然而单一手段评估神经功能预后的价值有限,现阶段仍需要多种检测手段联合评估,进行多模态联合分析。未来研究应聚焦于血清标志物的临床截断值以及随时间动态变化规律,探索多种检测技术联合使用,建立多模态预测模型,并开展前瞻性、多中心研究,以更高级别证据指导临床实践。对于临床评估、神经电生理及影像学等具有较高专业技术水平及主观性较强、难以识别的技术手段,可探索人工智能进行辅助分析,以挖掘人眼难以识别的预后模式。

参考文献

- [1] Martin, S.S., Aday, A.W., Allen, N.B., *et al.* (2025) 2025 Heart Disease and Stroke Statistics: A Report of US and Global Data from the American Heart Association. *Circulation*, **151**, e41-e660.
- [2] 中国心脏骤停与心肺复苏报告(2022年版)概要[J]. 中国循环杂志, 2023, 38(10): 1005-1017.
- [3] 唐婷婷, 廉应涛, 余追. 心搏骤停后重要器官损伤病理生理机制及相互作用研究进展[J]. 医学研究生学报, 2022, 35(7): 772-777.
- [4] Babkina, A.S., Lyubomudrov, M.A., Golubev, M.A., Pisarev, M.V. and Golubev, A.M. (2024) Neuron-Specific Enolase—What Are We Measuring? *International Journal of Molecular Sciences*, **25**, Article No. 5040. <https://doi.org/10.3390/ijms25095040>
- [5] Nolan, J.P., Sandroni, C., Böttiger, B.W., Cariou, A., Cronberg, T., Friberg, H., *et al.* (2021) European Resuscitation Council and European Society of Intensive Care Medicine Guidelines 2021: Post-Resuscitation Care. *Intensive Care Medicine*, **47**, 369-421. <https://doi.org/10.1007/s00134-021-06368-4>
- [6] Lee, D.H., Lee, B.K., Cho, Y.S., Kim, D.K., Ryu, S.J., Min, J.H., *et al.* (2024) Validation of Neuron-Specific Enolase in Cardiac Arrest Patients with Limited Withdrawal of Life-Sustaining Therapy. *Heliyon*, **10**, e34618. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34618>
- [7] Stammet, P., Dankiewicz, J., Nielsen, N., Fays, F., Collignon, O., Hassager, C., *et al.* (2017) Protein S100 as Outcome Predictor after Out-of-Hospital Cardiac Arrest and Targeted Temperature Management at 33 °C and 36 °C. *Critical Care*, **21**, Article No. 153. <https://doi.org/10.1186/s13054-017-1729-7>
- [8] Humaloja, J., Lähde, M., Ashton, N.J., Reinikainen, M., Hästbacka, J., Jakkula, P., *et al.* (2022) Gfap and Tau Protein as Predictors of Neurological Outcome after Out-of-Hospital Cardiac Arrest: A Post Hoc Analysis of the COMACARE Trial. *Resuscitation*, **170**, 141-149. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2021.11.033>
- [9] Ashton, N.J., Moseby-Knappe, M., Benedet, A.L., Grötschel, L., Lantero-Rodriguez, J., Karikari, T.K., *et al.* (2023) Alzheimer Disease Blood Biomarkers in Patients with Out-of-Hospital Cardiac Arrest. *JAMA Neurology*, **80**, Article No. 388. <https://doi.org/10.1001/jamaneurol.2023.0050>
- [10] Ashton, N.J., Brum, W.S., Di Molfetta, G., Benedet, A.L., Arslan, B., Jonaitis, E., *et al.* (2024) Diagnostic Accuracy of a Plasma Phosphorylated Tau 217 Immunoassay for Alzheimer Disease Pathology. *JAMA Neurology*, **81**, Article No. 255. <https://doi.org/10.1001/jamaneurol.2023.5319>
- [11] Pluta, R. and Czuczwar, S.J. (2024) Ischemia-Reperfusion Programming of Alzheimer's Disease-Related Genes—A New Perspective on Brain Neurodegeneration after Cardiac Arrest. *International Journal of Molecular Sciences*, **25**, Article No. 1291. <https://doi.org/10.3390/ijms25021291>
- [12] Khalil, M., Teunissen, C.E., Lehmann, S., Otto, M., Piehl, F., Ziemssen, T., *et al.* (2024) Neurofilaments as Biomarkers in Neurological Disorders—Towards Clinical Application. *Nature Reviews Neurology*, **20**, 269-287. <https://doi.org/10.1038/s41582-024-00955-x>
- [13] Moseby-Knappe, M., Mattsson, N., Nielsen, N., Zetterberg, H., Blennow, K., Dankiewicz, J., *et al.* (2019) Serum Neurofilament Light Chain for Prognosis of Outcome after Cardiac Arrest. *JAMA Neurology*, **76**, Article No. 64. <https://doi.org/10.1001/jamaneurol.2018.3223>
- [14] Moseby-Knappe, M., Mattsson-Carlsson, N., Stammet, P., Backman, S., Blennow, K., Dankiewicz, J., *et al.* (2021)

- Serum Markers of Brain Injury Can Predict Good Neurological Outcome after Out-of-Hospital Cardiac Arrest. *Intensive Care Medicine*, **47**, 984-994. <https://doi.org/10.1007/s00134-021-06481-4>
- [15] Ebner, F., Moseby-Knappe, M., Mattsson-Carlgrén, N., Lilja, G., Dragancea, I., Undén, J., *et al.* (2020) Serum GFAP and UCH-L1 for the Prediction of Neurological Outcome in Comatose Cardiac Arrest Patients. *Resuscitation*, **154**, 61-68. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2020.05.016>
- [16] Klitholm, M., Jeppesen, A.N., Christensen, S., Parkner, T., Tybirk, L., Kirkegaard, H., *et al.* (2023) Neurofilament Light Chain and Glial Fibrillary Acidic Protein as Early Prognostic Biomarkers after Out-of-Hospital Cardiac Arrest. *Resuscitation*, **193**, Article ID: 109983. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2023.109983>
- [17] Arctadius, I., Levin, H., Thorgeirsdóttir, B., Moseby-Knappe, M., Cronberg, T., Annborn, M., *et al.* (2024) Plasma Glial Fibrillary Acidic Protein and Tau: Predictors of Neurological Outcome after Cardiac Arrest. *Critical Care*, **28**, Article No. 116. <https://doi.org/10.1186/s13054-024-04889-0>
- [18] Humaloja, J., Ashton, N.J. and Skrifvars, M.B. (2022) Brain Injury Biomarkers for Predicting Outcome after Cardiac Arrest. *Critical Care*, **26**, Article No. 81. <https://doi.org/10.1186/s13054-022-03913-5>
- [19] Zhou, M.J., Xian, L.N., Sun, G.X., *et al.* (2023) Relationship between Serum Levels of High Motility Protein B1, Ubiquitin Carboxy-Terminal Hydrolase L1 and Poor Prognosis of Neurological Function after Cardiopulmonary Resuscitation.
- [20] Wihersaari, L., Reinikainen, M., Tiainen, M., Bendel, S., Kaukonen, K., Vaahersalo, J., *et al.* (2023) Ubiquitin C-Terminal Hydrolase 11 after Out-of-Hospital Cardiac Arrest. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*, **67**, 964-971. <https://doi.org/10.1111/aas.14257>
- [21] Peluso, L., Oddo, M., Sandroni, C., Citerio, G. and Taccone, F.S. (2022) Early Neurological Pupil Index to Predict Outcome after Cardiac Arrest. *Intensive Care Medicine*, **48**, 496-497. <https://doi.org/10.1007/s00134-022-06646-9>
- [22] Bang, H.J., Youn, C.S., Sandroni, C., Park, K.N., Lee, B.K., Oh, S.H., *et al.* (2024) Good Outcome Prediction after Out-of-Hospital Cardiac Arrest: A Prospective Multicenter Observational Study in Korea (the KORHN-PRO Registry). *Resuscitation*, **199**, Article ID: 110207. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2024.110207>
- [23] Wang, C., Wu, C., Liu, C.C., Hsu, T., Liu, M.A., Wu, M., *et al.* (2021) Neuroprognostic Accuracy of Quantitative versus Standard Pupillary Light Reflex for Adult Postcardiac Arrest Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Critical Care Medicine*, **49**, 1790-1799. <https://doi.org/10.1097/ccm.0000000000005045>
- [24] Oddo, M., Sandroni, C., Citerio, G., Miroz, J., Horn, J., Rundgren, M., *et al.* (2018) Quantitative versus Standard Pupillary Light Reflex for Early Prognostication in Comatose Cardiac Arrest Patients: An International Prospective Multicenter Double-Blinded Study. *Intensive Care Medicine*, **44**, 2102-2111. <https://doi.org/10.1007/s00134-018-5448-6>
- [25] Ruijter, B.J., Keijzer, H.M., Tjepkema-Cloostermans, M.C., Blans, M.J., Beishuizen, A., Tromp, S.C., *et al.* (2022) Treating Rhythmic and Periodic EEG Patterns in Comatose Survivors of Cardiac Arrest. *New England Journal of Medicine*, **386**, 724-734. <https://doi.org/10.1056/nejmoa2115998>
- [26] Wijdicks, E.F.M. (2022) Futility of Suppressing Seizurelike Activity in Postresuscitation Coma. *New England Journal of Medicine*, **386**, 791-792. <https://doi.org/10.1056/nejme2118851>
- [27] Hirsch, L.J., Fong, M.W.K., Leitinger, M., LaRoche, S.M., Beniczky, S., Abend, N.S., *et al.* (2021) American Clinical Neurophysiology Society's Standardized Critical Care EEG Terminology: 2021 Version. *Journal of Clinical Neurophysiology*, **38**, 1-29. <https://doi.org/10.1097/wnp.0000000000000806>
- [28] Sandroni, C., Cronberg, T. and Sekhon, M. (2021) Brain Injury after Cardiac Arrest: Pathophysiology, Treatment, and Prognosis. *Intensive Care Medicine*, **47**, 1393-1414. <https://doi.org/10.1007/s00134-021-06548-2>
- [29] Sandroni, C., D'Arrigo, S., Cacciola, S., Hoedemaekers, C.W.E., Kamps, M.J.A., Oddo, M., *et al.* (2020) Prediction of Poor Neurological Outcome in Comatose Survivors of Cardiac Arrest: A Systematic Review. *Intensive Care Medicine*, **46**, 1803-1851. <https://doi.org/10.1007/s00134-020-06198-w>
- [30] Arbas-Redondo, E., Rosillo-Rodríguez, S.O., Merino-Argos, C., Marco-Clement, I., Rodríguez-Sotelo, L., Martínez-Marín, L.A., *et al.* (2022) Bispectral Index and Suppression Ratio after Cardiac Arrest: Are They Useful as Bedside Tools for Rational Treatment Escalation Plans? *Revista Española de Cardiología (English Edition)*, **75**, 992-1000. <https://doi.org/10.1016/j.rec.2022.03.004>
- [31] Eertmans, W., Genbrugge, C., Vander Laenen, M., Boer, W., Mesotten, D., Dens, J., *et al.* (2018) The Prognostic Value of Bispectral Index and Suppression Ratio Monitoring after Out-of-Hospital Cardiac Arrest: A Prospective Observational Study. *Annals of Intensive Care*, **8**, Article No. 34. <https://doi.org/10.1186/s13613-018-0380-z>
- [32] Ochiai, K., Shiraiishi, A., Otomo, Y., Koido, Y., Kanemura, T. and Honma, M. (2017) Increasing or Fluctuating Bispectral Index Values during Post-Resuscitation Targeted Temperature Management Can Predict Clinical Seizures after Rewarming. *Resuscitation*, **114**, 106-112. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2017.03.011>
- [33] Eertmans, W., Genbrugge, C., Haesevoets, G., Dens, J., Boer, W., Jans, F., *et al.* (2017) Recorded Time Periods of Bispectral Index Values Equal to Zero Predict Neurological Outcome after Out-of-Hospital Cardiac Arrest. *Critical Care*,

- 21, Article No. 221. <https://doi.org/10.1186/s13054-017-1806-y>
- [34] Benganem, S., Nguyen, L.S., Gavaret, M., Mira, J., Pène, F., Charpentier, J., *et al.* (2022) SSEP N20 and P25 Amplitudes Predict Poor and Good Neurologic Outcomes after Cardiac Arrest. *Annals of Intensive Care*, **12**, Article No. 25. <https://doi.org/10.1186/s13613-022-00999-6>
- [35] Benganem, S., Pruvost-Robieux, E., Bouchereau, E., Gavaret, M. and Cariou, A. (2022) Prognostication after Cardiac Arrest: How EEG and Evoked Potentials May Improve the Challenge. *Annals of Intensive Care*, **12**, Article No. 111. <https://doi.org/10.1186/s13613-022-01083-9>
- [36] Oh, S.H., Park, K.N., Choi, S.P., Oh, J.S., Kim, H.J., Youn, C.S., *et al.* (2019) Beyond Dichotomy: Patterns and Amplitudes of SSEPs and Neurological Outcomes after Cardiac Arrest. *Critical Care*, **23**, Article No. 224. <https://doi.org/10.1186/s13054-019-2510-x>
- [37] Sandroni, C., D'Arrigo, S. and Nolan, J.P. (2018) Prognostication after Cardiac Arrest. *Critical Care*, **22**, Article No. 150. <https://doi.org/10.1186/s13054-018-2060-7>
- [38] In, Y.N., Lee, I.H., Park, J.S., Kim, D.M., You, Y., Min, J.H., *et al.* (2022) Delayed Head CT in Out-of-Hospital Cardiac Arrest Survivors: Does This Improve Predictive Performance of Neurological Outcome? *Resuscitation*, **172**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2022.01.003>
- [39] Alcock, S., Singh, S., Wiens, E.J., Singh, N., Ande, S.R., Lampron, K., *et al.* (2023) CT Perfusion for Assessment of Poor Neurological Outcome in Comatose Cardiac Arrest Patients (CANCCAP): Protocol for a Prospective Study. *BMJ Open*, **13**, e071166. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2022-071166>
- [40] Shankar, J., Alcock, S., Wiens, E., Ayroso, M., Park, J., Singh, N., *et al.* (2025) Computed Tomography Perfusion Assessment of Poor Neurological Outcome in Comatose Cardiac Arrest Patients (CANCCAP): A Prospective Study. *Critical Care*, **29**, Article No. 211. <https://doi.org/10.1186/s13054-025-05454-z>
- [41] Kang, C., Min, J.H., Park, J.S., You, Y., Jeong, W., Ahn, H.J., *et al.* (2023) Association of Ultra-Early Diffusion-Weighted Magnetic Resonance Imaging with Neurological Outcomes after Out-of-Hospital Cardiac Arrest. *Critical Care*, **27**, Article No. 16. <https://doi.org/10.1186/s13054-023-04305-z>
- [42] Park, J.Y., Kim, Y.H., Ahn, S.J., Lee, J.H., Lee, D.W., Hwang, S.Y., *et al.* (2023) Association between the Extent of Diffusion Restriction on Brain Diffusion-Weighted Imaging and Neurological Outcomes after an Out-of-Hospital Cardiac Arrest. *Resuscitation*, **187**, Article ID: 109761. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2023.109761>
- [43] Keijzer, H.M., Duering, M., Pasternak, O., Meijer, F.J.A., Verhulst, M.M.L.H., Tonino, B.A.R., *et al.* (2022) Free Water Corrected Diffusion Tensor Imaging Discriminates between Good and Poor Outcomes of Comatose Patients after Cardiac Arrest. *European Radiology*, **33**, 2139-2148. <https://doi.org/10.1007/s00330-022-09245-w>
- [44] Velly, L., Perlberg, V., Boulier, T., Adam, N., Delphine, S., Luyt, C., *et al.* (2018) Use of Brain Diffusion Tensor Imaging for the Prediction of Long-Term Neurological Outcomes in Patients after Cardiac Arrest: A Multicentre, International, Prospective, Observational, Cohort Study. *The Lancet Neurology*, **17**, 317-326. [https://doi.org/10.1016/s1474-4422\(18\)30027-9](https://doi.org/10.1016/s1474-4422(18)30027-9)
- [45] Rafi, S., Tadie, J., Gacouin, A., Leurent, G., Bedossa, M., Le Tulzo, Y., *et al.* (2019) Doppler Sonography of Cerebral Blood Flow for Early Prognostication after Out-of-Hospital Cardiac Arrest: DOTAC Study. *Resuscitation*, **141**, 188-194. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2019.05.024>
- [46] Choi, M.H., Lee, S.E., Choi, J.Y., Lee, S., Kim, D.S., Chae, M.K., *et al.* (2021) Prognostic Effects of Vasomotor Reactivity during Targeted Temperature Management in Post-Cardiac Arrest Patients: A Retrospective Observational Study. *Journal of Clinical Medicine*, **10**, Article No. 3386. <https://doi.org/10.3390/jcm10153386>
- [47] Gomez, J.R., Bhende, B.U., Mathur, R., Gonzalez, L.F. and Shah, V.A. (2025) Individualized Autoregulation-Guided Arterial Blood Pressure Management in Neurocritical Care. *Neurotherapeutics*, **22**, e00526. <https://doi.org/10.1016/j.neurot.2025.e00526>
- [48] Takegawa, R., Hayashida, K., Rolston, D.M., Li, T., Miyara, S.J., Ohnishi, M., *et al.* (2020) Near-Infrared Spectroscopy Assessments of Regional Cerebral Oxygen Saturation for the Prediction of Clinical Outcomes in Patients with Cardiac Arrest: A Review of Clinical Impact, Evolution, and Future Directions. *Frontiers in Medicine*, **7**, Article ID: 587930. <https://doi.org/10.3389/fmed.2020.587930>
- [49] Lee, S.H. and Jong Yun, S. (2019) Diagnostic Performance of Optic Nerve Sheath Diameter for Predicting Neurologic Outcome in Post-Cardiac Arrest Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Resuscitation*, **138**, 59-67. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2019.03.004>
- [50] Verhulst, M.M.L.H., Visser, I.M., Keijzer, H.M., de Kruijff, N.L.M., Peters, E.J.G., Wilbers, T., *et al.* (2023) Additional Predictive Value of Optic Nerve Sheath Diameter for Neurological Prognosis after Cardiac Arrest: A Prospective Cohort Study. *The Ultrasound Journal*, **15**, Article No. 46. <https://doi.org/10.1186/s13089-023-00344-3>