

高压氧对脑卒中后心脏功能保护作用的研究进展

杜鑫桃¹, 祝 领²

¹西安医学院研究生工作部, 陕西 西安

²陕西省人民医院心血管内一科, 陕西 西安

收稿日期: 2025年10月11日; 录用日期: 2025年11月4日; 发布日期: 2025年11月12日

摘 要

脑卒中(Cerebral Stroke, CS)是一种高发病率、高致残率和高死亡率的脑血管疾病,严重威胁人类健康。CS除了引发神经系统损伤外,还可以通过“脑-心轴”机制影响心功能,诱发一系列心脏并发症,如心律失常、心肌损伤和心力衰竭等,进而影响患者的康复效果和远期预后。近年来,HBOT (Hyperbaric Oxygen Therapy, HBOT)作为辅助康复手段被广泛应用于CS患者中,其在改善心肌代谢、增强自主神经调节、促进微循环灌注以及抑制炎症反应等方面具有潜在益处,从而发挥心脏保护作用,进而改善CS恢复期患者的心功能状态。然而,当前尚缺乏针对CS恢复期心功能干预的高质量循证医学证据。本文综述近年来国内外关于HBOT在CS恢复期心功能改善中的研究进展,旨在为临床实践与后续研究提供理论基础与方向。

关键词

高压氧治疗, 脑卒中, 恢复期, 心功能, 康复干预

Research Progress on the Cardioprotective Effect of Hyperbaric Oxygen Therapy after Cerebral Stroke

Xintao Du¹, Ling Zhu²

¹Office of Graduate student Affairs, Xi'an Medical University, Xi'an Shaanxi

²Department of Cardiology, Division 1, Shaanxi Provincial People's Hospital, Xi'an Shaanxi

Received: October 11, 2025; accepted: November 4, 2025; published: November 12, 2025

Abstract

Cerebral Stroke (CS) is a cerebrovascular disease characterized by high incidence, high disability rate, and high mortality, which poses a serious threat to human health. In addition to causing neurological damage, CS can also affect cardiac function through the “brain-heart axis” mechanism and induce a series of cardiac complications, such as arrhythmia, myocardial injury, and heart failure. These complications further impact the rehabilitation effect and long-term prognosis of patients. In recent years, Hyperbaric Oxygen Therapy (HBOT) has been widely used as an auxiliary rehabilitation method in CS patients. It has potential benefits in improving myocardial metabolism, enhancing autonomic nerve regulation, promoting microcirculatory perfusion, and inhibiting inflammatory responses, thereby exerting a cardioprotective effect and further improving the cardiac function of CS patients in the recovery period. However, there is still a lack of high-quality evidence-based medical evidence for cardiac function intervention in the recovery period of CS. This article reviews the research progress of HBOT in improving cardiac function during the recovery period of CS at home and abroad in recent years, aiming to provide a theoretical basis and direction for clinical practice and subsequent research.

Keywords

Hyperbaric Oxygen Therapy (HBOT), Cerebral Stroke (CS), Recovery Period, Cardiac Function, Rehabilitation Intervention

Copyright © 2025 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

脑卒中(Cerebral Stroke, CS)是一种临床上常见的脑血管疾病,是指由于各种原因引起的急性脑血液循环障碍,导致持续性(超过 24 h)、局限性或弥漫性的脑功能缺损[1]。目前,CS 已被确认为全球范围内第一大致残因素及第二大死亡病因,其具有高发病率、高复发率、高致残率、高死亡率以及高经济负担等显著特征,对个人、家庭、社会乃至全球均构成了沉重的疾病负担[1][2]。研究显示,我国每年因脑卒中死亡人数约为 160 万,该疾病已成为我国居民的首要死因和致残原因[2][3]。CS 不仅会对大脑造成直接损伤,还可能通过复杂的神经-心脏交互作用(brain-heart axis)引发一系列心脏并发症,这一现象被称为脑卒中-心脏综合征(Stroke-Heart Syndrome, SHS) [4]。研究表明,CS 后心脏并发症的发生率约为 10%~20%,且显著影响患者长期预后[5]。恢复期康复治疗是 CS 患者的常规干预手段。近年来,高压氧治疗(Hyperbaric Oxygen Therapy, HBOT)作为一种辅助治疗方法逐渐受到关注。HBOT 是在高于 1 个绝对大气压的情况下吸入 100%的氧气,通过提高压力,增加溶解在血浆和组织中的氧含量,减轻氧化应激反应,改善微循环灌注,在神经与心血管系统均可能产生潜在的保护作用。本文旨在系统综述 HBOT 在 CS 恢复期心功能改善中的作用机制与临床研究进展,为未来康复策略的优化提供参考依据。

2. CS 对心功能的影响

急性 CS(尤其是缺血性卒中)可通过神经内分泌紊乱及自主神经功能障碍引发多种心脏并发症,称为脑-心综合征(Stroke-Heart Syndrome, SHS)。其主要机制包括:① 神经源性心肌损伤:CS 后交感神经系

统过度激活，儿茶酚胺大量释放，直接导致心肌细胞损伤，表现为血清心肌肌钙蛋白(cTn)升高、左心室功能障碍，甚至出现类似急性心肌梗死的病理改变[5]-[8]。② 心律失常与心电活动异常：CS 可干扰自主神经调节，引发房颤、室性心律失常或 QT 间期延长，显著增加血栓形成和心源性猝死风险[9] [10]。③ 急性血流动力学紊乱：CS 后血压剧烈波动(如高血压危象或低血压)可加重心脏负荷，诱发急性心力衰竭或心肌缺血[6] [9]。④ 全身炎症反应：卒中后的炎症因子(如白细胞介素-6 (interleukin-6, IL-6)、肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor- α , TNF- α))可能直接损伤心肌细胞，加重心脏负荷[11]。

CS 与心功能之间存在密切的双向影响关系，其中 CS 对心功能的损害尤为显著。CS 后，自主神经调节异常可导致心脏功能多方面受损，具体表现为心率变异性降低、心肌缺血加重，甚至诱发 Takotsubo 综合征等应激性心肌病变[6] [12]。这些心脏并发症不仅直接影响卒中急性期的病情稳定性，还会进一步制约患者的长期康复进程。心功能受损会降低脑灌注水平，影响神经可塑性和康复训练耐受力，导致疲劳感增强、运动耐力下降，从而延缓神经功能及肢体功能的恢复[12] [13]。此外，既往存在心功能不全(如心力衰竭、心房颤动)虽可增加 CS 发生风险并影响其预后，但 CS 后继发的心脏损伤进一步形成了恶性循环，显著增加患者再发心脑血管事件和死亡的风险[14]。因此，在 CS 全程管理中早期识别和干预心功能异常，对改善患者总体预后具有重要意义。

3. 高压氧治疗在脑卒中的应用

高压氧治疗(Hyperbaric Oxygen Therapy, HBOT)是一种让患者置身于高压舱内，在高于一个大气压的环境下(通常为 1.5~3.0 ATA)吸入 100%的氧气，从而大幅提高血氧含量、促进组织修复的医学治疗方法。

3.1. HBOT 的适应证与禁忌证

3.1.1. 适应证

HBOT 在脑卒中患者中的应用，必须建立在严格的适应证与禁忌证评估基础之上。根据《中华医学会高压氧分会关于“HBOT 适应证与禁忌证”的共识(2018 版)》，脑卒中(主要指脑梗死和脑出血)的恢复期被明确列为 II 类适应证[15] (见表 1)。

Table 1. Indications for hyperbaric oxygen therapy
表 1. HBOT 的适应证

类别	I类适应证	II 类适应证
核心定义	具有医学必要性	可能获益，但疗效存在争议
治疗建议	应积极采用	建议积极实施
主要疾病举例	1. 气泡性疾病(减压病、气栓症) 2. 急性 CO 中毒(高危人群) 3. 急性缺血状态(危兆皮瓣、骨筋膜室综合征) 4. 感染性疾病(气性坏疽、坏死性软组织感染) 5. 放射性组织损伤(放射性骨坏死、放射性直肠炎) 6. 难愈创面(糖尿病感染性溃疡)	1. 脑卒中恢复期 2. 缺氧性脑损害 3. 脊髓损伤 4. 急性冠脉综合征 5. 恶性肿瘤辅助治疗 6. 周围神经损伤
证据等级/性质	A 类(最高)至 C 类推荐，疗效明确	多为 D 级(专家意见)，潜在获益，存在争议
关键点	治疗必要，疗效明确，是标准治疗方案的一部分。	治疗合理，潜在获益，虽非标准方案，但可为患者提供额外的恢复机会。

3.1.2. 禁忌证

安全是 HBOT 的首要原则。共识将禁忌证分为“绝对禁忌证”与“相对禁忌证”，这对脑卒中患者群体同样适用。绝对禁忌证是指存在此类情况时，严禁进行 HBOT，否则可能引发严重甚至致命性后果。

相对禁忌证是指存在此类情况时，治疗风险增加，需由高压氧科医师与相关专科(如神经内科、心血管内科)医师共同评估风险获益比，在必要处理并确保安全后方可进舱治疗。与脑卒中患者常见相关的情况包括(见表 2)。

Table 2. Contraindications for hyperbaric oxygen therapy in stroke patients
表 2. 脑卒中患者 HBOT 的禁忌证

类别	具体禁忌证	对脑卒中患者的特殊考量
绝对禁忌证	未处理的气胸	卒中合并胸部创伤或并发症时需特别注意排除
	服用双硫仑	需仔细询问用药史，与头孢类药物区分
	使用博来霉素、顺铂、阿霉素	卒中合并肿瘤患者需重点关注
	早产/低体重新生儿	主要涉及儿科卒中患者
相对禁忌证	未控制的癫痫	卒中后癫痫是常见并发症，需先用药控制
	高热	控制体温是进行 HBOT 的前提
	幽闭恐惧症	卒中后情感障碍可能加重此问题，需心理疏导
	未控制的高血压	进舱前需稳定血压，避免治疗中血压剧烈波动
	血糖控制不稳定的糖尿病	卒中患者常合并糖尿病，治疗前应监测血糖
	严重肺气肿/肺大疱	老年卒中患者常见，有发生气胸风险，需评估肺功能
	心动过缓(小于 50 次/min)	确保大脑有足够的血液来承载 HBOT 输送的氧气
	活动性出血	出血性脑卒中患者必须在确认无活动性出血后方可考虑

3.2. 已报道的不良事件及其发生率

HBOT 总体安全性良好，不良事件大多轻微且可逆。多项研究显示，不良事件的发生与治疗压力、单次治疗时间、总疗程以及患者基础疾病密切相关。中耳气压伤是最常见的不良反应，发生率在 17%~80% 之间，但通过严格的调压指导，有症状的发生率可控制在 2%左右[16]。幽闭恐惧症发生率约为 1.9%~7.6% [16]。氧中毒是 HBOT 的严重并发症，但发生率极低：中枢神经型氧中毒(惊厥)：发生率约为 0.01%~0.03%，且与治疗压力和个体易感性相关[17]。肺型氧中毒：在现代采用间歇吸氧的方案下非常罕见。鼻窦气压伤发生率低于中耳气压伤，但机制类似，表现为鼻窦区疼痛和充血。气胸、空气栓塞发生率极低(<0.01%)。治疗舱内火灾极其罕见，但后果严重，需通过严格的防火安全管理(如禁带火源、规范操作)杜绝。通过严格的患者筛选、治疗前教育和规范的操作流程，大多数不良事件可以得到有效预防和控制(详见表 3)。

Table 3. Incidence of adverse events in hyperbaric oxygen therapy
表 3. HBOT 不良事件及其发生率

不良事件类型	估计发生率	临床表现	预防与处理措施
中耳气压伤	17%~80% (有症状者约 2%~20.4%) [16]	耳痛、耳鸣、听力下降、鼓膜穿孔	治疗前调压训练，症状明显时暂停治疗
幽闭恐惧症	1.9%~7.6% [16]	焦虑、恐慌、呼吸困难	心理疏导，透明舱体，陪伴治疗
暂时性近视	常见于长期治疗	近视化改变	通常可逆，治疗结束后恢复
中枢神经氧中毒	0.01%~0.03% [17]	癫痫样发作	立即停止吸氧，通常迅速缓解
肺型氧中毒	罕见(现代方案)	胸骨后疼痛、咳嗽、呼吸困难	间歇吸氧，控制单次吸氧时间
气胸/空气栓塞	<0.01%	突发胸痛、呼吸困难	立即停止治疗，紧急处理
舱内火灾	极其罕见	烧伤、吸入性损伤	严格防火措施，禁带火源

3.3. 不同 HBOT 方案的比较和选择考量

高压氧常用治疗压力范围为 1.5~2.5 ATA (见表 4)，方案制定需遵循“最低有效剂量”原则，在确保疗效的同时最大化安全性。急性期、年轻、无并发症的患者可能耐受更高压力；而老年、体弱或合并多种疾病的慢性期患者，可能从较低压力(如 1.5 ATA)开始更为稳妥。

Table 4. Comparison and selection criteria for different HBOT protocols
表 4. 不同 HBOT 方案的比较和选择考量

方案参数	常用范围与证据
治疗压力	1.5~2.5 ATA。对于慢性神经功能恢复，1.5 ATA 已被证明能有效改善脑代谢和连接性[18]。而急性缺血场景下，常采用 2.0~2.4 ATA 以最大化氧输送。
单次治疗时间	单次治疗总时间通常为 90~120 分钟，包括：加压(10~15 分钟)、稳压吸氧(60~90 分钟)、减压(10~15 分钟)。通常采用“吸氧 - 空气休息 - 吸氧”的间歇模式(如 25 分钟吸氧 × 2~3 次，中间穿插 5~10 分钟呼吸空气)，以预防肺型和中枢神经型氧中毒。
治疗频率与总疗程	每日 1 次，每周 5~6 次。总疗程对慢性期患者至关重要。一项关键 RCT 表明，40 次 HBOT 治疗能带来持续性的神经功能改善[18]。另一项研究则采用了 60 次的疗程，也观察到显著效果[19]。疗效评估通常在 20~40 次后进行。

3.4. HBOT 与其他康复治疗(如药物、物理治疗)的协同作用

高压氧(HBO)通过提升血氧分压、改善组织缺氧，为神经功能修复奠定基础。在临床实践中，HBO 常与多种康复手段联合应用，其协同效应主要体现在多靶点互补。

在神经与运动功能康复方面，HBO 与 Bobath 技术具有明确协同作用。陈敏瑶等[20]研究显示，二者联合可显著提高缺血性脑卒中患者的 Berg 平衡量表(BBS)与 Fugl-Meyer 运动功能量表(FMA)评分。HBO 与滚筒作业训练联合可从“神经修复 - 运动控制”双维度起效，沈心怡等[21]研究表明该方案能降低 NIHSS 评分，提升 Fugl-Meyer 评分与 10 m 最大步行速度。在 HBO 与肌电生物反馈联合方面，黎飞等[22]研究报道该方案治疗急性脑梗死恢复期患者总有效率达 90.57%，显著优于单一疗法。

在神经调控领域，HBO 与神经电刺激技术联用显示出良好效果。梁丹等[23]研究发现，高压氧舱内同步脑仿生电刺激可调节睡眠调控通路，延长脑卒中相关睡眠障碍患者的总睡眠时间 with 深度睡眠。张丹等[24]研究证实，HBO 联合 10 Hz 高频 rTMS 可优化老年缺血性脑卒中后认知障碍患者的神经可塑性，MoCA 评分与 P300 波幅改善显著。刘伟等[25]研究进一步表明，HBO 联合脑电仿生电刺激治疗昏迷患者，早期介入并完成 3 个疗程可获得最佳疗效。

在药物治疗协同方面，孙淑君等[26]研究显示 HBO 联合丁苯酞可协同减轻大动脉粥样硬化性缺血性脑卒中患者的神经功能缺损。黄奕郡[27]等研究证实，HBO 与依达拉奉右莰醇联用能通过清除自由基与改善脑氧供的协同作用，降低急性脑梗死患者的氧化应激损伤。

3.5. HBOT 成本构成与效益评估

HBOT 的直接医疗成本：HBOT 单次治疗费用、医师评估费、设备折旧与维护费；间接成本：患者及家属的时间成本、交通住宿费等。HBOT 的效益评估：直接效益：可能减少后续因功能障碍导致的住院、护理和药物费用。间接效益/无形效益：包括改善生活质量(QALYs, 质量调整生命年)、恢复生产力、减轻家庭与社会照护负担。对慢性脑卒中患者，虽然前期 HBOT 投入较高，但如果能显著减少长期的残疾和护理依赖，从长远视角来看可能具有成本效益优势。特别是对于恢复工作年龄的患者，功能改善带来的生产力恢复可能抵消部分治疗成本。

4. 高压氧在心脏功能治疗方面的研究

HBOT 在 CS 恢复期的应用, 尤其是对心功能的潜在影响, 近年来受到广泛关注。

4.1. 高压氧对心功能的作用机制

4.1.1. 改善心肌线粒体功能

线粒体是心肌能量代谢的关键细胞器, 其功能异常是心功能减退的重要机制之一。Heidler 等通过分离猪心肌的肌膜下线粒体(SSM)和肌间线粒体(IFM), 采用高压氧处理(2.4 bar, $\text{FiO}_2 = 1.0$, 240 min), 发现 IFM 中氧化磷酸化(OXPHOS)关键酶(复合体 I、III、V)活性显著升高, 且 F_1F_0 -ATP 合酶从解体状态重组为功能性复合体, 线粒体基质 pH 从 7.0 恢复至与 SSM 一致的碱性水平[28]。这一研究表明, 高压氧可通过促进线粒体复合体组装, 增强心肌能量生成能力, 为心功能改善提供物质基础[29]。Leitman 等进一步在人体研究中证实, 60 次 HBOT (2 ATA, 90 min/次)后, 患者心肌性能指数(MPI)从 0.29 ± 0.07 降至 0.26 ± 0.08 ($p = 0.03$), 提示心肌收缩 - 舒张协调性提升, 这与线粒体功能优化导致的能量供应改善直接相关[30]。

HBOT 的间歇性高氧环境可模拟缺氧预适应的保护效应, 激活低氧诱导因子(HIF)等介导的细胞保护通路, 上调超氧化物歧化酶(SOD)等抗氧化酶活性, 减少活性氧(ROS)积累, 保护心肌细胞线粒体功能[31][32], 减少心肌细胞的凋亡[33]。

4.1.2. 调节神经 - 体液平衡

CS 后交感神经兴奋及下丘脑 - 垂体 - 肾上腺(HPA)轴激活是导致心肌损伤的重要机制。Mihailovic 等选取 12 名自行车运动员, 在力竭运动后采用高压氧(1.3 ATA, 97% O_2 , 75 min)干预, 通过心率变异性(HRV)分析发现, 高压氧组 RMSSD (反映迷走神经活性)显著升高($p = 0.017$), 提示高压氧可增强心脏副交感神经活性, 降低交感神经过度激活导致的心肌耗氧增加[34]。这一机制对 CS 患者具有特殊意义: CS 后 insular 皮层损伤常导致自主神经功能紊乱, 而高压氧可能通过抑制交感神经兴奋, 减少儿茶酚胺释放, 从而减轻心肌毒性[8][34]。

4.1.3. 促进心肌微循环灌注

心肌灌注不足是 CS 后心功能损伤的常见原因, 而高压氧可通过诱导血管新生改善心肌血供。通过抑制氧化应激反应, 减少血管内皮损伤, 改善血管舒张功能, 从而优化全身及心脑血管的血流动力学[35]。Hadanny 等选取 63 例老年受试者(年龄 > 64 岁), 随机分为高压氧组(30 例, 60 次治疗, 2 ATA, 90 min/次)和对照组(33 例), 采用心脏 MRI 评估发现, 高压氧组心肌血流量(MBF)从 0.34 ± 0.10 ml/100 g/min 增至 0.42 ± 0.19 ml/100 g/min ($p = 0.008$), 心肌血容量(MBV)从 0.53 ± 0.14 ml/100 g 增至 0.61 ± 0.22 ml/100 g ($p = 0.009$) [36]。该研究证实, 高压氧可通过增加心肌微循环灌注, 提升心肌供氧能力, 这对 CS 后导致的心肌缺血具有缓解作用。

4.1.4. 抑制炎症与氧化应激

CS 后全身炎症反应及氧化应激可加重心肌损伤。高压氧可通过抑制促炎因子(如 COX-2)的活性, 减轻心肌缺血后的炎症反应。动物实验显示, HBO-PC 能显著降低 COX-2 的表达, 从而减少前列腺素 E_2 等炎症介质的释放, 保护心肌免受缺血再灌注损伤[37][38]。抑制 NF- κ B 等促炎因子释放, 降低 TNF- α 和 IL-6 水平, 减轻全身炎症对心脏的继发性损伤[32]。研究表明, 反复的高压氧预适应(HBO-PC)能上调超氧化物歧化酶(SOD)等抗氧化酶的表达, 减少自由基对心肌细胞的损伤[37]。Batinac 等通过体外实验发现, 高压氧(2 ATA, 90 min)可显著降低内皮细胞中 IL-6、TNF- α 的释放, 同时上调超氧化物歧化酶(SOD)活性, 提示其可能通过抑制炎症因子及增强抗氧化能力保护心肌[39]。这一机制与 CS 后“炎症风暴”导

致的心肌细胞凋亡密切相关, 为高压氧的心脏保护作用提供了新解释。

4.2. 高压氧对心功能影响的临床证据

4.2.1. 对左心室收缩功能的改善作用

Leitman 等采用前瞻性单盲试验, 纳入 31 例接受 60 次 HBOT (2 ATA, 90 min/次) 的患者(其中 39% 有冠心病史, 94% 有高血压), 通过常规及斑点追踪超声心动图评估发现, 左心室射血分数(LVEF)从 $60.71\% \pm 6.02\%$ 升至 $62.29\% \pm 5.19\%$ ($p = 0.02$), 左心室收缩末期容积(LVESV)从 38.08 ± 13.30 ml 降至 35.39 ± 13.32 ml ($p = 0.01$), 由于尖段和前间隔段的区域应变改善, 左心室[LV]总体纵向应变从 $-19.31 \pm 3.17\%$ 增加到 $-20.16 \pm 3.34\%$, $p = 0.036$ 。由于尖顶旋转改善, 扭转从 $11.76^\circ \pm 4.40^\circ$ 增加到 $16.10^\circ \pm 5.56^\circ$, $p = 0.004$, 扭转从 $18.32^\circ \pm 6.61^\circ$ 增加到 $23.12^\circ \pm 6.35^\circ$, $p = 0.004$ [30]。该研究表明, 高压氧可通过改善心尖及室间隔区域的心肌收缩协调性, 增强左心室整体功能, 这对 CS 后左心室功能障碍患者具有重要意义。

Vincent 等回顾性分析 23 例左心室射血分数(LVEF) $\leq 40\%$ 的患者(接受 1~60 次 HBOT, 2.0~2.4 ATA), 发现尽管 2 例出现急性心衰症状(与未规律使用利尿剂相关), 但其余患者 LVEF 无显著下降, 且左心室舒张末期容积(LVEDV)保持稳定[40]。这一结果提示, 在优化基础治疗(如利尿剂使用)的前提下, 高压氧对心功能不全患者具有一定安全性, 可用于 CS 合并心衰患者的辅助治疗。研究表明, HBOT 能减少梗死体积, 增强左心室射血分数(LVEF), 尤其在急性缺血性事件后联合再灌注策略时效果更显著[32]。

4.2.2. 对心肌代谢及运动耐力的提升

Hadanny 等在 63 例老年受试者的随机对照试验中, 通过心肺运动试验发现, 高压氧组最大摄氧量(VO_{2max})从 1437.53 ± 547.57 ml/min 增至 1548.93 ± 538.62 ml/min ($p = 0.005$), VO_{2max}/kg 从 18.72 ± 6.05 ml/kg/min 增至 20.63 ± 6.08 ml/kg/min ($p = 0.003$), 且第一通气阈值(VO_{2VT1})从 767.53 ± 217.71 ml/min 显著升至 927.57 ± 308.28 ml/min ($p = 0.001$) [36]。该研究提示, 高压氧可通过改善心肌代谢效率, 提升机体运动耐力, 这对 CS 恢复期患者的功能康复具有重要意义——CS 后长期卧床常导致心肌废用性萎缩, 而高压氧可能通过增强心肌有氧代谢能力, 缓解这一过程。

一项研究发现, HBOT 可降低血清儿茶酚胺水平, 减少应激性心肌病的风险[41]。一项针对缺血性 CS 的 Meta 分析(2024 年)指出, 早期 HBOT 干预可降低 1 年内心血管事件复发率, 可能与改善内皮功能有关[42]。

4.2.3. 对脑功能改善间接影响心功能

一项 2025 年的研究显示, HBOT 联合丹红注射液可显著提升 CS 患者的左室射血分数(LVEF), 并降低 BNP 水平, 提示心功能储备增强[43]。黄等的研究则显示微压氧联合药物可降低心力衰竭患者的 NT-proBNP 水平, 改善左心室射血分数[44]。CS 后心功能异常与脑-心轴调控失衡密切相关, 而高压氧对脑功能的改善可能间接稳定心功能。Hadanny 等选取 11 例心脏骤停后慢性认知障碍患者, 给予 60 次 HBOT (1.5 ATA, 60 min/次), 通过 NeuroTrax 认知测试发现, 患者记忆、注意力和执行功能分别改善 12%、20% 和 24%, 且 SPECT 显示脑灌注在扣带回、前额叶等区域显著增加[45]。脑功能改善可降低交感神经过度激活, 减少心肌耗氧, 从而减轻心功能负担, 这一机制为高压氧在 CS 患者中的应用提供了双重依据。

4.2.4. 对不同心功能状态患者的安全性

Schiavo 等回顾性分析 23 例心力衰竭患者(其中 13 例为射血分数保留的心衰(HFpEF), 7 例为射血分数降低的心衰(HFrEF))接受 HBOT (2.0~2.4 ATA)的安全性, 发现仅 2 例出现心衰症状加重(1 例 HFrEF 因停用利尿剂, 1 例 HFpEF 因血压控制不佳), 其余患者完成治疗且无严重不良反应[46]。这一结果表明, 只要优化基础治疗(如利尿剂使用、血压控制), 高压氧对心衰患者具有一定安全性, 可用于 CS 合并心衰

患者的辅助治疗。研究发现, 早期 HBOT 可降低继发性心脏并发症风险, 如心律失常和心力衰竭[47]。

5. 结论与展望

CS 后心功能不全是影响患者康复质量与远期预后的关键因素之一, 其发生与“脑-心轴”介导的自主神经紊乱、心肌代谢障碍及系统性炎症反应密切相关。HBOT 作为一种具有多机制潜力的辅助康复手段, 通过提高氧输送效率、改善心肌代谢、调节自主神经平衡以及抑制氧化应激与炎症反应, 在理论上对 CS 恢复期患者的心功能具有保护与改善作用。然而, 目前该领域的临床研究仍存在明显局限性: 样本量偏小、缺乏高质量多中心随机对照试验, 心功能评估标准不一, 治疗时机与方案尚未统一, 长期随访数据匮乏, 这些因素共同限制了 HBOT 在心脏康复中应用的证据强度与推广价值。

未来研究应致力于构建更严谨的临床实验设计, 推动大样本随机对照试验的开展, 明确 HBOT 在 CS 恢复期心功能康复中的有效性与安全性; 确立心功能多模态评估体系, 结合影像学、生物标志物与功能测评指标, 全面客观评价治疗效果; 深入探索 HBOT 对“脑-心轴”调控机制及分子通路的影响; 制定个体化、标准化的治疗规程, 并加强远期随访, 评估其对心脑血管事件的二级预防效果。唯有如此, HBOT 才有可能成为 CS 综合康复策略中具有循证支持的重要一环, 为改善患者心功能与整体预后提供新途径。

参考文献

- [1] Feigin, V.L., Abate, M.D., Abate, Y.H., *et al.* (2024) Global, Regional, and National Burden of Stroke and Its Risk Factors, 1990-2021: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *Lancet Neurology*, **23**, 973-1003. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(24\)00369-7](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(24)00369-7)
- [2] 《中国脑卒中防治报告 2021》概要[J]. 中国脑血管病杂志, 2023, 20(11): 783-793.
- [3] 中华医学会神经病学分会, 中华医学会神经病学分会神经康复学组, 中华医学会神经病学分会脑血管病学组. 中国脑卒中早期康复治疗指南[J]. 中华神经科杂志, 2017, 50(6): 405-412.
- [4] Wang, L., Ma, L., Ren, C., *et al.* (2024) Stroke-Heart Syndrome: Current Progress and Future Outlook. *Journal of Neurology*, **271**, 4813-4825. <https://doi.org/10.1007/s00415-024-12480-4>
- [5] Scheitz, J.F., Sposato, L.A., Schulz-Menger, J., *et al.* (2022) Stroke-Heart Syndrome: Recent Advances and Challenges. *Journal of the American Heart Association*, **11**, E026528. <https://doi.org/10.1161/JAHA.122.026528>
- [6] Sposato, L.A., Hilz, M.J., Aspberg, S., *et al.* (2020) Post-Stroke Cardiovascular Complications and Neurogenic Cardiac Injury. *Journal of the American College of Cardiology*, **76**, 2768-2785. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2020.10.009>
- [7] Mitrică, M., Lorusso, L., Badea, A.A., *et al.* (2024) The Hidden Heart: Exploring Cardiac Damage Post-Stroke: A Narrative Review. *Medicina*, **60**, Article 1699. <https://doi.org/10.3390/medicina60101699>
- [8] Chen, Z., Venkat, P., Seyfried, D., *et al.* (2017) Brain-Heart Interaction: Cardiac Complications After Stroke. *Circulation Research*, **121**, 451-468. <https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.117.311170>
- [9] Doehner, W., Böhm, M., Boriani, G., *et al.* (2023) Interaction of Heart Failure and Stroke: A Clinical Consensus Statement of the ESC Council on Stroke, the Heart Failure Association (HFA) and the ESC Working Group on Thrombosis. *European Journal of Heart Failure*, **25**, 2107-2129. <https://doi.org/10.1002/ehf.3071>
- [10] Kim, W. and Kim, E.J. (2018) Heart Failure as A Risk Factor for Stroke. *Journal of Stroke*, **20**, 33-45. <https://doi.org/10.5853/jos.2017.02810>
- [11] Ghanekar, S., Corey, S., Lippert, T., *et al.* (2016) Pathological Links between Stroke and Cardiac Arrest. *Chinese Neurosurgical Journal*, **2**, Article No. 40. <https://doi.org/10.1186/s41016-016-0056-1>
- [12] Rosario, E.R., Kaplan, S.E., Khonsari, S., *et al.* (2018) The Effect of Hyperbaric Oxygen Therapy on Functional Impairments Caused by Ischemic Stroke. *Neurology Research International*, **2018**, Article ID: 3172679. <https://doi.org/10.1155/2018/3172679>
- [13] Helms, A.K., Whelan, H.T. and Torbey, M.T. (2007) Hyperbaric Oxygen Therapy of Acute Ischemic Stroke. *Stroke*, **38**, 1137-1137. <https://doi.org/10.1161/01.STR.0000259832.57823.83>
- [14] Cozene, B., Sadanandan, N., Gonzales-Portillo, B., *et al.* (2020) An Extra Breath of Fresh Air: Hyperbaric Oxygenation as a Stroke Therapeutic. *Biomolecules*, **10**, Article 1279. <https://doi.org/10.3390/biom10091279>
- [15] 中国人民解放军总医院第六医学中心. 中华医学会高压氧分会关于“高压氧治疗适应证与禁忌证”的共识(2018)

- 版) [J]. 中华航海医学与高气压医学杂志, 2019, 26(1): 1-5.
- [16] Heyboer, M., Sharma, D., Santiago, W., *et al.* (2017) Hyperbaric Oxygen Therapy: Side Effects Defined and Quantified. *Advances in Wound Care*, **6**, 210-224. <https://doi.org/10.1089/wound.2016.0718>
 - [17] Hampson, N. and Atik, D. (2003) Central Nervous System Oxygen Toxicity During Routine Hyperbaric Oxygen Therapy. *Undersea & Hyperbaric Medical Society*, **30**, 147-53.
 - [18] Boussi-Gross, R., Golan, H., Fishlev, G., *et al.* (2013) Hyperbaric Oxygen Therapy Can Improve Post Concussion Syndrome Years after Mild Traumatic Brain Injury-Randomized Prospective Trial. *PLOS ONE*, **8**, E79995. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0079995>
 - [19] Hadanny, A., Abbott, S., Suzin, G., *et al.* (2018) Effect of Hyperbaric Oxygen Therapy on Chronic Neurocognitive Deficits of Post-Traumatic Brain Injury Patients: Retrospective Analysis. *BMJ Open*, **8**, E023387. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2018-023387>
 - [20] 陈敏瑶, 朱菊清, 黄锦兴, 等. 高压氧舱内面罩吸氧协同 Bobath 神经促通技术对改善缺血性脑卒中患者本体感觉的疗效观察[J]. 中国医药科学, 2025, 15(2): 88-91.
 - [21] 沈心怡, 张亚洁, 王玥. 高压氧联合滚筒作业训练在脑卒中偏瘫患者中的应用效果[J]. 广西医学, 2025, 47(7): 991-995.
 - [22] 黎飞, 刘佩军, 詹燕, 等. 高压氧联合肌电生物反馈对急性脑梗死的影响[J]. 神经损伤与功能重建, 2025, 20(9): 552-554.
 - [23] 刘伟. 高压氧联合脑电仿生电刺激治疗对昏迷患者的疗效分析[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2025.
 - [24] 张丹, 张彦, 苏文冕, 等. 高压氧联合不同频率重复经颅磁刺激在治疗老年缺血性脑卒中后认知功能障碍中的效果[J]. 中华老年多器官疾病杂志, 2025, 24(7): 537-541.
 - [25] 梁丹, 王卫宁, 李策, 等. 高压氧舱内同步脑仿生电刺激对脑卒中相关睡眠障碍的效果[J]. 中国康复理论与实践, 2025, 31(5): 497-504.
 - [26] 孙淑君. 研究高压氧联合丁苯酞治疗大动脉粥样硬化性缺血性脑卒中的临床效果[J]. 系统医学, 2024, 9(22): 112-115.
 - [27] 黄奕郡, 张万平, 周光焰. 依达拉奉右莰醇、阿加曲班辅以高压氧治疗急性脑梗死的临床疗效观察[J]. 新疆医科大学学报, 2025, 48, 767-771.
 - [28] Heidler, J., Cabrera-Orefice, A., Wittig, I., *et al.* (2024) Hyperbaric Oxygen Treatment Reveals Spatiotemporal OXPHOS Plasticity in the Porcine Heart. *PNAS Nexus*, **3**, pgae210. <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgae210>
 - [29] Efrati, S., Fishlev, G., Bechor, Y., *et al.* (2013) Hyperbaric Oxygen Induces Late Neuroplasticity in Post Stroke Patients-Randomized, Prospective Trial. *PLOS ONE*, **8**, E53716. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0053716>
 - [30] Leitman, M., Efrati, S., Fuchs, S., *et al.* (2020) The Effect of Hyperbaric Oxygenation Therapy on Myocardial Function. *International Journal of Cardiovascular Imaging*, **36**, 833-840. <https://doi.org/10.1007/s10554-020-01773-0>
 - [31] Gottfried, I., Schottlender, N. and Ashery, U. (2021) Hyperbaric Oxygen Treatment—From Mechanisms to Cognitive Improvement. *Biomolecules*, **11**, Article 1520. <https://doi.org/10.3390/biom11101520>
 - [32] Tian, M., Du, W., Yang, S., *et al.* (2025) Application and Progress of Hyperbaric Oxygen Therapy in Cardiovascular Diseases. *Medical Gas Research*, **15**, 427-434. <https://doi.org/10.4103/mgr.MEDGASRES-D-24-00107>
 - [33] Catalogna, M., Hadanny, A., Parag, Y., *et al.* (2023) Functional MRI Evaluation of Hyperbaric Oxygen Therapy Effect on Hand Motor Recovery in a Chronic Post-Stroke Patient: A Case Report and Physiological Discussion. *Frontiers in Neurology*, **14**, Article ID: 1233841. <https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1233841>
 - [34] Mihailovic, T., Bouzigon, R., Bouillod, A., *et al.* (2023) Post-Exercise Hyperbaric Oxygenation Improves Recovery for Subsequent Performance. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, **94**, 427-434. <https://doi.org/10.1080/02701367.2021.2002797>
 - [35] Fu, Q., Duan, R., Sun, Y., *et al.* (2022) Hyperbaric Oxygen Therapy for Healthy Aging: From Mechanisms to Therapeutics. *Redox Biology*, **53**, Article 102352. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2022.102352>
 - [36] Hadanny, A., Sasson, E., Copel, L., *et al.* (2024) Physical Enhancement of Older Adults Using Hyperbaric Oxygen: A Randomized Controlled Trial. *BMC Geriatrics*, **24**, Article No. 572. <https://doi.org/10.1186/s12877-024-05146-3>
 - [37] Wu, X., You, J., Chen, X., *et al.* (2023) An Overview of Hyperbaric Oxygen Preconditioning against Ischemic Stroke. *Metabolic Brain Disease*, **38**, 855-872. <https://doi.org/10.1007/s11011-023-01165-y>
 - [38] Zhai, W., Sun, L., Yu, Z., *et al.* (2016) Hyperbaric Oxygen Therapy in Experimental and Clinical Stroke. *Medical Gas Research*, **6**, 111-118. <https://doi.org/10.4103/2045-9912.184721>
 - [39] Batinac, T., Batičić, L., Kršek, A., *et al.* (2024) Endothelial Dysfunction and Cardiovascular Disease: Hyperbaric Oxygen

-
- Therapy as an Emerging Therapeutic Modality? *Journal of Cardiovascular Development and Disease*, **11**, Article 408. <https://doi.org/10.3390/jcdd11120408>
- [40] Canada, D.M., Vincent, J., Canada, S. *et al.* (2021) Effect of Hyperbaric Oxygen Treatment on Patients with Reduced Left Ventricular Ejection Fraction. *Diving and Hyperbaric Medicine Journal*, **51**, 256-263. <https://doi.org/10.28920/dhm51.3.256-263>
 - [41] Liska, G.M., Lippert, T., Russo, E., *et al.* (2018) A Dual Role for Hyperbaric Oxygen in Stroke Neuroprotection: Preconditioning of the Brain and Stem Cells. *Conditioning Medicine*, **1**, 151-166.
 - [42] Li, X., Lu, L., Min, Y., *et al.* (2024) Efficacy and Safety of Hyperbaric Oxygen Therapy in Acute Ischaemic Stroke: A Systematic Review and Meta-Analysis. *BMC Neurology*, **24**, Article No. 55. <https://doi.org/10.1186/s12883-024-03555-w>
 - [43] Zheng, M. and Xu, Y. (2025) Effects of Hyperbaric Oxygen Combined with Danhong Injection on 90-Day Functional Independence and the 1-Year Recurrence Rate in Patients with Ischemic Stroke: A Matched Cohort Study. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, **34**, Article 108339. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2025.108339>
 - [44] 黄洁. 微压氧联合药物治疗对心力衰竭患者血浆内皮素-1、NT-Probnp 及心功能的影响[D]: [硕士学位论文]. 西宁: 青海大学, 2025.
 - [45] Hadanny, A., Golan, H., Fishlev, G., *et al.* (2015) Hyperbaric Oxygen Can Induce Neuroplasticity and Improve Cognitive Functions of Patients Suffering from Anoxic Brain Damage. *Restorative Neurology and Neuroscience*, **33**, 471-486. <https://doi.org/10.3233/RNN-150517>
 - [46] Schiavo, S., Brenna, C.T.A., Albertini, L., *et al.* (2024) Safety of Hyperbaric Oxygen Therapy in Patients with Heart Failure: A Retrospective Cohort Study. *PLOS ONE*, **19**, E0293484. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0293484>
 - [47] Piotr, D., Emilia, M. and Aleksander, G. (2015) Hyperbaric Oxygen Therapy in Post-Stroke Patients. *Journal of Education, Health and Sport*, **5**, 302-306.