

# 不同压力高压氧治疗重型颅脑创伤后昏迷患者的疗效研究

李炎<sup>1,2</sup>, 齐胤良<sup>1</sup>, 许季祥<sup>1</sup>, 周小妹<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>安徽医科大学附属合肥医院(合肥市第二人民医院)高压氧科, 安徽 合肥

<sup>2</sup>安徽医科大学第五临床医学院, 安徽 合肥

收稿日期: 2024年1月23日; 录用日期: 2024年2月16日; 发布日期: 2024年2月26日

## 摘要

目的: 比较0.16 MPa和0.20 MPa两种压力高压氧治疗对重型颅脑创伤后昏迷患者的疗效。方法: 回顾性分析78例接受0.16 MPa高压氧治疗和41例接受0.20 MPa高压氧治疗的重型颅脑创伤后昏迷患者, 比较两组患者治疗前后GCS评分、ADL评分、GOS评分的变化。结果: 两组治疗后评分均有不同程度提高, 0.16 MPa治疗组在GCS评分3~4分的极重型患者疗效优于0.20 MPa组( $P < 0.05$ )。结论: 0.16 MPa高压氧治疗可提高重型颅脑创伤后昏迷患者, 尤其是极重型患者的疗效。

## 关键词

不同压力, 高压氧, 重型颅脑损伤, 昏迷, 疗效

# Effects of Hyperbaric Oxygen at Different Pressures on Coma Patients with Severe Traumatic Brain Injury

Yan Li<sup>1,2</sup>, Yinliang Qi<sup>1</sup>, Jixiang Xu<sup>1</sup>, Xiaomei Zhou<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Hyperbaric Oxygen, Hefei Hospital Affiliated to Anhui Medical University (The Second People's Hospital of Hefei), Hefei Anhui

<sup>2</sup>The Fifth Clinical College of Anhui Medical University, Hefei Anhui

Received: Jan. 23<sup>rd</sup>, 2024; accepted: Feb. 16<sup>th</sup>, 2024; published: Feb. 26<sup>th</sup>, 2024

\*通讯作者。

文章引用: 李炎, 齐胤良, 许季祥, 周小妹. 不同压力高压氧治疗重型颅脑创伤后昏迷患者的疗效研究[J]. 临床医学进展, 2024, 14(2): 3575-3582. DOI: 10.12677/acm.2024.142500

## Abstract

**Objective:** To compare the effects of hyperbaric oxygen (HBO) at 0.16 MPa and 0.20 MPa pressure on coma patients after severe traumatic brain injury. **Methods:** This is a retrospective analysis. A total of 78 coma patients with severe traumatic brain injury were treated with 0.16 MPa hyperbaric oxygen therapy and 41 patients were treated with 0.20 MPa hyperbaric oxygen therapy. We compared the changes in GCS score, ADL score and GOS score before and after treatment between the two groups. **Results:** The GCS scores of the two groups increased to varying degrees after treatment, and the curative effect of the 0.16 MPa treatment group was better than that of the 0.20 MPa treatment group in the very severe patients with GCS scores of 3~4 ( $P < 0.05$ ). **Conclusion:** 0.16 MPa hyperbaric oxygen therapy can improve the efficacy of coma patients after severe traumatic brain injury, especially for very severe patients.

## Keywords

Different Pressure, Hyperbaric Oxygen, Severe Craniocerebral Injury, Coma, Efficacy

Copyright © 2024 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

创伤性脑损伤(Traumatic brain injury, TBI)是一种临床上常见的外科危重症, 它的发病率、致残率及病死率极高, 其不仅存在原发损伤, 还会导致一系列继发性的病理生理变化[1] [2] [3] [4] [5], 其中重型颅脑损伤患者甚至出现长时间的昏迷, 影响预后[6], 但目前仍缺乏有效的治疗方式。高压氧治疗(Hyperbaric oxygen therapy, HBOT)是在超过一个标准大气压下吸入纯氧或高浓度氧以治疗疾病的方法, 能在较短时间内提供充足氧气, 通过改善氧化代谢和线粒体功能, 减少颅内高压, 细胞凋亡, 神经炎症和自由基介导的损伤[7], 促使机体多种生理活动恢复正常, 有助于营养物质吸收, 并减轻昏迷程度[8]。但有研究指出[9], 不同压力下 HBO 治疗颅脑损伤的效果也会有所差异, 目前国内外关于高压氧治疗具体压力的选择尚无统一的标准[10]。因此本研究的目的及意义在于探讨不同压力 HBOT 对 TBI 昏迷患者的治疗差异, 为临床提供依据。

## 2. 资料和方法

### 2.1. 研究对象

本回顾性研究对象来自于 2020 年 1 月~2022 年 12 月在安徽医科大学附属合肥医院的颅脑创伤后接受高压氧治疗的昏迷患者。纳入标准: ① 明确的颅脑创伤史, 既往无器质性脑病病史; ② 发病前无意识障碍; ③ 治疗前 GCS 评分小于或等于 8 分, 且昏迷时间大于 6 小时; ④ 无 HBOT 禁忌患者; ⑤ 18~80 岁患者。排除标准: ① 入院时双侧瞳孔已散大、固定患者; ② 入院时已存在严重心肺功能障碍和(或)肝肾功能衰竭患者; ③ 治疗疗程未达到 28 天的患者。将符合纳入标准重型颅脑创伤后昏迷患者按照接受高压氧治疗的压力分为两组, 0.16 MPa 压力组为在常规治疗方案基础上予以 0.16 MPa 压力下行高压氧治疗的患者, 0.20 MPa 压力组为在常规治疗方案基础上予以 0.20 MPa 压力下行高压氧治疗的患者。本研究方案由参与本研究的医疗机构的伦理委员会审查, 由于本研究的回顾性, 不需要知情同意。

## 2.2. 研究方法

### 2.2.1. 仪器和方法

两组患者入院后均采用常规治疗方案：止血、脱水、降颅压、抗感染、预防应激性溃疡、营养脑细胞等治疗，生命体征基本平稳后进行肢体功能康复训练。高压氧治疗：所有高压氧治疗均在 30 人座三舱七门式 GY3600 大型医用空气加压氧舱内进行，每日治疗 1 次，10 次为一疗程，连续治疗 3 疗程。治疗 1 组：在常规治疗基础上行 0.16 Mpa 压力下高压氧治疗，治疗压力为 0.16 MPa，患者每日治疗一次，加压过程 15 分钟，稳压时间共计 60 分钟，佩戴氧气面罩或者吸氧头罩吸纯氧，中间休息 10 分钟，减压过程亦为 15 分钟，总治疗时长 100 分钟。治疗 2 组：在常规治疗基础上行 0.20 MPa 压力下高压氧治疗，治疗压力为 0.20 MPa，患者每日治疗一次，加压过程 20 分钟，稳压时间共计 60 分钟，佩戴氧气面罩或者吸氧头罩吸纯氧，中间休息 10 分钟，减压过程亦为 20 分钟，总治疗时长 110 分钟。详见图 1。

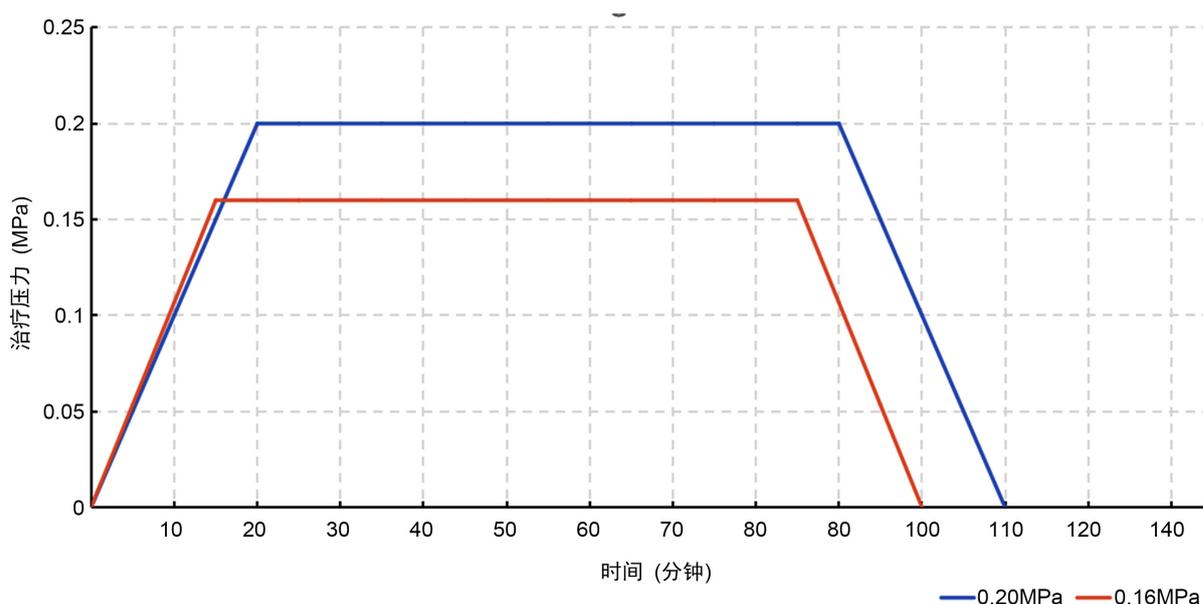


Figure 1. Two different treatment pressure maps of hyperbaric oxygen

图 1. 高压氧两种不同治疗压力图

### 2.2.2. 观察指标

格拉斯哥昏迷分级评分(Glasgow coma scale, GCS): GCS 评分包括睁眼反应评分 1~4 分(自动睁眼 4 分, 呼唤睁眼 3 分, 刺痛睁眼 2 分, 不睁眼 1 分); 语言反应评分 1~5 分(回答正确 5 分, 回答错误 4 分, 只能说话 3 分, 只能发音 2 分, 无语言 1 分); 运动反应评分 1~6 分(吩咐动作 6 分, 刺痛定位 5 分, 刺痛躲避 4 分, 刺痛屈曲 3 分, 刺痛强直 2 分, 无反应 1 分) [11]。评分范围为 0~15 分, 15 分: 意识清楚; 12~14 分: 轻度意识障碍; 9~11 分: 中度意识障碍; 8 分及以下: 昏迷状态[12], 分数越低则意识障碍越重。

日常生活能力量表(Activity of daily living, ADL): 采用 Barthel 指数(Barthel index, BI)评价患者日常生活能力[13], ADL 评分范围为 0~100 分, 评分越高日常生活能力越好。

格拉斯哥昏迷分级评分(Glasgow outcome scale, GOS): 治疗后 28 天进行 GOS 预后评分, 评分标准: 死亡为 2 分; 植物生存为 2 分; 重度病残, 意识清楚但生活不能自理为 3 分; 中度病残, 生活能自理为 4 分; 恢复良好, 正常生活但有轻度神经障碍为 5 分。GOS ≤ 3 分为预后不良, >3 分为预后良好[14]。

### 2.3. 统计方法

统计分析及绘图使用 SPSS (26.0)、Graphpad prism 9 软件进行, 对数据进行预处理及统计分析, 缺失数据采用回归插补法、多重插补法进行处理。连续变量新先进行正态性检验, 符合正态分布的计量资料采用  $\bar{x} \pm s$  表示, 组间比较采用独立样本  $t$  检验, 治疗前后比较运用配对样本  $t$  检验; 非正态分布计量资料以  $M (P_{25}, P_{75})$  表示, 组间比较使用 Mann-Whitey  $U$  检验, 治疗前后比较运用 Wilcoxon 符号秩和检验; 计数资料以频数(率)表示, 组间比较采用  $\chi^2$  检验。  $P < 0.05$  表示差异有统计学意义。

## 3. 结果

### 3.1. 研究对象的一般情况

本研究共纳入 119 例, 男性 81 例, 女性 38 例, 平均年龄 55 岁; 其中车祸伤 81 例(68.1%), 行去骨瓣减压术 70 例(58.8%)。根据治疗方案的不同, 将其分为 2 个治疗组, 治疗前两组患者性别、年龄、受伤原因、手术方式、意识状态及 GCS 评分之间的差异均无统计学意义( $P > 0.05$ ), 具有可比性。详见表 1。

**Table 1.** Comparison of general information between two groups of patients before hyperbaric oxygen therapy under different pressures

**表 1.** 不同压力高压氧治疗前两组患者的一般资料比较

	治疗 1 组(n = 78)	治疗 2 组(n = 41)	t/z/ $\chi^2$	P
性别			1.637	0.201
男	50 (64.1%)	31 (75.6%)		
女	28 (35.9%)	10 (24.4%)		
年龄(岁)	57 (48, 68.25)	56 (47.5, 65)	-0.551	0.582
受伤原因(%)			0.204	0.651
交通事故	52 (66.7%)	29 (70.7%)		
高空坠落	10 (12.8%)	5 (12.2%)		
其他	16 (20.5%)	7 (17.1%)		
手术方式			0.216	0.898
无	20 (25.6%)	12 (29.3%)		
血肿清除术	11 (14.1%)	6 (14.6%)		
血肿清除术 + 去骨瓣手术	47 (60.3%)	23 (56.1%)		
意识状态			3.405	0.182
浅昏迷	59 (75.6%)	25 (61.0%)		
中昏迷	12 (15.4%)	12 (29.3%)		
深昏迷	7 (9.0%)	4 (9.7%)		
GCS 评分	7 (6.75, 8)	7 (5.5, 8)	-1.624	0.104

注: GCS 评分: 格拉斯哥昏迷评分法; t: 独立样本  $t$  检验统计值; z: Mann-Whitney 检验统计值;  $\chi^2$ : 卡方检验统计值;  $P < 0.05$  为组间存在差异。

### 3.2. 不同压力高压氧治疗后 GCS、ADL、GOS 评分比较

比较治疗后 2 组间 GCS、ADL 及 GOS 评分均未见显著差异( $P > 0.05$ )。详见表 2。

**Table 2.** Comparison of GCS, ADL, and GOS scores between two groups of patients after treatment  
**表 2.** 两组患者治疗后 GCS、ADL、GOS 评分比较

	治疗 1 组	治疗 2 组	t	P
GCS 评分	9.24 ± 2.48	8.63 ± 2.97	1.189	0.237
ADL 评分	14.42 ± 20.92	10.73 ± 18.96	0.944	0.347
GOS 评分	2.64 ± 0.81	2.51 ± 0.81	0.744	0.485

注：GCS 评分：格拉斯哥昏迷评分法；t：独立/配对样本 t 检验统计值；P < 0.05 为组间存在差异。

对治疗前 GCS 评分进行分组，分为极重型(GCS = 3~4 分)、特重型(GCS = 5~6 分)、重型(GCS = 7~8 分)三组，进行组间分析，比较每组间治疗前后 GCS 评分的变化。如表 3 所示：极重型患者 GCS 评分在 0.16 MPa HBOT 后显著升高(P < 0.05)，而在 0.20 MPa HBOT 后无明显变化(P > 0.05)，余特重型及重型患者在两组治疗前后 GCS 评分均显著升高(P < 0.05)。详见表 3。

**Table 3.** Comparison of GCS scores before and after treatment between two groups of patients after grouping  
**表 3.** 两组患者治疗前后 GCS 评分分组后的比较

分组		治疗 1 组	治疗 2 组
极重型	治疗前	4 (3, 4)	4 (4, 4)
	治疗后	8 (5, 10)	4 (4, 4.5)
	z	-2.207	-1.000
	P	0.027	0.317
特重型	治疗前	5.5 (5, 7.5)	6 (5, 6)
	治疗后	7.5 (5.5, 9)	8 (7, 9)
	z	-2.687	-2.714
	P	0.007	0.007
重型	治疗前	8 (7, 8)	7 (7, 8)
	治疗后	9 (8, 10)	9 (8, 13)
	z	-6.079	-3.755
	P	<0.001	<0.001

注：GCS 评分：格拉斯哥昏迷评分法；z：Wilcoxon 符号秩和检验统计值；P < 0.05 为组间存在差异。

### 3.3. 不同压力高压氧治疗后两组患者有效率的比较

根据其意识障碍较治疗前好转的程度分为：显效(意识障碍程度较前减轻 2 个及以上等级)、有效(意识障碍程度较前减轻 1 个等级)及无效(意识障碍程度较前无变化)。两组患者总治疗有效率分别为 84.6%、70.7%；0.16 MPa HBOT 组显效的患者较 0.20 MPa HBOT 组多 19.6%，差异具有统计学意义(P < 0.05)，两组间治疗有效和无效的比例无明显差异(P > 0.05)。详见表 4。

**Table 4.** Comparison of treatment effectiveness between two groups of patients  
**表 4.** 两组患者治疗有效率对比

组别	n	意识障碍程度			总有效率
		显效	有效	无效	
治疗 1 组	78	40 (51.3%)	26 (33.3%)	12 (15.4%)	66 (84.60%)
治疗 2 组	41	13 (31.7%)	16 (39.0%)	12 (29.3%)	29 (70.70%)

续表

$\chi^2$	4.169	0.381	3.217	0.164
P	0.041	0.537	0.073	0.073

注： $\chi^2$ ：卡方检验统计值；P < 0.05 为组间存在差异。

#### 4. 讨论

论文本研究通过对 0.16 MPa 和 0.20 MPa 两种治疗压力对重型颅脑损伤昏迷患者的疗效研究，结果发现，虽然两个治疗组经不同压力高压氧治疗后在 GCS 评分、ADL 评分及 GOS 评分上差异无统计学意义(P > 0.05) (见表 2)，但是两组患者总治疗有效率分别为 84.6%、70.7% (见表 4)，说明高压氧用于治疗重型颅脑创伤昏迷患者有确切疗效。对于两个治疗组在 GCS 评分上无显著差异，可能与重型颅脑创伤昏迷患者大多数都进行气管切开术，会影响 GCS 评分中的语言反应评分的整体分值，从而使整体患者的 GCS 评分分值偏低。而 ADL 评分及 GOS 评分细则内容过于简单，缺乏客观指标，从而对整体评分数值造成影响，是的两个治疗组在 ADL 评分及 GOS 评分上差异无统计学意义(P > 0.05)。

依据 GCS 评分对重型颅脑创伤患者分成分为极重型(GCS = 3~4)、特重型(GCS = 5~6)、重型(GCS = 7~8)三组，进行组间分析，我们还发现 0.16 MPa HBO 治疗重型颅脑创伤后昏迷患者，尤其是对识障碍程度较重(GCS 评分 3~4 分)的患者可以疗效显著(P < 0.05)，此外 0.16 MPa HBO 治疗的显效率明显高于 0.20 MPa HBO (P < 0.05)，进而提示 0.16 MPa 治疗压力可能对重症患者在促进患者苏醒与神经功能恢复方面疗效更好，明显提高患者的治愈显效率。这与梁芳等人[15]证明了在 0.16 MPa HBO 干预对 TBI 后神经功能损伤恢复的作用优于 0.22 MPa HBO 干预的研究结果一致，该研究结合动物试验表明，HBO 干预可下调 TBI 诱导的组蛋白 H1、H2A、H4 的表达，0.16 MPa 组较 0.22 MPa 组下降明显，尤其是在 6 h 内，而且改良神经功能缺损评分显著升高。初步证实 0.16 MPa HBO 可能比 0.22 MPa HBO 更有效地抑制组蛋白释放，从而减轻 TBI 继发性损伤。这可能是由于相对较低的压力 HBO 更有效地减少了活性氧(Reactive oxygen species, ROS)的产生，抑制了组蛋白修饰和广泛的染色质去浓缩，最终抑制了组蛋白释放到细胞外空间，阻断了组蛋白与 TLR4 的相互作用，抑制 MyD88 信号转导通路，从而降低 NF- $\kappa$ B p65 的表达水平，从而下调继发性脑损伤过程中促炎细胞因子转录和神经细胞凋亡[16]。

目前美国及欧洲临床研究文献中涉及的高压氧治疗压力从 0.15~0.25 MPa 均有[17] [18] [19]; 2021 年，中国康复医学康复专业委员会发布了《颅脑创伤高压氧治疗的专家共识》[20]，该共识内对创伤性颅脑损伤患者的高压氧治疗方案推荐为 0.15~0.25 MPa。有动物实验报道[21]，在一定压力范围内随着 HBO 治疗压力的增加，HBO 的治疗作用明显增加，超过 0.20 MPa 的压力则可能带来脑损伤；常规 HBO 的治疗压力较高，治疗时间较长，治疗过程中有可能使患者出现不耐受，产生耳鸣、氧化损伤、氧中毒、气压伤和白内障等不良反应[22] [23] [24] [25]。早在 1977 年，Holbach 等人[26]对创伤性颅脑损伤患者采用不同压力(0.15/0.20 MPa)高压氧干预，结果发现颅脑损伤患者对 0.20 MPa 高压氧治疗不能耐受并且 10~15 分钟可能会出现氧中毒，而 0.15 MPa 的高压氧治疗不仅可以使患者耐受 30~40 分钟，还能促进脑葡萄糖代谢和能量代谢。Harch 等人[27]回顾了 11 项不同压力和疗程的高压氧治疗轻度创伤性脑损伤患者的临床研究并对其进行了分析，结果发现在多项随机对照研究中，对轻度创伤性脑损伤后持续性脑震荡综合征患者进行 40 次 0.15 MPa 高压氧治疗表现出了具有统计学意义的认知或症状和认知的改善，在一项 0.24 MPa 高压氧治疗中却获得了阴性结果，结果说明较低压力的高压氧治疗可能比高压力的治疗更能改善创伤性脑损伤患者的预后。李琴[28]探讨了颅脑损伤后失语症患者给予不同压力(0.175 MPa 和 0.20 MPa)高压氧治疗的临床疗效及治疗依从性，结果发现高压氧治疗组相较于对照组可以明显提高患者的西

方失语症成套测验(Western aphasia battery, WAB)和失语商(AQ 评分)、疗效、失语平均恢复时间的,但不同压力治疗组之间进行差异比较却发现无统计学意义,此外患者对 0.175 MPa 治疗压力情况下的临床治疗依从性要优于 0.20 MPa。这与较低的治疗压力(小于 0.20 MPa),可以减轻患者在减压过程中 舱内压力反跳,进一步降低患者在治疗过程中的风险,提高患者的治疗依从性,这也与临床诊疗实际情况相符合。而另外从消耗医疗资源层面看,0.16 MPa 治疗压力较 0.20 MPa 治疗压力,在升压和减压过程中消耗时间更短,消耗的医疗资源更少(见图 1)。

综上所述,高压氧可以用于重型颅脑创伤昏迷患者的昏迷促醒治疗,均能提升昏迷患者的 GCS 评分、ADL 评分及 GOS 评分,尤其是对于特重型以上颅脑创伤昏迷患者,选择 0.16 MPa 压力下 HBO 治疗疗效可能更优( $P < 0.05$ ) (见表 3 及表 4),安全性更高,可以为后期临床治疗压力选择提供参考。

本研究局限性: 1) 本研究属于单中心研究,仅限于就诊安徽医科大学附属合肥医院的患者,在后续的研究中,应扩大研究范围,采用多中心研究。2) 本研究纳入样本量较小且为回顾性研究,可能会对本研究结果的真实性产生一定的偏差,需要在今后进行大型随机对照研究。

## 5. 结论

本研究明确了在 0.16 MPa 压力下 HBO 治疗重型颅脑创伤后昏迷患者,尤其是识障碍程度较重(GCS 评分 3~4 分)的患者,昏迷促醒疗效可能更优,为今后临床 HBO 治疗压力选择提供参考。

## 基金项目

安徽医科大学自然科学重点项目(KJ2020A0216)。

## 参考文献

- [1] 李耀科. 高压氧对重度颅脑损伤患者促醒情况的影响探究[J]. 中国医学创新, 2016, 13(12): 115-117.
- [2] 杨柏林, 王欢, 彭渝, 等. 超早期高压氧治疗重型颅脑损伤昏迷患者的疗效观察[C]//中国中药杂志 2015 专集: 基层医疗机构从业人员科技论文写作培训会议论文集, 2016: 1.
- [3] 刘清珍. 高压氧治疗重型颅脑损伤的疗效观察与护理[J]. 中外女性健康研究, 2019(14): 140, 149.
- [4] 王珊珊, 贺琳晰. 头部亚低温联合高压氧对重型颅脑损伤患儿快速康复的效果观察[J]. 中国儿童保健杂志, 2019, 27(12): 1381-1383.
- [5] 苏龙, 王晓明, 林涛, 等. 醒脑静注射液联合高压氧治疗重度颅脑损伤效果观察[J]. 现代中西医结合杂志, 2019, 28(16): 1791-1794.
- [6] Algattas, H. and Huang, J. (2013) Traumatic Brain Injury Pathophysiology and Treatments: Early, Intermediate, and Late Phases Post-Injury. *International Journal of Molecular Sciences*, **15**, 309-341. <https://doi.org/10.3390/ijms15010309>
- [7] 张奕. 创伤性颅脑损伤的高压氧治疗[J]. 中华医学信息导报, 2021, 36(16): 10.
- [8] Daly, S., Thorpe, M., Rockswold, S.B., et al. (2017) Hyperbaric Oxygen Therapy in the Treatment of Acute Severe Traumatic Brain Injury: A Systematic Review. *Journal of Neurotrauma*, **35**, 623-629. <https://doi.org/10.1089/neu.2017.5225>
- [9] 潘强, 朱琳, 高勇, 等. 高压氧联合水通道蛋白-4 基因沉默对脑外伤大鼠认知障碍改善作用及其机制[J]. 中华行为医学与脑科学杂志, 2021, 30(8): 686-693.
- [10] 秦晓洪, 吴薇, 陈胡萍, 等. 不同时机高压氧介入治疗重型颅脑外伤的疗效分析[J]. 实用医院临床杂志, 2019, 16(3): 183-185.
- [11] 高礼福, 张霖, 陶晓根. 昏迷评分量表的临床应用进展[J]. 安徽医学, 2016, 37(11): 139-142.
- [12] 高志强, 高继荣, 徐梦奇, 等. 昏迷和其他意识障碍评估量表研究的历史与进展[J]. 中华航海医学与高气压医学杂志, 2022, 29(4): 453-457.
- [13] Wang, G., Liu, W., Li, C., et al. (2021) Effect of Minimally Invasive Surgery Combined with Intracranial Pressure

- Monitoring on Neurological Function Recovery and Quality of Life in Patients with Hypertensive Cerebral Hemorrhage. *American Journal of Translational Research*, **13**, 8076-8084.
- [14] 王小刚, 高丁, 李涛, 等. 院前应用格拉斯哥昏迷分级评分评估颅脑损伤患者与预后的相关性分析[J]. 中国临床医生杂志, 2015, 43(8): 36-39.
- [15] Liang, F., Sun, L., Yang, J., *et al.* (2020) The Effect of Different Atmosphere Absolute Hyperbaric Oxygen on the Expression of Extracellular Histones after Traumatic Brain Injury in Rats. *Cell Stress and Chaperones*, **25**, 1013-1024. <https://doi.org/10.1007/s12192-020-01137-6>
- [16] Buchanan, M.M., Hutchinson, M., Watkins, L.R., *et al.* (2010) Toll-Like Receptor 4 in CNS Pathologies. *Journal of Neurochemistry*, **114**, 13-27. <https://doi.org/10.1111/j.1471-4159.2010.06736.x>
- [17] Eve, D.J., Steele, M.R., Sanberg, P.R., *et al.* (2016) Hyperbaric Oxygen Therapy as a Potential Treatment for Post-Traumatic Stress Disorder Associated with Traumatic Brain Injury. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, **12**, 2689-2705. <https://doi.org/10.2147/NDT.S110126>
- [18] Miller, R.S., Weaver, L.K., Bahraini, N., *et al.* (2015) Effects of Hyperbaric Oxygen on Symptoms and Quality of Life among Service Members with Persistent Postconcussion Symptoms: A Randomized Clinical Trial. *JAMA Internal Medicine*, **175**, 43-52. <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2014.5479>
- [19] Cifu, D.X., Walker, W.C., West, S.L., *et al.* (2014) Hyperbaric Oxygen for Blast-Related Postconcussion Syndrome: Three-Month Outcomes. *Annals of Neurology*, **75**, 277-286. <https://doi.org/10.1002/ana.24067>
- [20] 潘树义, 李航. 颅脑创伤高压氧治疗的专家共识[J]. 中华航海医学与高气压医学杂志, 2021, 28(3): 271-275.
- [21] 刘丽旭, 杨于嘉. 高压氧治疗新生大鼠缺氧缺血性脑损伤量效及时效关系[J]. 中国当代儿科杂志, 2001, 3(4): 355-358.
- [22] McMonnies, C.W. (2015) Hyperbaric Oxygen Therapy and the Possibility of Ocular Complications or Contraindications. *Clinical & Experimental Optometry*, **98**, 122-125. <https://doi.org/10.1111/cxo.12203>
- [23] 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>
- [24] Benedetti, S., Lamorgese, A., Piersantelli, M., *et al.* (2004) Oxidative Stress and Antioxidant Status in Patients Undergoing Prolonged Exposure to Hyperbaric Oxygen. *Clinical Biochemistry*, **37**, 312-317. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiochem.2003.12.001>
- [25] Sadri, R.A. and Cooper, J.S. (2022) *Hyperbaric Complications*. StatPearls Publishing, Treasure Island, 9.
- [26] Holbach, K.H. and Wassmann, A.C. (1977) Cerebral Energy Metabolism in Patients with Brain Lesions at Normo- and Hyperbaric Oxygen Pressures. *Journal of Neurology*, **217**, 17-30. <https://doi.org/10.1007/BF00316313>
- [27] Harch, P. (2022) Systematic Review and Dosage Analysis: Hyperbaric Oxygen Therapy Efficacy in Mild Traumatic Brain Injury Persistent Postconcussion Syndrome. *Frontiers in Neurology*, **13**, Article ID: 815056. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.815056>
- [28] 李琴. 不同压力高压氧治疗颅脑损伤后失语症的疗效及依从性[J]. 南方医科大学学报, 2015, 35(8): 1206-1210.