

DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20230409

• 海军卫生保健 •

40 m 高压空气暴露对潜水员肱动脉功能的影响

刘文武¹, 张婷婷¹, 文字坤¹, 俞旭华¹, 徐佳骏¹, 王世锋^{2*}

1. 海军军医大学(第二军医大学)海军特色医学中心潜水与高气压医学研究室, 上海 200433

2. 海军军医大学(第二军医大学)海军特色医学中心研究部, 上海 200433

[摘要] **目的** 探讨 40 m 高压空气暴露对潜水员肱动脉功能的影响。**方法** 选择 5 名潜水员作为受试者。所有受试者均接受最高压力为 40 m 的高压空气暴露, 高气压暴露时间共计 190 min。采用多普勒超声诊断仪检测高气压暴露前后受试者的肱动脉直径、收缩峰值流速 (SPV)、阻力指数 (RI), 计算血流介导的血管舒张 (FMD), 评价高气压暴露对肱动脉功能的影响。**结果** 与高气压暴露前相比, 高气压暴露后肱动脉直径呈下降趋势 ($P>0.05$), RI 和 FMD 稍有升高 ($P>0.05$), 而 SPV 下降 ($P<0.05$)。**结论** 40 m 高压空气暴露可导致肱动脉收缩, 血流阻力增加、流速下降, 但对肱动脉的功能影响较小, FMD 变化不显著。

[关键词] 潜水员; 血流介导的血管舒张; 血管内皮细胞; 肱动脉; 超声检查

[引用本文] 刘文武, 张婷婷, 文字坤, 等. 40 m 高压空气暴露对潜水员肱动脉功能的影响[J]. 海军军医大学学报, 2024, 45(7): 896-899. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20230409.

Effect of 40 m hyperbaric air exposure on brachial artery function of divers

LIU Wenwu¹, ZHANG Tingting¹, WEN Yukun¹, YU Xuhua¹, XU Jiajun¹, WANG Shifeng^{2*}

1. Department of Diving and Hyperbaric Medical Research, Naval Medical Center, Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

2. Department of Research, Naval Medical Center, Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

[Abstract] **Objective** To investigate the effect of 40 m hyperbaric air exposure on brachial artery function of divers. **Methods** Five divers were enrolled and exposed to hyperbaric air with a maximum pressure of 40 m for a total of 190 min. The brachial artery diameter, systolic peak velocity (SPV) and resistance index (RI) were measured by Doppler ultrasonography before and after hyperbaric air exposure, and flow-mediated dilation (FMD) was calculated to evaluate the effect of hyperbaric air exposure on brachial artery function. **Results** Compared with before hyperbaric air exposure, the brachial artery diameter was decreased ($P>0.05$), RI and FMD were increased slightly ($P>0.05$), while SPV was decreased significantly ($P<0.05$) after hyperbaric air exposure. **Conclusion** Exposure to hyperbaric air at 40 m can lead to brachial artery contraction, increase resistance, and decrease flow velocity, but it has a slight impact on the brachial artery function, with no significant change in FMD.

[Key words] diver; flow-mediated dilation; vascular endothelial cells; brachial artery; ultrasonography

[Citation] LIU W, ZHANG T, WEN Y, et al. Effect of 40 m hyperbaric air exposure on brachial artery function of divers[J]. Acad J Naval Med Univ, 2024, 45(7): 896-899. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20230409.

随着潜水高气压暴露时间的延长, 呼吸气体中的惰性气体会逐渐溶解于机体体液内, 作业完成后的减压过程中, 因压力降低导致溶解在体内的惰性气体逸出而产生气泡, 这是导致潜水减压病的直接原因^[1]。气泡产生的量与减压病发生的风险呈正

相关, 虽然随着减压方案的严格实施, 潜水减压病的发生率显著下降, 但是不管采用何种减压方案, 减压后循环内仍会产生一定量的气泡, 造成血管内皮细胞的损伤, 从而影响血管功能^[2]。因此, 评价潜水对血管功能的影响及其变化规律越来越受到潜

[收稿日期] 2023-07-21 [接受日期] 2023-10-10

[基金项目] 上海市市级科技重大项目(2023SHZDZX02-030702)。Supported by Municipal Science and Technology Major Program of Shanghai (2023SHZDZX02-030702).

[作者简介] 刘文武, 博士, 副研究员. E-mail: liuwenwu1980@hotmail.com

*通信作者(Corresponding author). Tel: 021-81883101, E-mail: wangsf23@hotmail.com

水醫學研究者的關注。

血流介導的血管舒張 (flow-mediated dilation, FMD) 是一種內皮依賴性血管功能, 常用於無創評估體內動脈 (主要為肱動脈) 的內皮功能^[3]。本研究以 5 名潛水員為研究对象, 檢測其在 40 m 高壓空氣暴露前後肱動脈直徑、FMD、收縮期峰值流速 (systolic peak velocity, SPV) 和阻力指數 (resistance index, RI) 等, 以評估高壓空氣暴露對肱動脈功能的影響。

1 資料和方法

1.1 研究对象 2023 年 6 月選取 5 名潛水員作為受試者, 均為男性, 年齡為 (24.8±3.1) 歲, 身高為 (180.0±3.5) cm, 體重為 (74.4±7.2) kg, BMI 為 (22.9±1.9) kg/m²。

1.2 高壓暴露方案 所有受試者均於本中心接受高壓暴露。採用空氣加壓至 20 m, 停留 16 min; 升壓至 40 m, 停留 16 min; 減壓至 20 m,

停留 16 min; 減壓至 18 m, 停留 9 min; 隨後每 3 m 一站, 分別停留 11、15、25、30 和 35 min。總計高壓暴露時間為 190 min。

1.3 肱動脈功能檢測 於進艙前後, 採用多普勒超聲診斷儀 (M8 型, 深圳邁瑞生物醫療電子股份有限公司) 對肱動脈功能進行檢測 (圖 1), 主要檢測指標為肱動脈直徑、FMD、SPV 和 RI。受試者取仰臥位, 手臂處於舒適的位置, 將血壓計袖帶放置在肘窩上方, 在肘窩上方檢測基礎水平的肱動脈內徑。然後對袖帶充氣, 壓力超過收縮壓至少 50 mmHg (約 180 mmHg, 1 mmHg=0.133 kPa), 充氣後維持時間約 5 min, 隨後對袖帶放氣。袖帶放氣前 30 s 到放氣後 2 min 連續記錄動脈的縱向圖像, 檢測肱動脈最大直徑。選取直徑最大界面, 檢測同一部位肱動脈直徑 3 次並取平均值, 同時記錄 SPV 和 RI (圖 1)。FMD 的計算公式: $FMD (\%) = (\text{反應性充血後肱動脈直徑} - \text{反應性充血前肱動脈直徑}) / \text{反應性充血前肱動脈直徑} \times 100\%$ 。

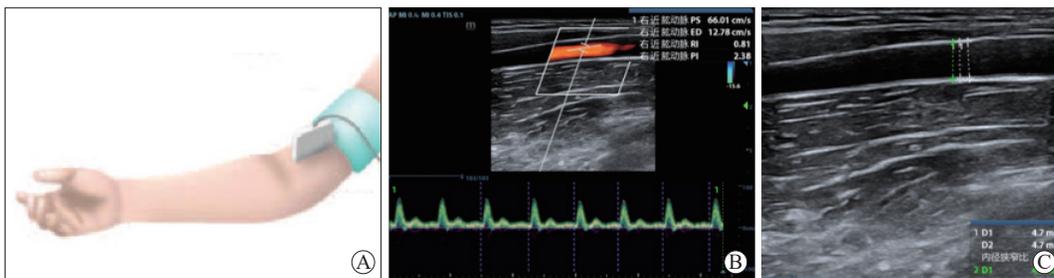


圖 1 多普勒超聲診斷儀檢測肱動脈相關參數

A: 肱動脈功能檢測示意圖; B: 檢測肱動脈收縮期峰值流速 (SPV) 和阻力指數 (RI); C: 檢測肱動脈直徑。

1.4 統計學處理 應用 SPSS 20.0 軟件進行統計學分析。對高壓暴露前後的数据進行正態性檢驗, 数据符合正態分布, 以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 組間比較採用配對 *t* 檢驗。檢驗水準 (α) 為 0.05。

2 結果

2.1 肱動脈 SPV 的變化 高壓暴露前和暴露後, 2 個階段袖帶放氣後的潛水員肱動脈 SPV 與袖帶充氣前相比均呈現下降趨勢, 但差異無統計學意義 (暴露前 $P=0.24$, 暴露後 $P=0.95$)。高壓暴露後潛水員肱動脈 SPV 在袖帶充氣前和放氣後較高壓暴露前均下降, 差異有統計學意義 (充氣前 $P=0.04$, 充氣後 $P=0.03$)。見表 1。

2.2 肱動脈 RI 的變化 高壓暴露前和暴露後, 2 個階段袖帶放氣後的潛水員肱動脈 RI 較袖帶充氣前均有升高趨勢, 但差異無統計學意義 (暴露前

$P=0.74$, 暴露後 $P=0.24$)。高壓暴露後潛水員肱動脈 RI 在袖帶充氣前和放氣後較高壓暴露前均呈升高趨勢, 但差異無統計學意義 (充氣前 $P=0.18$, 充氣後 $P=0.10$)。見表 1。

2.3 肱動脈直徑的變化 高壓暴露前和暴露後, 2 個階段袖帶放氣後的潛水員肱動脈直徑較袖帶充氣前均增加, 差異有統計學意義 (暴露前 $P=0.005$, 暴露後 $P=0.001$)。高壓暴露後潛水員肱動脈直徑在袖帶充氣前和放氣後較高壓暴露前均有下降趨勢, 但差異無統計學意義 (充氣前 $P=0.09$, 充氣後 $P=0.10$)。見表 1。

2.4 肱動脈 FMD 的變化 高壓暴露前和暴露後, 潛水員的 FMD 為 9%~20%。與高壓暴露前相比, 高壓暴露後潛水員肱動脈 FMD 有升高趨勢, 但差異無統計學意義 ($P=0.79$)。見表 1。

表1 高气压暴露前后潜水员肱动脉参数的变化

参数	高气压暴露前		高气压暴露后	
	袖带充气前	袖带放气后	袖带充气前	袖带放气后
SPV/(cm·s ⁻¹)	110.8±26.7	102.3±18.5	80.4±22.0 [△]	80.1±17.1 [△]
RI	0.86±0.06	0.87±0.11	0.94±0.06	0.98±0.03
肱动脉直径/mm	4.28±0.03	4.92±0.08**	3.93±0.36	4.56±0.51**
FMD/%	15±6		16±4	

** $P<0.01$ 与同一时间点袖带充气前比较; [△] $P<0.05$ 与高气压暴露前同一袖带充气状态比较. SPV:收缩期峰值流速; RI:阻力指数; FMD:血流介导的血管舒张.

3 讨论

潜水减压病是限制潜水作业效率的重要因素之一,而潜水减压过程中产生的气泡是导致潜水减压病的直接原因。随着潜水减压方案的不断完善和减压方案在潜水过程中的正确使用及严格执行,潜水减压病的发生率已明显下降^[4]。然而,即使潜水作业后进行正常的减压,体内(主要是静脉系统)仍难以避免气泡的产生^[5]。循环内的气泡与血管内皮细胞直接接触会导致内皮细胞的损伤,从而引起内皮细胞功能异常和血管功能障碍。研究发现,潜水作业后循环内内皮细胞相关的微粒含量显著增加,进一步说明减压对内皮细胞的损伤作用^[6-7]。因此,潜水医学领域越来越多的研究关注潜水后减压对心血管功能的影响。

肱动脉和颈动脉是常用于评价血管功能的部位,而肱动脉检测更加常见。FMD是一种内皮依赖性功能,作为一种无创手段,越来越多的研究将其用于评估潜水减压对血管内皮功能的影响。本研究中潜水员的FMD为9%~20%。研究显示,FMD主要与内皮来源的一氧化氮有关^[8]。内皮剥脱或采用一氧化氮合酶抑制剂可以影响动脉血管的FMD。一些研究通过给予外源性一氧化氮供体(如硝化甘油)确定最大血管舒张反应,评价血管平滑肌功能(内皮非依赖性血管舒张)^[9-10]。

有研究将FMD计算为反应性充血后肱动脉直径与反应性充血前肱动脉直径比值的百分数^[9]。国外一些研究观察了不同潜水方式(包括屏气潜水、自携式潜水和饱和潜水等)对FMD的影响^[2,11-12],但国内尚未有相关报道。有研究显示,潜水或高气压暴露后FMD平均下降4%~5%^[5,13],本研究中潜水员在高气压暴露后FMD稍有升高,原因尚不清楚。本研究显示,高气压暴露后基础状态下的

肱动脉直径较正常值稍有下降,与前期研究^[11]类似。高气压暴露后肱动脉直径的变化是否与暴露压力和时间有关尚不清楚,还有待更多大样本的研究证实。

SPV在脉冲多普勒图形上处于波峰部位,受血流推动力、阻力、管壁弹性、局部口径等因素的影响,推动力越大SPV越高,阻力越大SPV越低;局部口径变小(如狭窄)则局部SPV增高,而其他部位SPV相对较低。RI是反映血管阻力的参数,其数值越大代表阻力越大,这一参数反映阻力的大小比SPV更为灵敏^[14]。本研究显示,不管是基线值还是高气压暴露后,袖带放气之后SPV稍有下降,而RI稍有升高。与高气压暴露前相比,高气压暴露后,袖带充气前和放气后的潜水员肱动脉SPV均下降($P<0.05$),而RI呈升高趋势,这可能与肱动脉血管直径减小有关。这也从另一方面证实高气压暴露对血管功能具有一定的影响。

本研究显示,40 m高压空气暴露较短时间可导致肱动脉收缩,引起血流阻力增加、流速下降,但对肱动脉的功能影响较小,这可能与所采用的方案较为保守、减压时间较长有关。本研究中,潜水员在水下20 m停留16 min,最高压力下(40 m)停留16 min,随后的减压总时间为141 min(不包括各站间的移行时间)。按照我国空气潜水减压表的要求,减压总时间38 min;按照美国海军潜水手册空气潜水减压表要求,减压总时间为53 min 20 s。本研究的减压时间远远长于规定的安全减压时间。

本研究样本量较小,还需更多的研究证实本研究结果。近年来,越来越多的潜水作业采用水面吸氧减压方案,这不仅能缩短减压时间,同时也提高了减压的安全性,因此吸氧减压对血管功能的影响也有待进一步明确。

[参考文献]

- [1] VANN R D, BUTLER F K, MITCHELL S J, et al. Decompression illness[J]. *Lancet*, 2011, 377(9760): 153-164. DOI: 10.1016/S0140-6736(10)61085-9.
- [2] IMBERT J P, EGI S M, BALESTRA C. Vascular function recovery following saturation diving[J]. *Medicina*, 2022, 58(10): 1476. DOI: 10.3390/medicina58101476.
- [3] THIJSSEN D H J, BRUNO R M, VAN MIL A C C M, et al. Expert consensus and evidence-based recommendations for the assessment of flow-mediated dilation in humans[J]. *Eur Heart J*, 2019, 40(30): 2534-2547. DOI: 10.1093/eurheartj/ehz350.
- [4] TUOMINEN L J, SOKOLOWSKI S, LUNDELL R V, et al. Decompression illness in Finnish technical divers: a follow-up study on incidence and self-treatment[J]. *Diving Hyperb Med*, 2022, 52(2): 78-84. DOI: 10.28920/dhm52.2.74-84.
- [5] LJUBKOVIC M, MARINOVIC J, OBAD A, et al. High incidence of venous and arterial gas emboli at rest after trimix diving without protocol violations[J]. *J Appl Physiol*, 2010, 109(6): 1670-1674. DOI: 10.1152/jappphysiol.01369.2009.
- [6] YU X, XU J, HUANG G, et al. Bubble-induced endothelial microparticles promote endothelial dysfunction[J]. *PLoS One*, 2017, 12(1): e0168881. DOI: 10.1371/journal.pone.0168881.
- [7] VINCE R V, MCNAUGHTON L R, TAYLOR L, et al. Release of VCAM-1 associated endothelial microparticles following simulated SCUBA Dives[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2009, 105(4): 507-513. DOI: 10.1007/s00421-008-0927-z.
- [8] MA T, LIU X, REN Q, et al. Flow-mediated dilation analysis coupled with nitric oxide transport to enhance the assessment of endothelial function[J]. *J Appl Physiol* (1985), 2021, 131(1): 1-14. DOI: 10.1152/jappphysiol.00039.2021.
- [9] CORRETTI M C, ANDERSON T J, BENJAMIN E J, et al. Guidelines for the ultrasound assessment of endothelial-dependent flow-mediated vasodilation of the brachial artery: a report of the International Brachial Artery Reactivity Task Force[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2002, 39(2): 257-265. DOI: 10.1016/s0735-1097(01)01746-6.
- [10] LAMBRECHTS K, PONTIER J M, BALESTRA C, et al. Effect of a single, open-sea, air scuba dive on human micro- and macrovascular function[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2013, 113(10): 2637-2645. DOI: 10.1007/s00421-013-2676-x.
- [11] BARAK O F, JANJIC N, DRVIS I, et al. Vascular dysfunction following breath-hold diving[J]. *Can J Physiol Pharmacol*, 2020, 98(2): 124-130. DOI: 10.1139/cjpp-2019-0341.
- [12] DELEU L, CATHERINE J, POSTELMANS L, et al. Effect of SCUBA diving on ophthalmic parameters[J]. *Medicina (Kaunas)*, 2022, 58(3): 408. DOI: 10.3390/medicina58030408.
- [13] THEUNISSEN S, GUERRERO F, SPONSIELLO N, et al. Nitric oxide-related endothelial changes in breath-hold and scuba divers[J]. *Undersea Hyperb Med*, 2013, 40(2): 135-144.
- [14] BODDI M. Renal ultrasound (and Doppler sonography) in hypertension: an update[J]. *Adv Exp Med Biol*, 2017, 956: 191-208. DOI: 10.1007/5584_2016_170.

[本文编辑] 尹 茶