

模拟氦氮氧三元气 100m 潜水对家兔心电图的影响

肖婵娟 李洋洋 刘洪涛 张延猛 石 路

摘 要 **目的** 研究氦氮氧三元气潜水对心电图和心脏功能的作用。**方法** 8 只家兔在高压动物舱中模拟潜水,逐渐加压至 100m 深度再减压返回海平面过程中,分别在加压前(0m),最大深度 100m,减压过程中的 30、20、10m 和出舱后(0m)测试家兔的心电图。**结果** 各阶段的心率与 0m 加压前的心率相比,均无明显变化。在潜水过程中,有 4 只家兔分别出现过窦性心律不齐,但回到常压后恢复正常。另外,在减压到 20m 和 10m 深度时,PR 间期较潜水前有明显延长,且 20m 时的 R 波波幅和 10m 时的 P 波波幅均减小,但回到常压后各指标均恢复正常。**结论** 在高压动物舱内的氦氮氧三元气潜水对心电图有可逆性影响,但并没有严重影响心脏活动。本研究表明了氦氮氧三元气潜水是相对安全和可行的。

关键词 氦氮氧潜水 心电图 心率

中图分类号 R842

文献标识码 A

DOI 10.11969/j.issn.1673-548X.2015.04.034

Effects of Simulated Trimix Diving on the Electrocardiogram of Rabbits at a Maximal Depth of 100 Meters. Xiao Chanjuan, Li Yangyang, Liu Hongtao, et al. Shanghai Jiaotong University Chinese Underwater Technology Institute, Shanghai 200231, China

Abstract Objective To investigate the effects of trimix diving on the electrocardiogram and cardiac function. **Methods** Simulated trimix diving were performed on eight rabbits in a high - pressure animal cabin with progressive increase and decrease of the diving depth and a maximum depth of 100 meters. Electrocardiogram was measured before diving, during diving at depths of 100, 30, 20 and 10m, and immediately after diving. **Results** No heart rate difference was found among the conditions of before, during and after diving. Four rabbits showed sinus arrhythmia during diving, but these arrhythmias restored to sinus rhythm after diving. The P - R intervals significantly increased at diving depths of 20 and 10m. The R wave amplitudes at depth of 20m and the P wave amplitudes at 10m decreased significantly, but these changes restored to normal after animals returning to an atmospheric pressure. **Conclusion** Trimix diving in high - pressure animal cabin has a reversible influence on the electrocardiogram, but does not serious affect the cardiac activities. The study suggests that trimix diving is relatively safe and feasible.

Key words Trimix diving; Electrocardiogram; Heart rate

氦氮氧潜水是一种用氦气、氮气和氧气的混合气体作为呼吸气体的潜水方式,可以防止空气潜水中可能出现的“氮麻醉”和“氧中毒”现象,同时可以比空气潜水下潜的更深^[1-3]。据报道,在逐渐增大的压力下呼吸空气,仅在水下 30m 时,潜水员心理和生理功能受到的影响已显著出现^[1]。虽然就经济层面来说,氦气价格高昂,且热传导率高,但是加入氦气可以降低氮分压,减少高压下呼吸空气而产生的消极作用^[2,3]。本实验通过测试加减压模拟潜水前后动物的心电图来探讨氦氮氧潜水对心脏功能的影响,从而判断氦氮氧潜水的可行性。

材料与方法

1. 实验动物:健康雄性家兔 8 只,平均体重为 $2.40 \pm 0.25\text{kg}$,购自上海市松江区车墩实验动物良种场。室温饲养,正常喂食,自由饮水。使用标准导联 II,预先在皮下埋藏针状电极。

2. 实验设备:高压动物舱,舱容 0.3m^3 。Biopac 生物信号采集系统(美国)。

3. 实验方案:本方案加压下潜速度为 $10\text{m}/\text{min}$,减压上升速度为 $6\text{m}/\text{min}$,减压表的设计按氮气过饱和安全系数为 1.6 计算,整个加减压方案全过程中的 UPTD 值为 243.53,小于 615,故不致发生肺型氧中毒。使用空气开始加压,加压至 50m 时换吸氦 - 氮 - 氧三元混合气,加压至 100m 时舱内气体为氦(41.8%)氮(43.6%)氧(14.5%)混合气。减压至 45m 时将舱内氦氮氧混合气气体置换为空气,用时 7min;减压至 20m 时将舱内空气置换为富氧(50%氧 - 50%氮)气体,用时 4min;减压至 6m 时将舱内富氧气体置换为纯氧($\geq 95\%$),用时 7min。以上 3 次气体置换时间均未计入减压时间。高压暴露期间持续通风,并于舱底放置钠石灰以吸收家兔呼出的

作者单位:200231 上海交通大学海洋水下工程科学研究院(肖婵娟、李洋洋、刘洪涛、张延猛、石路);上海交通大学 - 日本千叶大学联合研究中心(石路)

通讯作者:石路,副研究员,电子信箱:shilu@sjtu.edu.cn

CO₂,暴露过程中舱内温度保持在 22 ~ 28℃。

4. 数据收集:Biopac 生物信号采集系统设置为 gain:5000, HP:0.05Hz,同步记录家兔Ⅱ导联心电图。

5. 统计学方法:将测试结果导出,通过 Excel 2003 和 SPSS 19.0 软件学进行处理。数据以均数 ± 标准差($\bar{x} \pm s$)表示。潜水各阶段与潜水加压前的测试数据采用配对 *t* 检验,以 *P* < 0.05 为差异有统计学意义。

结 果

1. 心率变化:各潜水阶段的心率较潜水前 0m 无明显变化,差异均无统计学意义(*P* 均 > 0.05),详见表 1 和图 1。图 1 ~ 图 3 中数据均以均数 ± 标准差($\bar{x} \pm s$)表示。

表 1 模拟 100m 氮氮氧潜水不同阶段家兔心率的变化($\bar{x} \pm s, n = 8$)

潜水阶段	心率(次/分)
0m	226.83 ± 31.89
100m	229.91 ± 44.80
30m	226.79 ± 51.23
20m	204.76 ± 67.40
10m	213.74 ± 57.57
0m 出舱	235.39 ± 32.23

2. 心律变化:加压前 8 只家兔均表现正常窦性心律。而加压至 100m 深度时有 1 只家兔出现窦性心

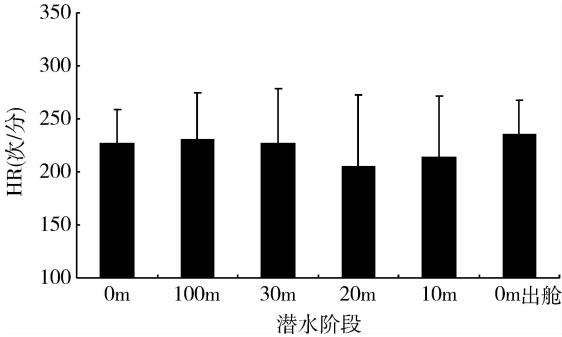


图 1 模拟 100m 氮氮氧潜水不同阶段家兔心率变化(*n* = 8)

律不齐。其后的减压过程中,有 3 只家兔出现窦性心律不齐。减至常压后未再出现心律失常。

3. 心电图各波段间期、波宽与波幅的变化:减压至 20m 和 10m 时,PR 间期较加压前 0m 时明显延长,差异具有统计学意义(*P* < 0.05);减压至 20m 时的 R 波波幅和减压至 10m 时的 P 波波幅较潜水前 0m 明显减小,差异具有统计学意义(*P* < 0.01);其余各指标在不同潜水阶段较潜水前 0m 均无明显变化。其中,第 3 只家兔在 20m 和 10m 时,无有效 PR 间期、QT 间期和 P 波波幅的数据。详见表 2,图 2、图 3。

表 2 模拟 100m 氮氮氧潜水不同阶段家兔心电图间期、波宽和波幅的变化($\bar{x} \pm s, n = 8$)

潜水阶段	PR(ms)	QRS(ms)	QT(ms)	QTc(ms)	P(mV)	R(mV)
0m	43.41 ± 9.37	44.59 ± 17.40	170.53 ± 13.70	330.32 ± 31.61	0.07 ± 0.04	0.24 ± 0.18
100m	50.16 ± 5.26	46.90 ± 14.26	175.88 ± 18.58	331.82 ± 23.18	0.05 ± 0.04	0.19 ± 0.09
30m	49.21 ± 8.96	45.65 ± 13.73	177.48 ± 25.69	337.20 ± 12.42	0.07 ± 0.05	0.15 ± 0.11
20m	50.39 ± 5.02 **	46.55 ± 15.70	174.77 ± 21.02	328.99 ± 22.82	0.06 ± 0.04	0.16 ± 0.14 *
10m	49.86 ± 5.82 **	49.50 ± 13.86	172.74 ± 13.01	341.66 ± 13.91	0.06 ± 0.04 *	0.18 ± 0.16
0m 出舱	47.07 ± 4.69	48.58 ± 14.67	166.34 ± 8.95	326.63 ± 15.09	0.09 ± 0.06	0.34 ± 0.23

与 0m 深度比较, * *P* < 0.01, ** *P* < 0.05

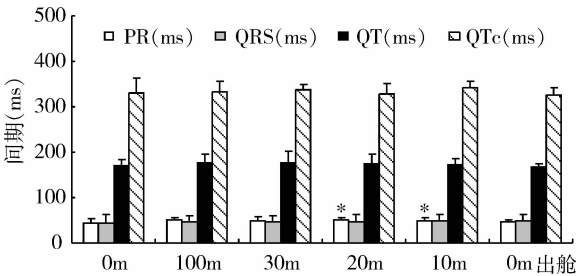


图 2 模拟 100m 氮氮氧潜水不同阶段家兔心电图间期和波宽的变化(*n* = 8)
与 0m 相比, * *P* < 0.01

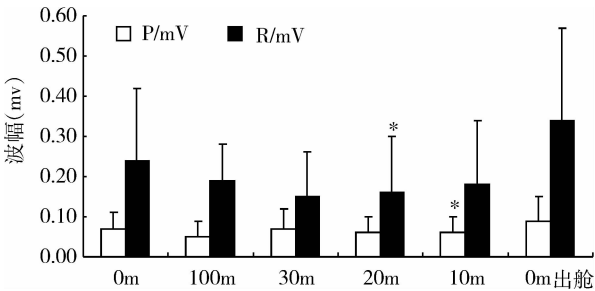


图 3 模拟 100m 氮氮氧潜水不同阶段家兔心电图 P 波波幅和 R 波波幅的变化(*n* = 8)
与 0m 相比, * *P* < 0.05

讨 论

空气潜水的限制性在于空气密度大、易引发氧中

毒、氮麻醉^[4]。由于氧分压过高时,潜水员的中枢神经系统会受到损害。为了避免高压氧引发的癫痫病

症,同时防止高压氮造成的氮麻醉,氮气被加入到潜水气体中。虽然氮气声音失真、导热性强、价格高,但它的低密度可以大大减少潜水中的呼吸费力^[2]。但是,氮氧潜水到达一定深度或加压过快时,可能发生高压神经综合征(high-pressure nervous syndrome, HPNS)的症状如恶心、眩晕、肌阵挛等就开始出现,潜水员脑电波也会发生异常^[1]。研究显示高压氮可以提高神经元稳定性,协调神经元的兴奋与抑制功能,从而防止 HPNS^[5,6]。王恒星等的对猕猴模拟氮氮氧潜水的实验也表明了潜水呼吸气体中加入氮气预防 HPNS 是很必要的。作为潜水气体,氮氮氧三元混合气已被证明可以在超过大深度潜水中安全使用^[1]。

本实验建立的 100m 氮氮氧混合气潜水水下阶段减压表是首次被使用。在整个模拟潜水的过程中,实验对象心电图各参数略有波动,但不明显。实验对象在 0m 出舱时的平均心率与进舱前的平均心率相比,数值略有升高,而差异无统计学意义($P > 0.05$)。

在高压环境下,实验对象一般会出现心率减慢的情况。Lafay 等^[8]认为,心率减慢与呼吸的混合气体的成分以及潜水的深度有关。高丙春等^[9]表示氧气的高分压导致了心动过缓。另外,实际潜水时,潜水者直接接触到水,会产生保护性的潜水反射,使潜水者心率减慢。但在本实验中,实验对象模拟潜水时并不直接接触水,从而不会发生潜水反射使心率减慢。本实验模拟潜水时,当加压至最大深度 100m,实验对象的平均心率却升高了 1.36%,但与加压前相比差异无统计学意义($P > 0.05$),这与龚锦涵等^[10]的实验结果相似。心率升高可能是因为实验对象进入高压环境,产生了一定的应激反应所致。

多项研究结果显示,实验对象在模拟潜水阶段发生窦性心律不齐,但回到常压后未再发现窦性心律失常的情况^[11,12]。有研究认为是潜水时产生的应激反应影响了交感神经系统和植物神经系统的相对平衡,而引起了心律失常^[11]。还有研究表示心律不齐是与心脏的兴奋收缩偶联在高压环境下的改变有关^[13]。

当减压至 20m 和 10m 深度时,实验对象的 PR 间期较潜水前出现显著性延长($P < 0.05$),即窦房结和房室结传导阻滞。这与章恒笃^[14]的发现相似,他认为低氧分压和迷走神经的高兴奋性导致了房室传导阻滞。而潜水过程中,出现 P 波波幅和 R 波波幅

的变化分别表示实验对象的心房和心室功能受到影响。Wokhlu 等^[15]发现右心房的压力升高会触发右心房扩大,从而使心电图中的 P 波波幅增加。20m 深度时,实验对象的 R 波波幅较潜水前显著性减小($P < 0.01$),可能是减压速率过快,从而影响了实验对象的左心射血功能,这种现象也出现在刘长云等^[16]对家兔的研究中。但回到常压下后,并没有再出现异常情况。

国外学者对于氮氮氧潜水的研究颇为深入。Marinovic 等^[17]对实验对象潜水前后的超声心动图对比分析,认为氮氮氧潜水对心血管系统功能产生的影响并不显著。在本实验的潜水过程中,实验对象的心电图曾发生过异常,但回到常压下,基本恢复正常。由此认为,在高压动物舱内的氮氮氧三元气潜水对心电图有可逆性影响,但并没有严重影响心脏活动。本研究表明氮氮氧潜水是相对安全和可行的。

参考文献

- 1 Boussuges A. A rat model to study decompression sickness after a trimix dive[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2007, 102(4): 1301-1302
- 2 Olszanski R, Radziwon P, Siermontowski P, et al. Trimix instead of air, decreases the effect of short-term hyperbaric exposures on platelet and fibrinolysis activation[J]. *Advances in Medical Sciences*, 2010, 55(2): 313-316
- 3 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]. *Journal of Applied Physiology* (1985), 2010, 109(6): 1670-1674
- 4 Shi ZY. Experiment of nitrox saturation diving with trimix excursion[J]. *Applied Human Science*, 1998, 17(6): 249-252
- 5 Kending JJ. Nitrogen narcosis and pressure reversal of anesthetic effects in node of Ranvier[J]. *The American Journal of Physiology*, 1984, 246(1 Pt 1): C91-95
- 6 Kending JJ, Cohen EN. Pressure antagonism to nerve conduction block by anesthetic agents[J]. *Anesthesiology*, 1977, 47(1): 6-10
- 7 王恒星,潘令松,肖卫兵,等. MPa 氮-氮-氧下氮气对猕猴高压神经综合征的防护作用[J]. *海军医学杂志*, 1995, 13(4): 5-9
- 8 Lafay V, Barthelemy P, Comet B, et al. ECG changes during the experimental human dive HYDRA 10 (71 atm/7200 kPa)[J]. *Undersea & Hyperbaric Medicine*, 1995, 22(1): 51-60
- 9 高丙春,龚治平,黄小琴,等. 80m He-O₂-100m 巡回潜水时动态心电图分析[J]. *海军医学杂志*, 1988, 6(4): 4-6
- 10 龚锦涵,卢海,刘广青,等. 350m 模拟氮氧饱和潜水中人体生理功能变化的研究[J]. *中华航海医学杂志*, 1994, 1(1): 4-8
- 11 张振炜,李维诚,唐儒清,等. 海上 120m 氮氧饱和-150m 巡回潜水人体心电图变化[J]. *中华航海医学杂志*, 1999, 6(4): 234

(下转第 151 页)

虽然 MRI 测量所用标准像为二维图像,CT 测量所用标准像为三维图像,但是 VR 图像所选关节间隙最大、关节面相对平行、关节线最长的标准像投影与 MR 图像所选标准像(横轴位上胫腓关节面垂直平分线所在斜矢状位层面)基本一致,所以两种图像的测量结果有可比性。本研究在 MR 图像上测量上胫腓关节面坡度与 CT 重建 VR 图像所测量结果差异无统计学意义,说明以上述 MR 斜矢状位图像为标准像测量上胫腓关节面坡度可行且结果可靠。

因国内研究者曾报道上胫腓关节面与腓骨长轴的夹角($\angle A$)和上胫腓关节面与腓骨长轴与水平线的夹角($\angle B$)呈负相关,且斜矢状位图像上难以确定水平线,所以本研究未测量上胫腓关节面与腓骨长轴与水平线的夹角($\angle B$)^[1,2]。

自 Klose 于 1931 年报道了 1 例外伤性上胫腓关节脱位后,国内外研究者相继开始研究上胫腓关节的解剖结构、生物力学,寻求其与脱位之间的关系^[6]。Ogden 等^[7]和 Veth 等^[6]对上胫腓关节的解剖结构进行了大量基础研究,将其分为水平型和斜面型。有研究表明上胫腓关节脱位与关节面的倾斜度有关。国内外研究者相继应用多排螺旋 CT 对上胫腓关节进行坡度研究,为上胫腓关节脱位,尤其是习惯性脱位所致膝关节外侧疼痛提供了强有力的影像学依据,但尚无应用 MR 对上胫腓感觉坡度研究的相关报道^[8,9]。MR 检查不但能很好地显示上胫腓关节的骨性关节面,还能够显示关节软骨表面情况,而且检查无创、无辐射且坡度测量精确,且具有良好的软组织分辨力,对关节囊及相关韧带解剖及损伤的显示有明显的优势,为分析上胫腓关节脱位、退变提供更佳的影像学依据。另外,上胫腓骨关节是可动负重滑膜关节,关节面形态及坡度与关节退变概率有关, MRI 对关节退变的显示明显优于 CT 检查,为研究上胫腓关节退变提供更加敏感准确的影像检查方法^[10]。

腓骨形态笔直,支撑力强,具有充裕长度,又是人体唯一可携带长管骨骨骺和骺端关节面的供骨,切取供骨后对小腿负重功能影响不大。含有腓骨头的腓骨上段骨瓣可用于修复某些骨端缺损或重建关节,因此对上胫腓关节面坡度及其形态的研究有一定的临床意义^[5]。MR 检查能够显示软骨关节面形态较 CT 所显示的骨性关节面更具临床意义, MRI 具有良好的软组织分辨率,能够显示腓骨上段与周围软组织的位置关系,为外科手术提供更多的信息。

参考文献

- 1 陈新刚,朱建民,方浩,等. 人干腓骨上胫腓关节坡度测量[J]. 临床骨科杂志,2000,3(1):4-5
- 2 张银网,邓红震,朱海波,等. 人上胫腓关节 64 排螺旋 CT 重建及其关节面坡度研究[J]. 中国骨与关节外科,2011,4(5):364-368
- 3 许守祥,孙桂兰. 外伤性急性上胫腓关节脱位的诊治分析[J]. 中国医药,2008,3(13):37-38
- 4 方尾松,罗聪,邵汝谊,等. 创伤性上胫腓关节脱位. 中国医药,2012,25(7):605-606
- 5 陈振光,郑晓晖,张发惠,等. 腓骨头的形态观测及其临床应用评价[J]. 中国临床解剖学杂志,2006,24(6):609-611
- 6 Veth RP, Kingma LM, Nielsen. The abnormal proximal tibiofibular joint[J]. Arch Orthop Trauma Surg, 1984, 102(3): 167-171
- 7 Ogden JA. The anatomy and function of the proximal tibiofibular joint [J]. Clin Orthop Relat Res, 1974, (101):186-191
- 8 Bozkurt M, Yilmaz E, Akseki D, et al. The evaluation of the proximal tibiofibular joint for patients with lateral knee pain[J]. Knee, 2004, 11(4): 307-312
- 9 Semonian RH, Denlinger PM, Duggan RJ. Proximal tibiofibular subluxation relationship to lateral knee pain: a review of proximal tibiofibular joint pathologies[J]. J Orthop Sports Phys Ther, 1995, 21(5): 248-257
- 10 Boya H, Ozcan O, Oztekin HH. Radiological evaluation of the proximal tibiofibular joint in knees with severe primary osteoarthritis[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2008, 16(2):157-159

(收稿日期:2014-07-21)

(修回日期:2014-09-09)

(上接第 125 页)

- 12 唐亦奇,张振炜,杨乐军,等. 海上氦氧 150m 饱和-182m 巡回潜水潜水员心电图的变化[J]. 中华航海医学与高气压医学杂志,2003,10(1):22
- 13 Doubt TJ, Evans DE. Hyperbaric exposures alter cardiac excitation-contraction coupling[J]. Undersea Biomedical Research, 1982, 9(2):131-145
- 14 章恒笃. 氮氧饱和和潜水人体的心电图变化[J]. 铁道劳动卫生通讯,1984,4:31-33
- 15 Wokhlu N, Hsu VM, Wilson A, et al. P-wave amplitude and pul-

monary artery pressure in scleroderma[J]. Journal of Electrocardiology, 2006, 39(4):385-388

- 16 刘长云,李慈,方以群,等. 快速减压对兔电生理的影响[J]. 中国应用生理学杂志,2013,29(3):286-288
- 17 Marinovic J, Ljubkovic M, Obad A, et al. Effects of successive air and trimix dives on human cardiovascular function[J]. Medicine and Science in Sports and Exercise, 2009, 41(12):2207-2212

(收稿日期:2014-19-26)

(修回日期:2014-10-09)