

DOI: 10.16781/j.0258-879x.2021.09.1003

· 论 著 ·

## 长时间水下模拟运载对作业能力影响的实验研究

俞旭华, 刘文武, 徐佳骏, 李 慈, 方以群\*

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

**[摘要]** **目的** 研究长时间水下模拟运载后潜水员作业能力的变化及规律。**方法** 在水舱内模拟长时间水下运载环境, 利用工效学测试工具分别测定包括注意力、记忆力、情绪调控能力、思维能力、视觉反应能力、触觉反应能力及手动作业能力在不同水下运载时间(0.5、1、2、3、4、5 h)后的变化。**结果** 长时间水下模拟运载后, 上述测试的作业能力均出现不同程度的下降。在模拟运载<3 h, 作业能力下降并不明显; 在模拟运载≥3 h后, 作业能力明显下降且呈加速下降的趋势, 与模拟运载0.5 h相比差异均有统计学意义( $P < 0.01$ )。**结论** 长时间水下模拟运载潜水员的作业能力呈进行性下降, 其中水下3 h运载为当前运载条件下的极限。

**[关键词]** 水下运载; 蛙人; 作业能力; 潜水医学; 人体工程

**[中图分类号]** R 845.1

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 0258-879X(2021)09-1003-06

### Influence of simulating long-time underwater transport on job performance: an experimental study

YU Xu-hua, LIU Wen-wu, XU Jia-jun, LI Ci, FANG Yi-qun

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

**[Abstract]** **Objective** To study the changes of divers' job performance after simulating long-time underwater transport. **Methods** The long-time underwater transport environment was simulated in the water cabin. The changes of attention, memory, and abilities of emotional regulation, thinking, visual response, tactile response and manual operation were measured at different time points (0.5, 1, 2, 3, 4 and 5 h) with ergonomic tools. **Results** After stimulating long-time underwater transport, the job performance indexes tested above were all decreased to varying degrees. The overall descent was not obvious within the first 3 h, while it was significantly decreased and showed an accelerated downward trend after simulating long-time underwater transport for 3 h and more, showing significant difference when compared with 0.5 h of simulating long-time underwater transport (all  $P < 0.01$ ). **Conclusion** Job performance is gradually decreased in divers during simulating long-time underwater transport, and 3-h underwater transport is the limit for current conditions.

**[Key words]** underwater delivery; frogman; operational capabilities; submarine medicine; human engineering

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2021, 42(9): 1003-1008]

水下特种作战是利用蛙人从水下渗透, 以实现  
对敌后方的港口、桥梁、机场指挥中心等军事要点  
进行侦查与破袭的一种特殊作战样式, 具有行动隐  
蔽、发起突然、毁伤力强且不留痕迹等特点<sup>[1]</sup>。因  
为执行任务时需要最大程度隐蔽接敌, 蛙人需借助水  
下特种作战装备进行长时间、长距离水下运载<sup>[2]</sup>。  
水下特种作战运载装备是以水下潜艇或水面舰船为  
支撑平台、以作战为目的的海军特种装备, 也是承

担特殊任务的水下运载器, 和平时期也可用于水下  
安保和救援等任务<sup>[3]</sup>。目前, 世界海军强国已装备  
多种可应用于水下特种作战的运载装置, 大致可分  
为蛙人运载器、蛙人输送艇、潜艇干甲板掩蔽舱、  
特种作战潜艇、特种作战水下无人航行器等<sup>[4]</sup>。  
作为军事用途的水下运载装备, 其操作具有多人协  
同关系复杂、服役环境恶劣、环境参数难以控制的  
特点, 且在特定空间中, 人流、物流、信息流高度

**[收稿日期]** 2021-03-16 **[接受日期]** 2021-07-07

**[基金项目]** 装备军内科研重点项目(HJ20182A030377), 国防科技创新特区项目(19-163-16-ZD-020-008-01/03)。Supported by Key Project of Military Equipment Research (HJ20182A030377) and National Defense Science and Technology Innovation Special Zone Project (19-163-16-ZD-020-008-01/03)。

**[作者简介]** 俞旭华, 博士, 助理研究员. E-mail: xuhua\_0813@163.com

\*通信作者( Corresponding author). Tel: 021-81883131, E-mail: 1287225836@qq.com

密集,人机界面交互操作繁多,极大消耗着蛙人的生理储备<sup>[5]</sup>。研究发现,长时间水下运载后,潜水员的体能和作业能力显著下降<sup>[6]</sup>。常压下佩戴半闭式呼吸装置进行呼吸,即便受试潜水员在试验期间短暂进食,但在10 h人体试验结束后受试潜水员仍已无法靠自身力量站立,完全失去作战能力(未发表资料)。进行湖上及海上试验时,在长时间的水下运载过程中,因艇内空间有限,受试潜水员无法自主活动而长时间处于一种体位,从而导致体能和作业能力急剧下降,直接影响作战指挥。因此,开展长时间水下模拟运载蛙人作业能力变化的实验研究对指导部队训练、保障蛙人作战安全具有重要意义。

20世纪90年代,美军结合输送艇开展了水下劳动强度和作业能力评估等相关研究,为海豹特种部队的人员选拔、考核、训练、作战提供了一套专业性极强的技术指导方案<sup>[7]</sup>。俄罗斯海军研究人员针对水下运载器显示屏对蛙人作业能力的影响,对显示屏的大小及分辨率进行了优化,有效提高了蛙人的水下作业能力<sup>[8]</sup>。但是水下特种作战属于保密性作战样式,对外不予交流,无法获得关键的数据。此外,外军武器装备与我军也有较大差别,因此,亟须结合我军水下特种作战装备特点,研究长时间水下运载对潜水员作业能力的影响。

目前,蛙人输送艇为我军主要的水下特种作战装备。在长时间水下运载过程中,蛙人受到高压、低温、水流等复合因素的影响,这对蛙人的生理及心理形成极大挑战。加之其作战任务通常需要深入敌后,通讯、支援、保障难度增加,使得蛙人在行动过程可能面临各种危险情况,对执行特种作战任务十分不利<sup>[9]</sup>。因此,开展长时间水下模拟运载蛙人作业能力变化的实验研究,阐明蛙人作业能力随水下运载时间的变化规律对指导部队训练、拟定作战计划具有重要意义。

本研究中,我们在水舱内模拟长时间水下运载过程,通过测定不同运载时间后潜水员作业能力相关指标,系统评估潜水员作业能力的变化及规律。

## 1 材料和方法

1.1 水下模拟运载试验方案 (1) 6名潜水员分3次进行水下试验,每次2名潜水员穿着电加热保暖服、干式潜水服进入水舱,入水后背负呼吸装

置,佩戴呼吸面罩,打开氧气瓶阀,换气3次后调整至接通状态。后没入水中[水温(20±1)℃]检查装备气密情况,确认装备状态良好后端坐于水下模拟运载器前。(2) 关闭舱门,打开水舱供气气源,缓慢加压至7 m(0.07 MPa);嘱潜水员接通艇载供气管路并打开扳手截止阀,关闭氧气瓶阀;确认呼吸正常后,继续加压至40 m(0.4 MPa)。

(3) 40 m水深处停留30 min,然后按照如下减压方案减压出舱:40 m减至15 m,停留8 min;15 m减至12 m,停留12 min;12 m减至9 m,停留18 min;9 m减至7 m,打开氧气瓶阀,关闭扳手截止阀,断开艇载呼吸管路;继续减压至6 m,停留50 min;6 m减至3 m,继续停留至水下运载总时间达300 min。

1.2 潜水员作业能力测试时间 分别在模拟运载不同时间点对潜水员作业能力进行实时评估,测试时间分别为水下模拟运载0.5、1、2、3、4、5 h。

### 1.3 潜水员作业能力测试内容

1.3.1 注意力评估 本实验采用视觉搜索任务范式。实验开始后,模拟运载器屏幕左上角首先出现1个字母,随后屏幕中央出现6个水平排列的字母。如果之前呈现的字母在这6个字母中出现,潜水员按红色键,如果没有出现,则按蓝色键。系统将记录完成测试任务的正确率及反应时。

1.3.2 记忆力评估 通过N-back任务范式要求潜水员比较当前刺激与前面第N个刺激是否一致,通过控制当前刺激与目标刺激间隔的刺激个数来操纵记忆负荷。本实验采用1-back任务范式。当出现第1个图形时,潜水员不需要按键。当出现第2个图形时,潜水员需要将当前看到的图形跟前面的图形进行快速比较,如果相同,按红色键,如果不同,则按蓝色键,以此类推。系统将记录完成测试任务的正确率及反应时。

1.3.3 情绪调控能力测定 本实验采用Go/Nogo任务范式,其中靶刺激为2个并列的三角形。对于高频出现的靶刺激,要求潜水员对靶刺激尽可能快速地反应(按红色键),视为Go;而对于低频出现的Nogo刺激(非靶刺激),要求不做任何反应。系统将记录完成测试任务的正确率及反应时。

1.3.4 思维能力测定 本测试阶段,系统会出示两位数的随机算式和答案,要求潜水员判断答案正确与否,如正确,按测试键盘上的红色键,错误则按蓝

色键。系统将记录完成测试任务的正确率及反应时。

1.3.5 视觉反应能力测定 本测试系统主要进行颜色视觉选择反应时测试。实验开始后,潜水员根据屏幕上出现的不同颜色刺激对应选择小键盘上的不同按键,测试的颜色刺激包括红、黄、绿、蓝4种,匹配红、黄、绿、蓝4种按键刺激。系统将记录完成测试任务的正确率及反应时。

1.3.6 触觉反应能力测定 (1) 触觉空间阈值测试棒。该测试包含8个测试棒,缝隙宽度分别为0.5、0.75、1.0、1.25、1.5、2.0、3.0 mm。水下测试开始时,潜水员伸出惯用的食指,指心朝上,确保姿势比较舒适;测试人员按中力度力量压迫潜水员的食指表面,力量应不使潜水员感到疼痛;相对于手指的方向,潜水员触觉纹理的刺激应为纵向(垂直)或横向(水平),测试棒按压约1 s,手指形变1 mm或2 mm后,要求潜水员回答测试棒的方向(横向或纵向,回答时间最长5 s)。改变测试棒的方向,重复10次,并记录感知反应的正确率。每10次为一组,每组之后休息时间3 min,也可询问潜水员触觉感受,适当调整休息时间。当正确率达到75%以上时,选择下一个更精细的测试棒进行测试和重复上述步骤,直到正确率下降至50%以下记录测试棒的尺寸,将正确率为75%或50%的测试棒尺寸记录作为潜水员触觉感知灵敏度的阈值点。(2) 针刺痛觉测试套件。该方法主要用于评估皮肤的触觉,是一种非侵入式测试方法。实验时,根据常压下测试结果选择粗细得当的尼龙丝,调节适当的伸出长度,垂直地刺激皮肤。可通过调节伸出长度、更换尼龙丝调整刺激力大小,直到尼龙丝弯曲,记录潜水员可感知的最小压力值。

1.3.7 手动作业能力测定 (1) 拧螺母。本实验采用螺母-螺栓装配板进行测试,此装配板由2种型号的螺栓及配套的2个螺母组成,螺母直径分别为14 mm和10 mm,螺栓尺寸分为2种(长

40 mm、直径5 mm;长30 mm、直径7 mm)。潜水员端坐于实验室内,装配板置于其正前方实验台上,位于手的最佳作业范围内,螺母和螺栓放置于左前方。木板上有20个规格一致的小孔,孔径分别为6 mm和8 mm。测试开始后,潜水员首先用左手将螺栓拿起插入至装配板对应孔中,再用右手拿起螺母,按左手固定螺栓右手旋转螺母的操作规范双手同时进行拧螺母任务,2种螺母均按要求装好为完成一次螺母装配。此项目测试手的精准定位能力,记录潜水员完成全部装配所需的时间。(2) 插孔实验。采用1块长方形木板和20根尺寸分3种规格(直径7 mm、长30 mm;直径5 mm、长30 mm;直径7 mm,长40 mm)的小棍;木板上有20个2种规格的小孔,孔径为8 mm和6 mm;木板置于潜水员手的最佳作业范围内,小棍放置于左前方。潜水员首先将小棍置于右手,测试人员示意开始后,按操作规范用右手迅速将小棍插入木板孔内,20根小棍完全按要求插完为1次装配。此项目测试手的精准定位能力,记录潜水员完成全部装配所需的时间。

1.4 统计学处理 应用SPSS 21.0软件进行统计学分析。计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,采用单因素方差分析方法分析各测试时间点工效学测试指标之间是否存在差异。检验水准( $\alpha$ )为0.05。

## 2 结果

2.1 长时间水下模拟运载对潜水员注意力的影响 结果如表1所示,长时间水下模拟运载后潜水员视觉搜索任务正确率进行性下降,反应时进行性延长;与模拟运载0.5 h相比,模拟运载 $\geq 3$  h后正确率显著下降、反应时明显延长,差异有统计学意义( $P$ 均 $< 0.01$ )。结果提示潜水员注意力难以集中,且在模拟运载 $\geq 3$  h后注意力出现加速下降的趋势。

表1 长时间水下模拟运载后潜水员视觉搜索任务正确率及反应时的变化

Tab 1 Changes in visual search task accuracy and response time of divers after simulating long-time underwater transport

Index	$n=6, \bar{x} \pm s$					
	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h
Accuracy/%	100.00 $\pm$ 0.00	98.33 $\pm$ 1.86	95.42 $\pm$ 2.24	92.92 $\pm$ 1.72**	83.33 $\pm$ 2.76**	74.17 $\pm$ 3.73**
Response time/s	0.96 $\pm$ 0.05	0.98 $\pm$ 0.06	1.04 $\pm$ 0.02	1.09 $\pm$ 0.01**	1.23 $\pm$ 0.02**	1.37 $\pm$ 0.08**

\*\* $P < 0.01$  vs 0.5 h group.

2.2 长时间水下模拟运载对潜水员记忆力的影响 结果如表 2 所示,长时间水下模拟运载后潜水员 1-back 任务执行正确率进行性下降,反应时进行性延长;与模拟运载 0.5 h 相比,模拟运载 ≥3 h 后正确率

显著下降、反应时明显延长,差异有统计学意义 ( $P$  均  $<0.01$ )。结果提示潜水员记忆能力下降,且在模拟运载 ≥3 h 后记忆力呈现加速下降的趋势。

表 2 长时间水下模拟运载后潜水员 1-back 任务正确率及反应时的变化

Tab 2 Changes in 1-back task accuracy and response time of divers after simulating long-time underwater transport

Index	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h
Accuracy/%	94.60±1.23	93.14±1.45	92.22±1.19	91.25±0.96**	88.05±1.16**	83.96±1.29**
Response time/s	0.50±0.01	0.53±0.02	0.54±0.01	0.56±0.02**	0.65±0.01**	0.74±0.02**

\*\* $P < 0.01$  vs 0.5 h group.

2.3 长时间水下模拟运载对潜水员情绪调控能力的影响 如表 3 所示,长时间水下模拟运载后潜水员 Go/Nogo 任务正确率进行性下降,反应时进行性延长;与模拟运载 0.5 h 相比,模拟运载 ≥3 h 后正

确率显著下降、反应时明显延长,差异有统计学意义 ( $P$  均  $<0.01$ )。结果提示潜水员情绪调控能力下降,且在模拟运载 ≥3 h 后情绪调控能力呈现加速下降的趋势。

表 3 长时间水下模拟运载后潜水员 Go/Nogo 任务正确率及反应时的变化

Tab 3 Changes in Go/Nogo task accuracy and response time of divers after simulating long-time underwater transport

Index	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h
Accuracy/%	97.47±0.94	96.06±0.63	95.45±0.50	94.31±0.67**	90.88±1.43**	84.61±2.00**
Response time/s	0.62±0.01	0.62±0.01	0.63±0.01	0.64±0.01**	0.66±0.01**	0.69±0.02**

\*\* $P < 0.01$  vs 0.5 h group.

2.4 长时间水下模拟运载对潜水员思维能力的影响 如表 4 所示,长时间水下模拟运载后潜水员随机算式任务结果正确率进行性下降,反应时进行性延长;与模拟运载 0.5 h 相比,模拟运载 ≥3 h 后

正确率显著下降、反应时明显延长,差异有统计学意义 ( $P$  均  $<0.01$ )。结果提示潜水员思维能力下降,且在模拟运载 ≥3 h 后思维能力呈现加速下降的趋势。

表 4 长时间水下模拟运载后潜水员随机算式任务正确率及反应时的变化

Tab 4 Changes in random formula task accuracy and response time of divers after simulating long-time underwater transport

Index	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h
Accuracy/%	95.83±2.41	93.75±2.08	91.67±2.41	88.89±3.11**	80.56±3.11**	70.83±3.40**
Response time/s	1.66±0.04	1.73±0.04	1.77±0.04	1.82±0.04**	1.93±0.04**	2.04±0.04**

\*\* $P < 0.01$  vs 0.5 h group.

2.5 长时间水下模拟运载对潜水员视觉反应能力的影响 颜色视觉选择反应任务结果(表 5)显示,长时间水下模拟运载后潜水员视觉选择正确率进行性下降,反应时进行性延长;与模拟运载 0.5 h 相比,模拟运载 ≥3 h 后正确率显著下降、反应时明显延长,差异有统计学意义 ( $P$  均  $<0.01$ )。结果提示潜水员视觉反应能力下降,且在模拟运载 ≥3 h 后视觉反应能力呈现加速下降的趋势。

2.6 长时间水下模拟运载对潜水员触觉反应能力的影响 如表 6 所示,长时间水下模拟运载后潜水员触觉反应能力进行性下降,触觉空间阈值及针刺痛觉进行性增高;与模拟运载 0.5 h 相比,模拟运载 ≥3 h 后触觉反应能力明显下降,差异有统计学意义 ( $P$  均  $<0.01$ ),且在模拟运载 ≥3 h 后触觉反应能力呈现加速下降的趋势。

2.7 长时间水模拟运载对潜水员手动作业能力的

影响 结果如表 7 所示, 长时间水下模拟运载后潜水员手动作业能力进行性下降, 拧螺母实验和插孔实验完成时间进行性延长; 与模拟运载 0.5 h 相比,

模拟运载  $\geq 3$  h 后手动作业能力明显下降, 差异有统计学意义 ( $P$  均  $< 0.01$ ), 且在模拟运载  $\geq 3$  h 后手动作业能力呈现加速下降的趋势。

表 5 长时间水下模拟运载后潜水员颜色视觉选择反应任务正确率及反应时的变化

Tab 5 Changes in color reaction task accuracy and response time of divers after simulating long-time underwater transport

Index	<i>n=6, <math>\bar{x} \pm s</math></i>					
	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h
Accuracy/%	100.00 $\pm$ 0.00	99.60 $\pm$ 0.57	98.44 $\pm$ 0.51	97.77 $\pm$ 0.86**	94.12 $\pm$ 0.67**	89.35 $\pm$ 1.07**
Response time/s	0.62 $\pm$ 0.01	0.63 $\pm$ 0.01	0.63 $\pm$ 0.01	0.64 $\pm$ 0.01**	0.67 $\pm$ 0.01**	0.70 $\pm$ 0.01**

\*\* $P < 0.01$  vs 0.5 h group.

表 6 长时间水下模拟运载后潜水员触觉反应能力的变化

Tab 6 Changes in tactile perception of divers after simulating long-time underwater transport

Index	<i>n=6, <math>\bar{x} \pm s</math></i>					
	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h
Tactile spatial threshold/mm	0.75 $\pm$ 0.16	0.92 $\pm$ 0.20	1.17 $\pm$ 0.20	1.29 $\pm$ 0.19**	1.67 $\pm$ 0.26**	1.92 $\pm$ 0.20**
Acupuncture pain threshold/g	0.04 $\pm$ 0.02	0.05 $\pm$ 0.01	0.10 $\pm$ 0.05	0.13 $\pm$ 0.04**	0.32 $\pm$ 0.11**	0.47 $\pm$ 0.09**

\*\* $P < 0.01$  vs 0.5 h group.

表 7 长时间水下模拟运载后潜水员手动作业能力的变化

Tab 7 Change in manual operation ability of divers after simulating long-time underwater transport

Index	<i>n=6, <math>\bar{x} \pm s</math></i>					
	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h
Screw/s	83.33 $\pm$ 2.80	89.50 $\pm$ 2.26	95.50 $\pm$ 5.65	100.00 $\pm$ 5.29**	113.83 $\pm$ 2.48**	128.33 $\pm$ 1.63**
Pegboard/s	37.17 $\pm$ 1.07	39.83 $\pm$ 0.69	42.00 $\pm$ 0.82	43.50 $\pm$ 0.76**	51.17 $\pm$ 2.11**	60.33 $\pm$ 1.70**

\*\* $P < 0.01$  vs 0.5 h group.

### 3 讨论

本研究中, 我们采用测试软件与测试工具相结合的方式对包括注意力、记忆力、情绪、思维、视觉反应等常见任务所需能力进行了分析与研究, 对潜水员作业工效进行了系统评价, 结果发现长时间水下运载对潜水员作业能力会产生明显的影响, 在水下模拟运载  $\geq 3$  h 后进入一个加速下降期。

视觉注意是信息加工中的一项重要心理调节机制, 是从外界的大量信息中选择和保持有用信息、忽略无用信息的意识活动<sup>[10]</sup>, 是视感知过程中高效性和可靠性的保障。本研究中潜水员视觉搜索任务的反应时延长、正确率降低, 提示随着水下运载时间的延长, 潜水员注意力水平下降, 且在模拟运载  $\geq 3$  h 后其下降幅度明显加快。工作记忆是在执行认知任务过程中, 用于信息的暂时储存与加工的资源有限的系统。 $N$ -back 任务是用来评估神经感知和工作记忆力的有效手段之一, 是测试大脑对快速变化的信息不同反应<sup>[11-12]</sup>。本研究发

现潜水员 1-back 任务的反应时延长、正确率下降, 提示随着水下运载时间的逐渐延长, 潜水员记忆力进行性下降, 且在模拟运载  $\geq 3$  h 后其下降幅度较之前更明显。抑制控制是一种重要的执行控制功能, 通常指对优势反应或习惯行为的抑制<sup>[13]</sup>。蛙人在遂行任务中可能遇到许多引起情绪反应的情境和事件, 因此如何在情绪影响下调节和控制自己的行为对完成任务尤为重要。Go/Nogo 任务是研究反应抑制能力的一种常用范式, 对 Nogo 刺激的错误反应通常被认为是反应抑制困难的一项指标, 偏差刺激反应时与标准刺激反应时之差即为抑制情绪控制的行为学指标<sup>[14]</sup>。通过模拟运载实验我们发现潜水员 Go/Nogo 任务反应时随着水下运载时间的延长逐渐增加, 同时正确率进行性下降, 提示潜水员情绪控制能力持续降低。随机算式的任务范式被广泛应用于思维能力评估, 随机算式任务相对简单、可重复, 相比于其他的思维能力检测类型更易操作且能够快速反映潜水员的思维能力变化<sup>[15]</sup>。本研究结果显示, 潜水员完成随机算式任务反应时进行性

延长,同时正确率逐步下降,在模拟运载 $\geq 3$  h后潜水员思维能力明显下降,且下降加速。视觉反应时测试被广泛应用于作业能力评价。研究表明,在对特定的刺激做出特定动作或反应前,大脑内有一个信息加工过程,又称心理潜伏期。影响视觉反应选择时的因素较复杂,刺激的数目越多、选择的任务越复杂则反应时间越长;此外,年龄、性别、疲劳等因素也会对选择反应时产生影响<sup>[16]</sup>。本研究中潜水员在水下通过按颜色键记录其视觉反应能力,测试结果发现随着水下模拟运载时间延长,潜水员对特定刺激做出反应的时间明显延长,且正确率逐渐下降。触觉是由压力、震动等机械刺激引起的与触摸有关的感受。触觉纹理是指与物体接触时表面微观几何差异和物理特性所引起的凹凸不平的力触感<sup>[17]</sup>。皮肤精细触觉的敏感度取决于触觉阈值的高低,阈值越高触觉感知能力越差。针刺痛觉阈值是国际公认的手指精细触觉测试指标<sup>[18]</sup>。本研究中随着水下运载时间的延长,触觉空间阈值及针刺痛觉阈值均明显升高,提示潜水员触觉感知能力明显下降。拧螺母和插钉板是手动作业工效研究中具有工效优势的手动作业测试项目,被广泛应用于军事、航天等领域<sup>[19-20]</sup>。潜水员在水下需要操纵包括运载器及呼吸装置在内的多种装备及设备,对水下精细动作完成的要求较高。本研究中拧螺母和插孔手动作业任务完成的耗时随着水下运载时间的延长而逐渐延长,提示潜水员手动作业能力下降。

在长时间水下运载过程中,潜水员面临水下高压、水流、寒冷、黑暗等诸多不良因素的影响,随着时间的延长,潜水员面临极大的生理与心理挑战。本研究中,模拟运载舱内水温维持在 $(20\pm 1)$  °C,但水下5 h模拟运载后潜水员仍普遍反映头部和四肢感觉寒冷。潜水员遂行作战任务区域的水温远远达不到测试时的温度,因此潜水员作业能力可能下降更快。此外,模拟运载条件下潜水员无须承受作战及水下环境的多重影响,测试结果往往优于实际作战条件下的结果。为进一步提升蛙人作战能力,可通过日常低温训练提高他们的低温耐受能力;在新型材料及温控技术方面实现突破,加强头部及四肢的保暖措施。在水下环境模拟方面,可进一步通过暗环境适应训练、模拟水流冲击训练等方法增强蛙人实战条件下适应能力,提升其作战效能。通过格斗、刺杀等训练增强蛙人在应对作战任务时的信心,提高专注能力和沉着冷静的品质。此外,在研究过程中我们也发现,潜水员在

视觉搜索、情绪调控等方面均有一定的学习效应,可通过开发相应的软硬件加强其训练强度,从而提高相应的作战能力。

#### [参考文献]

- [1] 张庆利. 特种作战蛙人体能训练方法研究[J]. 军事体育进修学院学报, 2011, 30: 82-84.
- [2] 王帅, 刘涛. 蛙人运载装备体系发展现状及关键技术[J]. 中国造船, 2012, 53: 198-210.
- [3] 滕俊, 郭万海, 刘冬利. 国外海军水下特种作战研究[J]. 舰船电子对抗, 2012, 35: 39-42.
- [4] 付学志, 石建飞, 江源. 蛙人水下作战系统装备发展现状及趋势[J]. 电声技术, 2019, 43: 11-17.
- [5] 钟宏伟, 李德林. 水面水下蛙人输送艇作战运用及相关技术发展[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(S1): 1-5, 31.
- [6] 范维, 方以群, 柳初萌, 顾靖华, 刘平小. 潜水员实验室水下作业能力实时监测平台的构建[J]. 人类工效学, 2018, 4: 68-70.
- [7] 宋克. 美国海军海豹突击队运输艇部队士兵[J]. 模型世界, 2010, 8: 102-103.
- [8] 小露. 俄罗斯蛙人部队探秘[J]. 国防科技, 2002, 9: 56-59.
- [9] 薛青丽. 蛙人输送艇挺进水下特种战场[J]. 当代海军, 2004(3): 44-45.
- [10] 潘毅, 许百华, 陈晓芬. 选择性注意与视觉空间工作记忆的交互作用[J]. 心理科学, 2006, 29: 323-326.
- [11] 沈模卫, 易宇骥, 张峰.  $n$ -back任务下视觉工作记忆负荷研究[J]. 心理与行为研究, 2003, 1: 166-170, 176.
- [12] 武弋, 李宏永, 张喆, 段晓鑫, 张帆, 陈旭辉, 等. 改进的  $N$ -back 范式工作记忆认知实验研究[J]. 中国健康心理学杂志, 2013, 21: 1679-1682.
- [13] 杨苏勇, 黄宇霞, 张慧君, 罗跃嘉. 情绪影响行为抑制的脑机制[J]. 心理科学进展, 2010, 18: 605-615.
- [14] 任子楠. 情绪背景下的行为抑制控制及其神经机制研究[J]. 心理学进展, 2019, 9: 210-216.
- [15] 张梦, 刘启珍, 张裕鼎. 中央执行负荷、算式难度与形式对大学生减法估算的影响[J]. 教育教学论坛, 2016: 195-196.
- [16] 邓明明, 孙林岩, 孙林辉, 崔凯. 煤矿工人反应时、暗适应测试与事故倾向调查[J]. 工业工程与管理, 2013, 18: 102-106.
- [17] 闫岩, 谢文邀, 张远航, 张春. 纹理识别触觉传感器的设计与实现[J]. 微电子学与计算机, 2017, 34: 59-62.
- [18] 李靖, 孙筱, WU M X. 人体针刺操作实践对手指精细触觉的影响[J]. 针刺研究, 2012, 37: 502-505.
- [19] 庞志兵, 易华辉, 陈志伟, 杨前. 低温条件下高炮作业工效研究[J]. 人类工效学, 2003, 9: 38-40.
- [20] 呼慧敏, 肖华军, 丁立, 陈守平, 杨春信, 秦志峰. 急性轻、中度低压缺氧对手动作业工效的影响[J]. 航天医学与医学工程, 2008, 21: 97-102.

[本文编辑] 商素芳