

· 临床研究 ·

doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2024.07.004

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20240403.1700.003\(2024-04-07\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20240403.1700.003(2024-04-07))高认知负荷下工作记忆 VR 训练对陆军军人 HRV 及
眼动影响的研究*杨珮艺¹, 詹雨¹, 程晓彤², 冯正直^{1△}

(1. 陆军军医大学医学心理系, 重庆 400038; 2. 中国人民解放军 32298 部队, 山东潍坊 261000)

[摘要] **目的** 探讨高认知负荷下工作记忆虚拟现实(VR)训练对陆军军人心率变异性(HRV)及眼动信号的影响。**方法** 从某陆军单位抽取 56 名陆军军人, 分为驾车组和哨卡组, 被试者均为男性, 平均年龄为 (20.76 ± 1.60) 岁。采集驾车组和哨卡组训练前、后 VR 测验的 HRV[标准化的高频功率(HFnorm)、标准化的低频功率(LFnorm)、HF 与 LF 的比值(HF/LF 比值)]及眼动信号(瞳孔直径和瞳孔位置热点图)。用配对样本 *t* 检验、Wilcoxon 符号秩和检验、Pearson 相关分析等统计方法对数据进行分析。**结果** 驾车组和哨卡组任务训练前的瞳孔直径均明显大于任务训练后($P < 0.01$)。除 A1d1 任务训练前的 HFnorm 明显大于任务训练后, 其余任务训练前与任务训练后的 LFnorm, HFnorm 和 LF/HF 比值比较差异均无统计学意义($P > 0.05$)。除 A1d1 和 B1a1 任务之外, 其余任务训练前的瞳孔位置分布较任务训练后更为集中。**结论** 高认知负荷下工作记忆 VR 训练对提高军人认知负荷容量和工作记忆能力是有效的。

[关键词] 陆军军人; 虚拟现实; 高认知负荷; 工作记忆; 眼动; 心率变异性**[中图分类号]** E0-051**[文献标识码]** A**[文章编号]** 1671-8348(2024)07-0979-06Study on impact of high cognitive load working memory VR training
on army soldiers' HRV and eye movement*YANG Peiyi¹, ZHAN Yu¹, CHENG Xiaotong², FENG Zhengzhi^{1△}

(1. Faculty of Medical Psychology, Army Military Medical University, Chongqing 400038, China; 2. 32298 unit of PLA, Weifang, Shandong, 261000, China)

[Abstract] **Objective** To investigate the effects of high cognitive load working memory virtual reality (VR) training on the heart rate variability (HRV) and eye movement signals of army soldiers. **Methods** A total of 56 male army soldiers were extracted from a certain army unit and randomly divided into the driving group and sentry group, their average age was (20.76 ± 1.60) years old. HRV (LF norm, HFnorm, and LF/HF ratio) and eye movement signals (pupil diameter and pupil position heat map) were collected before and after VR tests for the driving group and sentry group. The data were analyzed by the statistical methods such as paired sample *t*-tests, Wilcoxon rank sum test and Pearson correlation analysis. **Results** The pupil diameter before the task test in the driving group and sentry group was significantly larger than that after the task training ($P < 0.01$). Except the detected HFnorm value before the A1d1 task training was significantly greater than that after the task training, there were no statistically significant differences in LFnorm, HFnorm, and LF/HF ratio before and after the tasks training for the other tasks. Except for A1d1 and B1a1 task, the pupil position distribution before the tasks training for the other tasks was more concentrated than after the tasks training. **Conclusion** High cognitive load working memory VR training is effectively for increasing the soldiers' cognitive load capacity and working memory ability.

[Key words] army soldiers; virtual reality; high cognitive load; working memory; eye movement; heart rate variability

现代战争高危险、高恶劣、高复杂的战场环境, 会使军人承受极大的认知负荷, 丧失多重任务平行处理的能力, 甚至出现认知损伤或认知障碍^[1], 从而影响军事作业绩效和战斗力。军人作战心理素质成为决

定战争胜负的关键因素之一^[2-3], 其中认知能力是心理素质的重要组成部分, 与军人军事任务完成能力息息相关。世界军事强国近年来都把军人认知能力的提升作为焦点和热点问题进行研究^[4-6]。根据认知负

荷理论,影响认知负荷大小的重要因素是工作记忆所能承受加工数量的多少^[7],若当前任务施加的加工数量超过了个体的工作记忆总量,即出现高认知负荷,会导致任务完成效率降低。因此,工作记忆被认为是个体认知负荷能力的核心,是指个体在执行认知任务时,暂时存储和加工信息的容量有限的系统^[8],可以通过训练提高^[9]。但以往工作记忆评估和训练多采用纸笔或计算机形式,真实性欠缺且生态效度不高,训练结果对于军人在战场中表现的预测力也较低^[10]。而当前迅速发展的虚拟现实(VR)技术可用于模拟战场环节,通过动态建模、三维动画等技术模拟现实环境,形成高级人机交互,模仿高危险、高恶劣、高复杂的战场环境^[11],在军事心理训练中有不可比拟的优势。国外将 VR 技术应用于军人工作记忆的研究相对较多,在初步评估刷新、转换和抑制功能方面已获得了令人满意的效果。如 PARSONS 等^[12]为美军构建了虚拟伊拉克战场,评估刺激复杂度、强度的增加对军人执行注意任务的影响。结合认知任务,形成虚拟现实认知能力测评系统(Virtual Reality Cognitive Performance Assessment Test, VRCPAT1.0)^[13]对战争场景下的认知功能进行生理和心理评估。而国内对 VR 认知评估和训练的运用主要集中在飞行员、孤独症、脑损伤患者及老年痴呆患者^[14-18],鲜有应用 VR 技术对军人工作记忆进行评估与训练的相关研究。因此,本研究拟利用程晓彤等^[19]构建的陆军军人工作记忆 VR 训练系统中 VR 虚拟驾车和哨卡场景任务来增加被试者认知负荷,采集能反映个体副交感和交感神经激活程度的心率变异性(HRV)频域信号,如高频成分(HF)、低频成分(LF)、标准化的高频功率(HFnorm)、标准化的低频功率(LFnorm)和 HF 与 LF 的比值(LF/HF)。这些都与个体的自主神经系统的调节、呼吸活动、应激状态及情绪有关,因此,在本研究中用于推测被试者的工作记忆和认知负荷水平^[20]。同时,利用眼动追踪技术记录被试者的眼动轨迹和瞳孔变化等,以反映个体对信息的实时获取和加工过程^[21],探讨高认知负荷下工作记忆 VR 训练对军人 HRV 及眼动信号的影响。

1 资料与方法

1.1 一般资料

从某陆军单位抽取 60 名军人分别进入驾车组和哨卡组,每组 30 名。期间有 4 名被试者因休假、外出学习等原因未能完成训练,最终回收有效数据 56 份,驾车组 27 名、哨卡组 29 名。所有被试者均为男性,年龄 18~25 岁,平均(20.86±1.80)岁。本研究获得陆军军医大学伦理委员会批准[IEC-C-(B013)-02-J.02],所有被试者对本研究知情同意。

1.2 方法

1.2.1 试验设备

本研究的实验设备包括 2 套 VR 设备(包括头戴式设备、操控手柄和定位器),1 个模拟驱动器(罗技

G29 方向盘+Playseat 驱动器座椅),2 个生物反馈仪和 2 台计算机。生理反馈仪采用加拿大 Thought Technology 公司生产的 Procomp infinity/BioGraph infinity 八通道多参数生物反馈仪,通过指端生物反馈仪的指端传感器记录被试者的 HRV 频域指标。眼动仪采用的是 HTC VIVE Pro Eye 专业版 VR 眼镜,其集成 Tobbi 眼动追踪功能,利用 SteamVR2.0 跟踪技术,采用双 AMOLED 显示器,注视数据输出频率(双眼)为 120 Hz,追踪视角为 110°,精度为 0.5°~1.1°,刷新率为 90 Hz,双眼分辨率为 2 880 P×1 600 P,可输出数据有时间戳、凝视原点、凝视方向、瞳孔位置、瞳孔直径和睁眼状态。

1.2.2 高认知负荷下工作记忆 VR 训练

采用程晓彤等^[19]构建的陆军军人工作记忆 VR 训练系统,在 VR 场景中被试者需同时完成战斗任务(驾车任务 1 级/哨卡任务 1 级)和工作记忆任务(n-back 任务、数字转换任务和色词 Stroop 任务),战斗任务与工作记忆任务相结合,通过改变认知干扰的复杂度和强度调控被试者的认知负荷水平。编号规则为:战斗任务中驾车任务编码 A,哨卡任务编码 B,工作记忆任务中 n-back 任务编码 a,数字转换任务编码 b,色词 Stroop 任务编码 d。训练任务编码见表 1。

表 1 训练任务编码表

任务	n-back	数字转换	色词 Stroop
驾车任务	A1a1	A1b1	A1d1
哨卡任务	B1a1	B1b1	B1d1

A1a1:驾车 1 级 1-back 任务;A1b1:驾车 1 级数字转换任务固定位置;A1d1:驾车 1 级色词 stroop 任务固定位置;B1a1:哨卡 1 级 1-back 任务;B1b1:哨卡 1 级数字转换任务固定位置;B1d1:哨卡 1 级色词 stroop 任务固定位置。

1.2.3 驾车任务

驾车任务通过设置敌我交战区域中的安全区、埋伏区任务和障碍以造成认知干扰;被试者驾车在沙漠中行驶,道路掺杂干扰和障碍(安全区),或暴露在枪击、爆炸及战友受伤等战争场景(埋伏区)。类似于真实场景,被试者在驾车途中以方向盘和油门控制车辆方向和速度,或躲避障碍物。驾车过程中要同时完成工作记忆任务,从起点开始后,被试者单纯驾车 30 s 后挡风玻璃上呈现注视点“+”500 ms,而后呈现工作记忆 VR 训练任务,包括 n-back 任务、数字转换任务、色词 stroop 任务,完成后到达终点。

1.2.4 哨卡任务

哨卡任务通过设置白天和夜间两个场景调控被试者的认知觉醒水平;被试者在虚拟哨卡场景中执行任务,观察通过的车辆,车辆停下时耳机向被试者报告通过车辆的分类,可能是中国军人、中国平民、中国警察或可疑叛乱分子,被试者要立即判别报告是否正确,按左右手柄作出反应,正确按“左手柄”,错误按“右手柄”,其中匹配刺激与非匹配刺激比例为 2:1,按键车走,车辆通过后会呈现工作记忆 VR 训练任务,包

括 n-back 任务、数字转换任务和色词 Stroop 任务。

1.2.5 工作记忆 VR 训练

工作记忆 VR 训练任务包含:(1) n-back 经典的字母匹配任务;(2)色词 Stroop 任务,经典的颜色命名任务,以固定和随机位置两级难度展现“红”“绿”词汇;(3)数字转换任务,固定位置指难度数字出现位置和注视位置一致,随机位置指难度数字出现位置不固定,以九宫格区间出现。

1.2.6 实验流程

在正式实验之前被试者先休息 5 min,在中指连接生物反馈仪。首先测试 5 min 的静息态,同时对 VR 眼镜进行眼动校准,然后戴上 VR 眼镜完成 n-back、数字转换和色词 Stroop 3 个任务,任务过程中通过生物反馈仪的指端传感器记录被试者的 HRV,连接生理反馈仪记录其心电信号,VR 眼镜同时记录被试者的眼动信号。驾车组和哨卡组被试者共完成 VR 训练前和训练后 6 项任务,包括驾车组 A1a1、A1b1、A1d1,哨卡组的 B1a1、B1b1、B1d1。

1.3 生理指标收集

THAYER 等^[22]提出由于迷走神经与前额叶皮层联系紧密,所以交感神经活动与认知能力存在直接联系,且 HRV 生理信号不存在延迟问题,是对交感神经系统的首批反应之一,对于验证认知负荷的准确率较高^[23]。因此,本研究采集被试者任务训练前和任务训练后的 HRV 频域指标(HFnorm LFnorm、LF/HF 比值)作为被试者认知负荷水平变化的判断信息,此外,工作记忆中的视空间模版负责视觉信息的暂时储存。眼动数据是反映个体认知负荷水平的有效生理指标^[24],可以通过个体的瞳孔直径和热力图判断认知负荷水平的高低^[25]。因此,参考以往研究^[26],本研究采集被试者任务训练前和任务训练后左眼的瞳孔直

径(mm)和热力图(所有被试者的瞳孔位置)分别反映认知负荷水平的变化。

1.4 统计学处理

采用 Python 软件对眼动数据进行初步处理,采用 SPSS25.0 软件对数据进行录入和统计分析,符合正态分布的计量资料采用 $\bar{x} \pm s$ 表示,运用配对样本 *t* 检验进行比较分析;不符合正态分布的计量资料采用 $M(Q_1, Q_3)$ 表示,采用 Wilcoxon 符号秩和检验进行比较分析,以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 驾车组任务训练前、后的 HRV 及瞳孔直径比较

驾车组 A1a1 任务训练前的瞳孔直径明显大于任务训练后 ($P < 0.01$);训练前、后的 LFnorm、HFnorm、LF/HF 比值差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。A1b1 任务训练前的瞳孔直径明显大于任务训练后 ($P < 0.01$);任务训练前、后的 LFnorm、HFnorm、LF/HF 比值差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。A1d1 任务训练前的瞳孔直径、HFnorm 明显大于任务训练后 ($P < 0.01$);任务训练前、后的 LFnorm、LF/HF 比值差异无统计学意义 ($P > 0.05$),见表 2。

2.2 哨卡组任务训练前、后的 HRV 及瞳孔直径比较

哨卡组 B1a1 任务训练前的瞳孔直径明显大于任务训练后 ($P < 0.01$);任务训练前、后的 LFnorm、HFnorm、LF/HF 比值差异无统计学意义 ($P > 0.05$);B1b1 任务训练前的瞳孔直径明显大于任务训练后 ($P < 0.01$);任务训练前、后的 LFnorm、HFnorm、LF/HF 比值差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。B1d1 任务训练前的瞳孔直径明显大于训练后 ($P < 0.01$);任务训练前、后的 LFnorm、HFnorm、LF/HF 差异无统计学意义 ($P > 0.05$),见表 3。

表 2 驾车组任务训练前、后的 HRV 及瞳孔直径比较[$\bar{x} \pm s$ 或 $M(Q_1, Q_3)$]

项目	A1a1				A1b1				A1d1			
	训练前	训练后	<i>t</i> / <i>Z</i>	<i>P</i>	训练前	训练后	<i>t</i> / <i>Z</i>	<i>P</i>	训练前	训练后	<i>t</i> / <i>Z</i>	<i>P</i>
瞳孔直径	3.79±0.64	3.34±0.52	6.27	<0.01	3.71±0.62	3.34±0.51	5.48	<0.01	3.60±0.62	3.27±0.53	5.17	<0.01
LFnorm(nu)	40.57±13.73	36.93±15.89	0.81	0.43	33.70±17.27	36.43±13.03	0.60	0.36	36.70±15.60	43.62±15.54	1.75	0.09
HFnorm(nu)	48.43±10.38	51.67±13.53	0.91	0.37	52.82±14.87	51.04±12.43	0.44	0.67	53.14±14.03	44.42±14.10	2.73	<0.05
LF/HF 比值	0.93(0.53,1.13)	0.91(0.39,1.23)	-0.27	0.79	0.78(0.41,0.76)	0.88(0.53,1.15)	-1.14	0.26	1.08(0.45,1.28)	1.22(0.62,1.72)	-0.77	0.44

表 3 哨卡组任务训练前、后的 HRV 及瞳孔直径比较[$\bar{x} \pm s$ 或 $M(Q_1, Q_3)$]

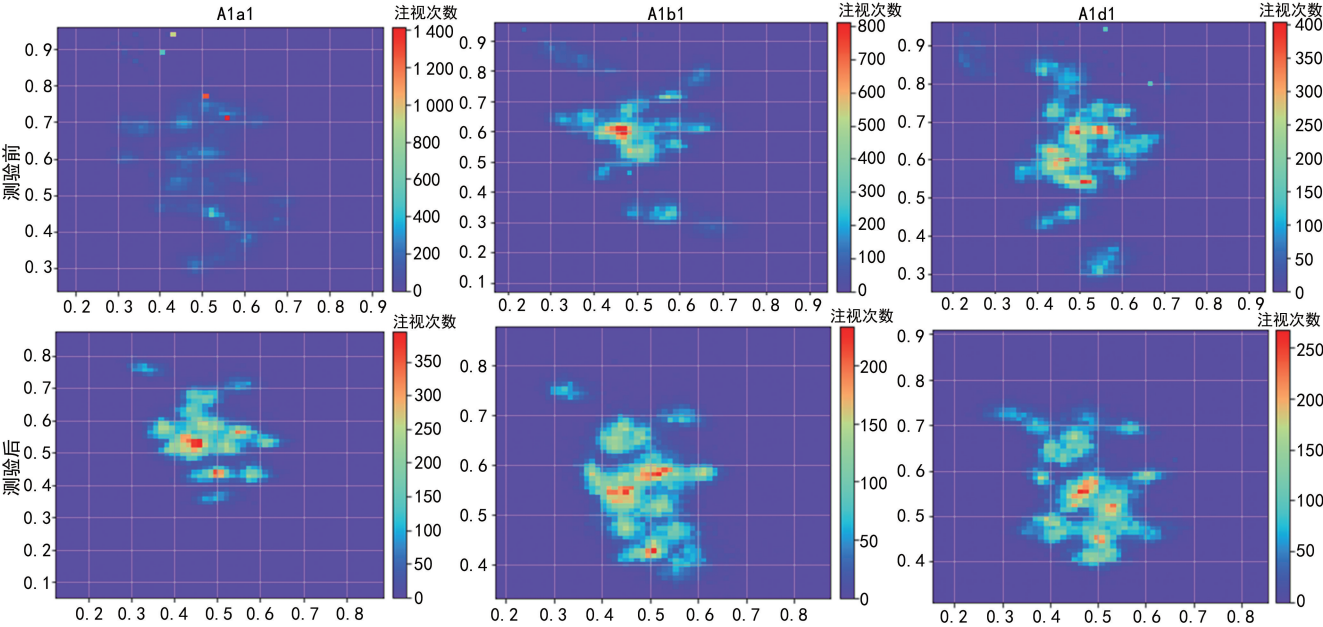
项目	B1a1				B1b1				B1d1			
	训练前	训练后	<i>t</i>	<i>P</i>	训练前	训练后	<i>t</i>	<i>P</i>	训练前	训练后	<i>t</i>	<i>P</i>
瞳孔直径	3.27±0.40	3.00±0.34	4.20	<0.01	3.29±0.41	3.00±0.30	4.74	<0.01	3.15±0.37	2.95±0.37	3.25	<0.01
LFnorm(nu)	39.90±15.77	46.24±16.65	1.58	0.13	44.97±17.86	41.43±20.67	0.76	0.45	42.14±17.11	40.23±14.85	0.53	0.60
HFnorm(nu)	51.93±15.86	46.88±14.53	1.33	0.19	48.61±16.54	51.77±19.40	0.71	0.48	49.34±14.88	51.73±12.81	0.71	0.48
LF/HF 比值	1.14(0.55,1.14)	1.28(0.55,1.32)	-0.47	0.64	1.11(0.47,1.21)	1.18(0.43,1.53)	-0.87	0.39	1.09(0.44,1.43)	1.01(0.50,1.58)	-0.11	0.91

2.3 驾车组任务训练前、后的热点图比较

A1a1 任务训练前被试者的瞳孔位置分布集中,

最高次数达 1 400 次,热点较少且范围较小;任务训练后被试者的瞳孔位置分布较广,最高次数不到 400 次,热点较多且范围较广。A1b1 任务训练前被试者的瞳孔位置分布较广,最高次数达 800 次,热点较少,范围较大;任务训练后被试者的瞳孔位置分布较广,

最高次数不到 250 次,热点较多且范围较广。A1d1 任务训练前被试者的瞳孔位置分布较广,最高次数达 400 次,热点较多,范围较小;任务训练后被试者的瞳孔位置分布较广,最高次数不到 300 次,热点较少且范围较小,见图 1。



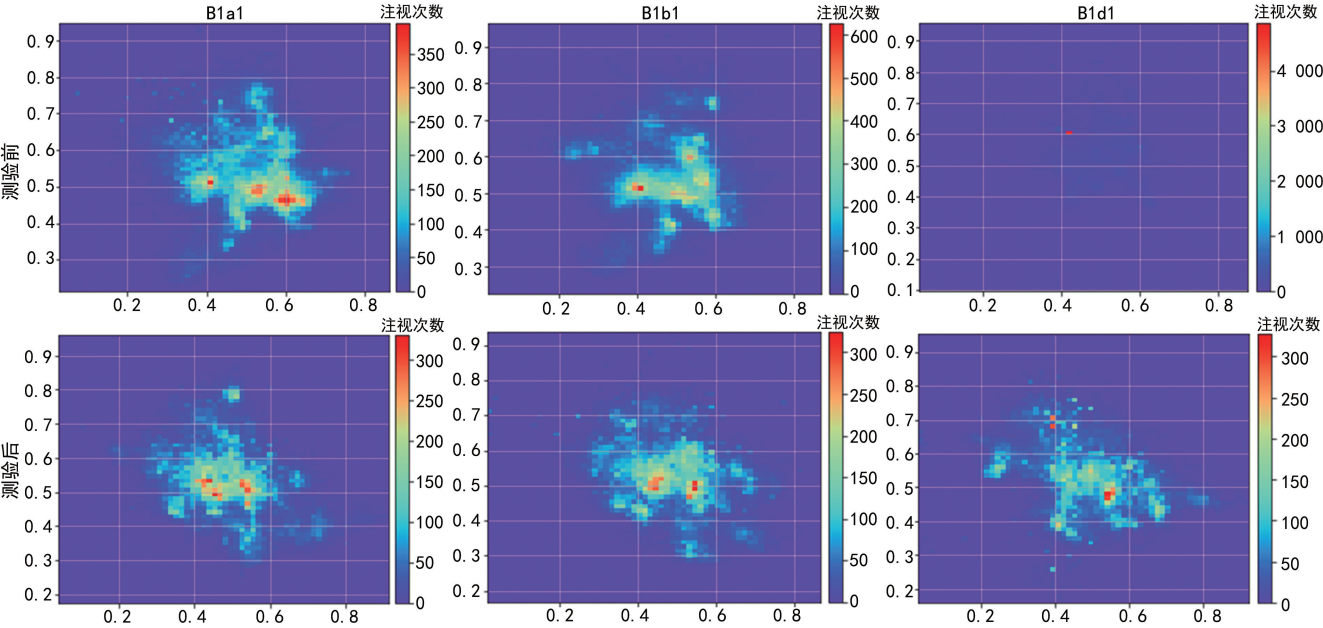
热点图的横坐标代表瞳孔位置左右变化,纵坐标代表瞳孔位置上下变化,瞳孔中心点位置坐标为(0.5,0.5)。

图 1 驾车组任务训练前、后的热点图

2.4 哨卡组任务训练前、后的热点图比较

B1a1 任务训练前被试者的瞳孔位置分布集中,最高次数不到 400 次,热点较多且范围较广;任务训练后被试者的瞳孔位置分布较广,最高次数不到 350 次,热点较多且范围较广。B1b1 任务训练前被试者的瞳孔位置分布较广,最高次数达 600 次,热点较少

且范围较小;任务训练后被试者的瞳孔位置分布较广,最高次数不到 350 次,热点较多且范围较广。B1d1 任务训练前被试者的瞳孔位置分布集中,最高次数达 4 000 次以上,热点较少且范围较小;任务训练后被试者的瞳孔位置分布较广,最高次数不到 350 次,热点较多且范围较广,见图 2。



热点图的横坐标代表瞳孔位置左右变化,纵坐标代表瞳孔位置上下变化,瞳孔中心点位置坐标为(0.5,0.5)。

图 2 哨卡组任务训练前、后的热点图

3 讨 论

根据以往研究可知,随着认知负荷的增加,LFnorm 和 LF/HF 比值也明显增加^[27-28],与工作记忆任务成绩呈正相关^[29]。但在本研究结果中,除 A1d1 任务训练前的 HFnorm 值明显大于任务训练后,其余任务训练前、后的 LFnorm, HFnorm 和 LF/HF 比值差异均无统计学意义($P>0.05$),表明在经过高认知负荷工作记忆训练后,被试者的认知负荷和工作记忆水平没有变化。这与一些研究结果不一致,如 CORRIGAN 等^[30]发现新兵在基础训练前期 HRV 升高,提示认知负荷升高,在训练后期 HRV 的降低表明认知负荷减少。以及 COLEMAN 等^[31]发现经过 VR 训练,儿童在现实学习场景中的工作记忆明显提高,注意力集中时间增加。这不一致的现象可能和被试者采集生理信号时的身体动态相关,HRV 频域信号和认知负荷之间的关系通常是被试者坐在电脑屏幕前时测量的,而 VR 训练过程中需要高度的身体运动,可能会影响测量到的 HRV 频域信号,如 HE 等^[32]发现 HR 相关生理数据在测量认知负荷水平上的准确率比眼动数据低 1%~15%,可能 HRV 并不适用在运动状态 VR 训练时测量被试者的认知负荷。在本研究中,被试者佩戴生物反馈仪的同时伴随身体运动来完成 VR 训练任务,可能导致的 HRV 信号记录误差或错误,这可能是本研究架车组和哨卡组任务训练前、后的 LFnorm, HFnorm 和 LF/HF 比值无差异的原因,有待关于生理信号指标的进一步研究。

从以往研究的眼动数据中发现完成简单任务时的注视时间、注视次数、瞳孔直径均明显小于复杂任务^[33],或是一些高工作记忆容量被试者在句子阅读任务中的总注视时间和首次注视时间均明显低于低工作记忆容量被试者^[34]。本研究中两组军人任务训练前的瞳孔直径均明显大于训练后,说明经过高认知负荷下工作记忆 VR 训练,在完成相同工作记忆任务时的认知负荷水平降低。其次,热力图用于判断被试者注视次数和注视分布情况,个体的注视点分布会随着认知负荷的增加变得更为集中^[25],且在相同任务中高工作记忆容量个体的注视次数均明显小于低工作记忆容量个体^[34]。本研究对任务训练前、后的瞳孔位置热点图进行分析发现,除 A1d1 和 B1a1 任务之外,其余任务在完成训练前任务时的瞳孔位置较训练后更为集中,说明被试者任务训练前的认知负荷大于训练后,且任务训练后较任务训练前注视次数降低,说明被试者工作记忆水平有增强。因此,本研究的眼动结果显示被试者军人经过高认知负荷下工作记忆 VR 训练后,其认知负荷水平降低,工作记忆能力增强,佐证了高认知负荷下工作记忆 VR 训练对提高认知负荷和工作记忆能力是有效的。这与一些研究结果相似,如 BINSCH 等^[35]发现警察被试者经过 VR 训练后工作记忆容量增加,在真实监视任务中的表现力和恢复力都得到提升,程晓彤等^[19]也发现相比于对照

组,VR 组经过训练后工作记忆容量、刷新和抑制功能有明显提高。尽管本研究观测指标不同于以往研究,但结果相同,都验证了 VR 训练技术用于增强工作记忆和提高认知负荷能力的有效性。

综上所述,本研究利用军人高认知负荷下工作记忆 VR 训练系统任务增强了军人工作记忆容量和认知负荷能力,为 VR 训练技术应用于军事认知心理训练提供了实证支持。本研究的局限在于:首先,可能受限于 HRV 生理信号采集过程的影响,HRV 信号任务训练前、后几乎无明显差异。其次,没有进行长期追踪,无法确定军人工作记忆能力的训练效果是否能长时间持续,以及高认知负荷下工作记忆 VR 训练效果是否能迁移到真实任务场景中。未来的研究中,应结合脑电图(EEG)或功能性磁共振成像(fMRI)等技术为工作记忆能力训练效果提供更全面的生理指标支持,同时考虑进行长期可追踪的研究,验证训练效果的持续时间和对真实任务完成情况的影响。同时,随着近几年人工智能、大数据和增强现实(AR)等技术的发展,期望能结合多种技术模式,进一步完善真实战场环境和任务模式,并为不同的训练个体提供个性化和高交互性的训练模块,如根据不同的认知目标,选择不同的训练任务,更加个性化地对认知能力、注意力或决策能力等进行训练。以此来达到高度化“人-机-环”交互,进而为实现军人认知增强提供更全面的训练方式。

参考文献

- [1] FLOOD A, KEEGAN R J. Cognitive resilience to psychological stress in military personnel [J]. *Front Psychol*, 2022, 13: 809003.
- [2] HRYNZOVSKIY A M, BIELAI S V, KERNICKIY A M, et al. Medical, social and psychological aspects of assisting the families of the military personnel of ukraine who performed combat tasks in extreme conditions [J]. *Wiad Lek*, 2022, 75(1 Pt 2): 310-317.
- [3] DAMIROVICH R M, SAYDALIYEVICH U S, NOSIRKHONZODA A N. Social-psychological bases of professional adaptability in future military servants [J]. *J Innovat Sci Educ Res*, 2022, 5(4): 462-465.
- [4] TAIT J L, AISBETT B, CORRIGAN S L, et al. Recovery of cognitive performance following multi-stressor military training [J]. *Hum Factors*, 2024, 66(2): 389-403.
- [5] VINE C A J, MYERS S D, COAKLEY S L, et al. Transferability of military-specific cognitive research to military training and operations [J]. *Front Psychol*, 2021, 12: 604803.

- [6] 冯正直,祖霞. 军人心理健康评价:理论与模型[J]. 第三军医大学学报,2015,37(22):2207-2212.
- [7] DURAN R,ZAVGORODNIAIA A,SORVA J. Cognitive load theory in computing education research:a review[J]. ACM Trans Comput Educ,2022,22(4):1-27.
- [8] BADDELEY A D. Is working memory still working? [J]. Am Psychol,2001,56(11):851-864.
- [9] CAI Y,YANG C,WANG S,et al. The neural mechanism underlying visual working memory training and its limited transfer effect[J]. J Cogn Neurosci,2022,34(11):2082-2099.
- [10] PARK E,YUN B J,MIN Y S,et al. Effects of a mixed reality-based cognitive training system compared to a conventional computer-assisted cognitive training system on mild cognitive impairment;a pilot study[J]. Cogn Behav Neurol,2019,32(3):172-178.
- [11] 唐元凯,沈兴华,郑兴锋,等. 虚拟现实技术在军事心理学研究中的应用[J]. 解放军预防医学杂志,2018,36(10):1358-1360.
- [12] PARSONS T D,RIZZO A A. Neuropsychological assessment of attentional processing using virtual reality[J]. Annu Rev Cyber Ther Telemed,2008,6(1):21-26.
- [13] PARSONS T D,REINEBOLD J L. Adaptive virtual environments for neuropsychological assessment in serious games[J]. IEEE Trans Consum Electron,2012,58(2):197-204.
- [14] 林青,刘巧云,陈东帆. 基于虚拟现实技术的自闭症儿童沉浸式社会适应干预系统构建[J]. 中国教育技术装备,2022,36(8):29-33.
- [15] 李海红. 虚拟现实技术在脑外伤恢复期患者中的应用效果[J]. 医疗装备,2022,35(6):37-39.
- [16] 曹永生,李哲,王国胜,等. 虚拟现实技术对脑卒中偏瘫患者平衡稳定性的影响[J]. 中国康复医学杂志,2023,38(5):631-637.
- [17] 龚燕,刘新宇,舒玲玲,等. 基于虚拟现实技术的儿童空间认知能力试验研究[J]. 心理学进展,2020,10(11):1719-1727.
- [18] 谢兴,农青芳,农冬晖,等. 沉浸式虚拟现实技术在老年痴呆患者认知训练中的应用[J]. 广西医学,2020,42(20):2717-2720.
- [19] 程晓彤,王佳,徐慧敏,等. 基于虚拟现实技术的陆军军人工作记忆训练系统的可行性及有效性研究[J]. 第三军医大学学报,2020,42(13):1259-1265.
- [20] HAO T,ZHENG X,WANG H,et al. Linear and nonlinear analyses of heart rate variability signals under mental load[J]. Biomedical Signal Process Control,2022,77:103758.
- [21] BIONDI F N,SABERI B,GRAF F,et al. Distracted worker: using pupil size and blink rate to detect cognitive load during manufacturing tasks[J]. Appl Ergon,2023,106:103867.
- [22] THAYER J F,HANSEN A L,SAUS-ROSE E,et al. Heart rate variability,prefrontal neural function, and cognitive performance:the neurovisceral integration perspective on self-regulation, adaptation, and health[J]. Ann Behav Med,2009,37(2):141-153.
- [23] AYRES P,LEE J Y,PAAS F,et al. The validity of physiological measures to identify differences in intrinsic cognitive load[J]. Front Psychol,2021,12:702538.
- [24] CHAO Y P,CHUAG H H,HSIN L J,et al. Using a 360° virtual reality or 2D video to learn history taking and physical examination skills for undergraduate medical students:pilot randomized controlled trial [J]. JMIR Serious Games,2021,9(4):e13124.
- [25] LIU J C,LI K A,YEH S L,et al. Assessing perceptual load and cognitive load by fixation-related information of eye movements[J]. Sensors (Basel),2022,22(3):1187.
- [26] 葛燕,陈亚楠,刘艳芳,等. 电生理测量在用户体验中的应用[J]. 心理科学进展,2014,22(6):959-967.
- [27] LIN T,IMAMIYA A,MAO X. Using multiple data sources to get closer insights into user cost and task performance [J]. Interact Comput,2008,20(3):364-374.
- [28] 黄杨森,程耀萍,王艳微,等. 应用 NASA-TLX 量表与心率变异性指标评价女飞行学员脑力负荷的研究[J]. 中华航空航天医学杂志,2018,29(1):14-21.
- [29] LABORDE S,FURLEY P,SCHEMPP C. The relationship between working memory, reinvestment, and heart rate variability[J]. Physiol Behav,2015,139:430-436.
- [30] CORRIGAN S L,BULMER S,ROBERTS S S H,et al. Monitoring responses to basic military training with heart rate variability[J]. Med Sci Sports Exerc,2022,54(9):1506-1514.
- [31] COLEMAN B,MARION S,RIZZO A,et al. Virtual reality assessment of classroom - related attention: an ecologically relevant approach to evaluating the effectiveness of working memory training[J]. Front Psychol,2019,10:1851.

1479.

[12] 中华医学会心电生理和起搏分会,中国医师协会心律学专业委员会,中国房颤中心联盟心房颤动防治专家工作委员会. 心房颤动:目前的认识和治疗建议(2021)[J]. 中华心律失常学杂志, 2022,26(1):15-88.

[13] FU Y,LI K,GAO Y,et al. A novel risk score for predicting left atrial and left atrial appendage thrombogenic milieu in patients with non-valvular atrial fibrillation [J]. Thromb Res, 2020,192:161-166.

[14] XING L Y,DIEDERICHSEN S Z,HØJBERG S,et al. Electrocardiographic morphology-voltage-P-wave-duration (MVP) score to select patients for continuous atrial fibrillation screening to prevent stroke[J]. Am J Cardiol,2023, 205:457-464.

[15] SIEVERING E M,GROSSHENNIG A,KOTTAS M,et al. Diagnostic value of carotid intima-media thickness and clinical risk scores in determining etiology of ischemic stroke[J]. Eur Stroke J,2023,8(3):738-746.

[16] 董皓宇,杨乙珩,夏云龙. 心房颤动的抗凝治疗:CHA₂DS₂-VASc 评分之外[J]. 心血管病学进展,2022,43(5):403-406.

[17] VANASSCHE T,LAUW M N,EIKELBOOM J W,et al. Risk of ischaemic stroke according to pattern of atrial fibrillation; analysis of 6 563 aspirin-treated patients in ACTIVE-A and AVERROES[J]. Eur Heart J, 2015, 36 (5): 281.

[18] KAPLON-CIESLICKA A,BUDNIK M,GAWALKO M,et al. Atrial fibrillation type and re-

nal dysfunction as important predictors of left atrial thrombus[J]. Heart,2019,105(17):1310-1315.

[19] LI D,SHINAGAWA K,PANG L,et al. Effects of angiotensin-converting enzyme inhibition on the development of the atrial fibrillation substrate in dogs with ventricular tachypacing-induced congestive heart failure[J]. Circulation, 2001,104(21):2608-2614.

[20] FERGUSON C,LOWRES N,FREEDMAN B. Stroke risk in adults with atrial fibrillation according to sex[J]. Heart Lung Circ, 2021, 30 (7):937-938.

[21] PANCHOLY S B,SHARMA P S,PANCHOLY D S,et al. Meta-analysis of gender differences in residual stroke risk and major bleeding in patients with nonvalvular atrial fibrillation treated with oral anticoagulants[J]. Am J Cardiol,2014,113(3):485-490.

[22] COHOON K P,MAZUR M,MCBANE R D,et al. The impact of gender and left atrial blood stasis on adiponectin levels in non-valvular atrial fibrillation[J]. Int J Cardiol,2015,181:207-212.

[23] BLESSBERGER H,MUELLER P,MAKIMOTO H,et al. Association of adipocytokines serum levels with left atrial thrombus formation in atrial fibrillation patients on oral anticoagulation (Alert): a cross-sectional study[J]. Nutr Metab Cardiovasc Dis,2021,31(3):860-868.

(收稿日期:2023-10-23 修回日期:2024-02-01)
(编辑:张芃捷)

(上接第 984 页)

[32] HE D,WANG Z,KHALIL E B,et al. Classification of driver cognitive load: exploring the benefits of fusing eye-tracking and physiological measures[J]. Transp Res Rec, 2022, 2676 (10):670-681.

[33] 官群,李一菲,李新国. 英语二语阅读过程中词汇与文本整合的眼动研究[J]. 解放军外国语学院学报,2021,44(1):19-26,159.

[34] 王月旻,崔刚. 工作记忆容量对英语阅读宏观结构建构的影响[J]. 外语教学与研究,2022,54

(2):239-251,320.

[35] BINSCH O,OUDEJANS N,VAN DER KUIL M N A,et al. The effect of virtual reality simulation on police officers' performance and recovery from a real-life surveillance task[J]. Multimed Tools Appl, 2023, 82 (11): 17471-17492.

(收稿日期:2023-10-27 修回日期:2024-01-28)
(编辑:姚 雪)