

慢性高原低氧对人体认知功能的影响

孟颖¹, 范豪杰², 成祥², 朱玲玲², 王笃明^{1*}, 赵永岐^{1,2*}

¹浙江理工大学理学院, 浙江 杭州

²军事科学院军事医学研究院军事认知与脑科学研究所, 北京

收稿日期: 2023年6月23日; 录用日期: 2023年8月14日; 发布日期: 2023年8月25日

摘要

目的: 探索慢性3700米高原低氧暴露对人体认知功能的影响。方法: 采用被试间实验设计, 对慢性高原暴露2个月以上的工人与从未有过高原经历的平原工人的认知表现进行对比研究, 共使用5项认知测试测量了3种认知功能, 包括记忆、注意和执行功能。结果: 高原组的短时记忆和抑制控制能力的反应时延长, 工作记忆、选择性注意和注意集中的准确性下降, 并且注意和执行功能的认知绩效表现也出现显著降低。结论: 慢性高原低氧暴露对认人体认知功能的记忆、注意和执行功能均造成了部分损害。

关键词

高原, 慢性低氧, 认知功能, 工人

Effects of Chronic High Altitude Hypoxia on Human Cognitive Function

Ying Meng¹, Haojie Fan², Xiang Cheng², Lingling Zhu², Duming Wang^{1*}, Yongqi Zhao^{1,2*}

¹School of Science, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

²Institute of Military Medical Sciences, Institute of Military Cognition and Brain Science, Beijing

Received: Jun. 23rd, 2023; accepted: Aug. 14th, 2023; published: Aug. 25th, 2023

Abstract

Objective: To explore the effects of chronic 3700 m hypoxia exposure on human cognitive function. **Methods:** A comparative study was conducted using a between-subjects experimental design to examine the cognitive performance of workers with chronic plateau exposure for more than 2 months versus plain workers who had never experienced a plateau, using a total of 5 cognitive

*通讯作者。

tests measuring 3 cognitive functions, including memory, attention, and executive function. Results: The plateau group had prolonged reaction times for short-term memory and inhibitory control, decreased accuracy of working memory, selective attention, and attentional focus, and showed significantly lower cognitive performance in attention and executive functions. Conclusion: Chronic high altitudes hypoxia exposure partially impairs memory, attention, and executive functions in humans.

Keywords

High Altitudes, Chronic Hypoxia, Cognitive Function, Workers

Copyright © 2023 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

高海拔地区独特的低压低氧环境对人体的认知功能会产生一定影响,当人体暴露在低氧中,机体会通过增加缺氧通气反应、补偿性血管舒张维持脑血流量,同时增加脑灌注、提高心率和血压、增加红细胞刺激血细胞比容提高动脉携氧能力,促进肺泡和动脉气体交换等多种补偿方式来应对缺氧,以此维持内环境稳定(Kong et al., 2011)。但当暴露的海拔过高或暴露时间过快、过长时,机体自身的调节不足以补偿发生的损害时,会出现一系列的认知损害,进而影响到进驻高原人群的日常生活、工作效率和安全。

高原低氧环境对认知功能影响的严重程度与海拔高度和低氧暴露方式有关。主流观点认为各项认知能力受高原环境的影响程度基本呈“高度依赖”趋势,即海拔越高认知功能受损越严重,而且不同认知功能的变化趋势不同。极端高海拔暴露(6000米以上)所造成的认知损害在动物实验、低氧模拟舱以及实地探险活动中均已得到验证(Willmann 等, 2010; Chen 等, 2012)。而人类活动较多的中等高海拔区域(8000~14,000 ft, 即 2438~4572 米)对认知功能所造成的影响结果不一(郭文昀, 2016)。Wang 等(2013)和 de Aquino Lemos 等(2012)研究结果显示急性暴露 4000 米海拔时出现情绪、运动、知觉、记忆操作能力的受损,且返回平原后有持续。而有研究认为中等缺氧程度对神经行为并无明显损害(Zhang 等, 2011),甚至有研究得出相反结论(Schlaepfer 等, 1992)。根据低氧暴露的时间长短可以分为慢性低氧暴露和急性低氧暴露。急性暴露通常是指持续低氧暴露数小时、数天或数周,而慢性暴露通常是指暴露于高海拔环境中的“长期”(Virués-Ortega et al., 2004),包括世居高原低氧环境的常住人群和由平原迁往高原生活几个月至数年的移居人群。目前,有关高原与认知的研究主要集中在急性高原低氧暴露的情境,急性低氧导致认知受损的海拔常在 3000 米以上,以注意、记忆和执行能力减退为主,并且暴露时间越长,认知损害越严重、范围越广(吉维忠, 吴世政, 2019)。慢性低氧暴露造成的认知损害主要以注意力下降、反应时延迟、执行力和工作记忆受损为主(汪斌如等, 2015)。Tulek 等(2013)发现长期缺氧患者的冲突控制功能减弱,且长期暴露于高海拔群体的用于抵抗冲突控制的注意力资源减少(Ma et al., 2015c)。因此,记忆力、注意力和执行功能等基础认知功能方面的认知表现受损已得到广泛验证。

由于高原环境复杂、条件限制,既往研究多采用低氧模拟舱或头戴式氧呼吸面罩来模拟急性低氧环境的方式,针对慢性长期低氧暴露的高原实地研究较少,且模拟实验的结果与真实世界存在一定差异。我国高原领土广阔,上千万人口在高原地区生活和工作,随着一带一路政策的深入推进,加入西藏乃至整个青藏高原建设的平原人数量逐年上涨,这些久居平原常氧环境中的人群由于工作特性,往往需要在

高原低氧环境中生活和工作较长时间。大脑需要认知功能的参与来完成不同难度的任务，认知在日常生活和工作中发挥了至关重要的作用，因此，随着移居高原而来的慢性低氧对认知方面带来的影响及适应问题也值得我们进行关注。

针对以上问题，本研究以慢性低氧为出发点，针对高原 3700 米的铁路工人群体开展了慢性低氧暴露对人体认知功能影响的调查，使用 5 项认知测试分别测量了工人的记忆、注意和执行功能，通过与平原常氧对照组的比较来了解慢性低氧对认知带来的影响，可为高原建设保障相关部门提供实证研究的支持，丰富高原相关领域的研究内容，为高原移居人群的大脑健康问题和预防操作失误提供方向。

2. 研究方法

2.1. 被试

共招募工人志愿者 61 名，分为高原实验组和平原对照组。实验组为我国西藏自治区贡觉县内某铁路施工现场(约 3700 米左右的海拔高度) 33 名铁路工人，参与实验的工人皆至少连续高原暴露 2 个月以上(其中约 8%暴露时长为 2 个月，46%暴露时长为 3~6 个月，46%暴露时长为 7 个月及以上)；对照组为北京市某建筑公司招募了 30 名常居平原地区且从未有过高原经历的建筑工人。对两组参与者分别进行认知测试。

其中所有工人皆为男性、惯用手为右手、视力或矫正视力正常且无弱视斜视等视力问题、未参加过类似实验，无精神疾病史(例如抑郁症、精神病等)，且自愿参加本次研究。由于已有研究发现，年龄以及受教育年限可以在一定程度上影响认知功能(姚静等, 2004)，因此为了排除以上变量的影响，本研究对被试的年龄和学历水平进行了调查，在后期数据处理时将上述变量进行了统计检验，结果证实两组被试在年龄和学历上无显著差异(见表 2)，可用于分析单纯低氧变量的实验效应。

2.2. 实验设计

采用单因素 2 水平的被试间实验设计，自变量为海拔高度(平原/高原 3700 米)，因变量为各项认知测试成绩，包括平均反应时、正确率和认知绩效。

2.3. 认知测试

共 5 个测试项目，考察了人体的记忆、注意和执行功能 3 种认知能力，具体测试项目及其对应的测量内容如表 1。该系统为一种计算机化的认知测评工具，通过网页呈现。实验均采用同一型号的笔记本触屏电脑(联想 ThinkPad S2 Gen 6)，实验时根据指导语提示使用键盘或触屏操作。

Table 1. Cognitive function measurement paradigms

表 1. 认知功能测量范式详情表

认知功能	测试项目	参考范式	测量内容
记忆	匹配记忆	2-back 任务	工作记忆
	顺序回忆	柯西组块测试	短时记忆、工作记忆
注意	数字划消	划消测验	注意指向、选择性注意
	空间注意	空间线索化任务	注意集中/脱离
执行功能	灵敏度测试	停止信号任务	抑制控制

1) 匹配记忆

源于 N-back 任务，back 即“后面，往后”，n-back 即往回 n 个。该任务需维持少量信息并操作信息，且工作记忆负荷恒定。在任务中，电脑屏幕将按顺序单独呈现一系列数字，被试需要把当前看到的数字

与前 2 个数字(上上个数字)进行比较,判断当前的数字与之前出现过的数字是否一致,一致时在键盘上按下“M”键,不一致则按“C”键。该任务分为两组练习和一组正式测试,练习 20 次判断,正式测试需进行 100 次判断,练习正确率需达到 65%方可进入正式测试,该任务总时长约为 7 分钟,记录被试每次按键的反应时和正确率。

2) 顺序回忆

本测试任务基于柯西组块测试(Corsi block test)的任务设计对其进行了改编,全程使用触摸屏操作:电脑屏幕将在任意位置呈现 6~8 个圆点,圆点上标有随机的个位或两位数字,任务要求被试在规定时间内按数字从小到大的顺序记住这些圆点的位置,随后圆点上的数字消失,被试需要按照记忆中的顺序(数字大小)对材料进行回忆复现,即按从小到大的顺序再次点击屏幕上的圆点。本测试按容易程度从易到难共三组练习和三组正式测试,练习时每组 2 题,正式测试每组 4 题,记录被试的反应时和正确率。

3) 数字划消

源于划消测验,用于测量个体搜索某个刺激(即目标刺激,本文为“9”)同时忽略其他刺激(即干扰刺激)的能力。任务中,电脑屏幕呈现一系列矩阵排列的随机数字,被试需要在 30 秒内,找到并划去(手指点击屏幕)带有两条短线(\)的数字“9”,但是当“9”的前面有数字“5”,则这个“9”则不在划去范围内。任务要求被试全程使用惯用手在电脑触屏操作。本测试共 4 题,每道题限时 30 秒,被试需要在规定时间内尽量划去所有目标数字,若未在规定时间内完成,系统将在 30 秒结束后自动翻页。因测试时间恒定,故该测试记录被试的正确率。

4) 空间注意

源于空间线索化范式,又称线索-靶子范式,在本任务中,屏幕中央首先呈现注视点“+”,随后,左右视野同时呈现带有刺激的方框。被试需要快速找到并判断左边或者右边方框中出现的线条朝向,当出现“/”时,按“F”键,当出现“\”时,按“J”键。任务时,空白屏幕中央会出现箭头提示,即提示目标线条将要出现在左侧或是右侧的方框中,需要注意的是,箭头提示的正确率仅为 75%。线索消失后,在左右任一方框内随机呈现靶子(线条)。本测试共一组练习和两组正式测试,练习需要进行 32 次判断,正式测试需进行 256 次判断,每两分钟将有一次自由休息时间。记录被试每次按键的反应时和正确率。

5) 灵敏度测试

源于信号停止任务(Stop Signal Task, SST),为测量反应抑制控制最常用的范式之一,该任务在本质上是一种测量规则使用的能力的任务。屏幕中央将随机出现刺激“X”或“O”,当出现“X”时,按键盘上的“F”键进行反应,出现“O”时,按“J”键进行反应,但当看见刺激(X 或 O)上方出现一个红色方框时,则不做任何反应。本测试共一组练习和三组正式测试,其中练习需进行 10 次判断,正式测试需进行 120 判断,(每组 40 次,共 3 组),完成每组测试后可自由休息,记录每次按键的反应时和正确率。

同时,考虑到认知过程中的速度与准确率权衡现象,通过对反应时和正确率加权得到任务指标来反应认知绩效指标(performance index, PI),以评估综合速度和准确率的总体性能。本研究根据相关文献对反应时和正确率赋予相等权重(Lan 等, 2014),均为 0.5,计算公式为:

$$PI = \left[AR^{0.5} / (1/RT)^{0.5} \right]^2$$

2.4. 统计方法

所有数据使用 SPSS17.0 统计软件进行分析,计量资料中服从正态分布或近似正态分布的数据用平均数 ± 标准差($X \pm SD$)表示,计数资料采用例数表示;组间比较,计数资料比较采用 χ^2 检验,计量资料用 T 检验。

3. 结果

3.1. 一般资料情况

经过筛选并剔除无效数据,本研究共纳入有效研究对象 50 例。两组间被试的年龄和学历均无明显差异,可用于分析单纯低氧效应。 $(p > 0.05)$ 见表 2。

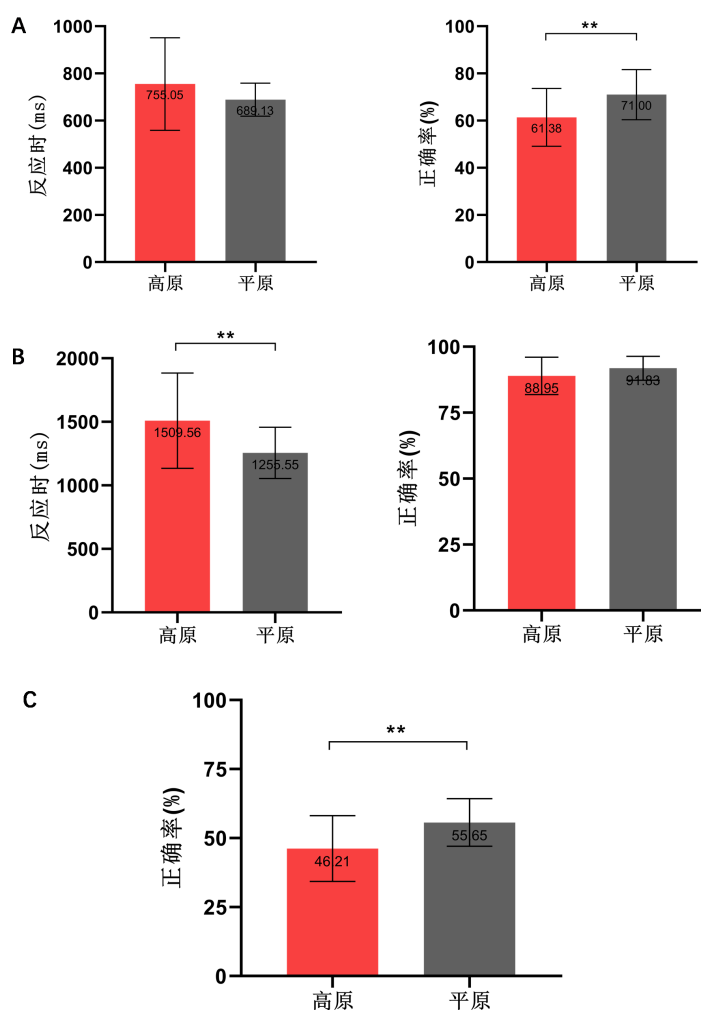
Table 2. Comparison of differences in age and education between groups

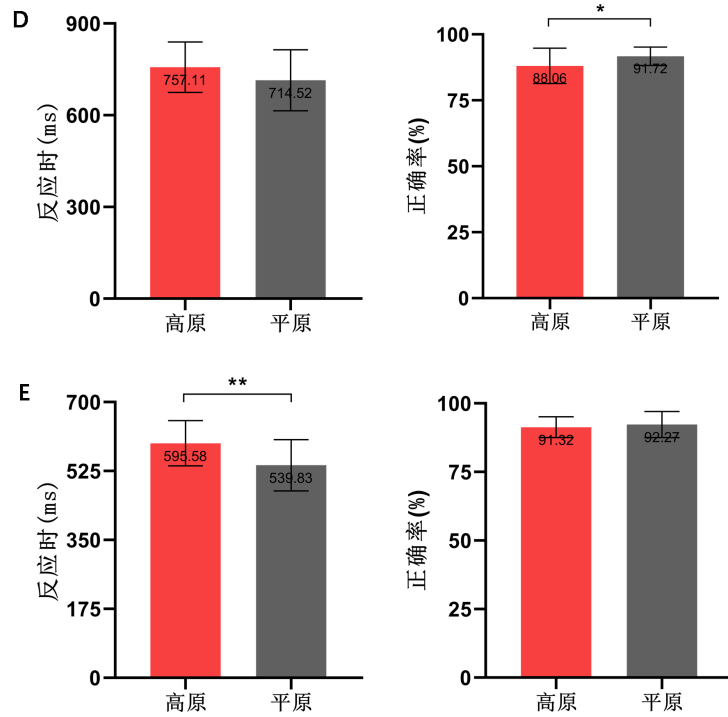
表 2. 两组间年龄和学历的差异比较

基本资料	高原组(N=26)	平原组(N=24)	χ^2/t	<i>p</i>
年龄	36.81 ± 8.94	37.92 ± 8.48	-0.449	0.655
学历				
初中	15	13		
高中	1	3	1.287	0.525
专科	10	8		

3.2. 慢性低氧暴露后各项认知测试成绩的变化

使用 t 检验对两组被试的各项认知测试结果和绩效进行差异检验,结果如图 1 和图 2。

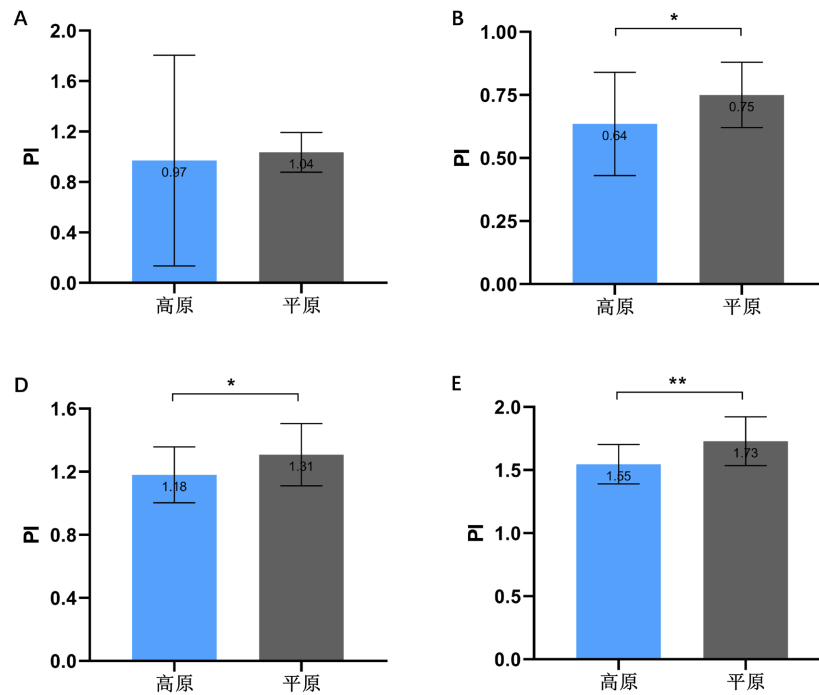




(A: 匹配记忆; B: 顺序回忆; C: 数字划消; D: 空间注意; E: 灵敏度测试; *表示 $p < 0.05$, **表示 $p < 0.01$)

Figure 1. Comparison of Differences in reaction time and accuracy between groups for five tests

图 1. 五项测试两组间反应时和正确率差异对比图



(A: 匹配记忆; B: 顺序回忆; D: 空间注意; E: 灵敏度测试; *表示 $p < 0.05$, **表示 $p < 0.01$)

Figure 2. Comparison of Differences in performance index between groups for five tests

图 2. 五项测试两组间绩效差异对比图

记忆指标显示,与平原对照组相比,慢性暴露 3700 米的高原组的匹配记忆任务反应时较平原组有延长趋势,但两组之间无显著差异, $p > 0.05$;高原组的正确率显著低于平原组, $p < 0.05$,说明匹配记忆任务的正确率受到损害;高原组的绩效相比平原组有降低趋势,但两组之间无显著差异, $p > 0.05$,说明匹配记忆任务的绩效变化不大。顺序回忆任务高原组平均反应时显著高于平原组, $p < 0.05$;正确率相比平原组有降低趋势,但两组间无显著差异, $p > 0.05$,说明顺序回忆任务反应时受到损害;高原组的绩效显著低于平原组, $p < 0.05$,说明顺序回忆任务绩效受到损害。具体结果见图 1 及图 2。

注意指标显示,与平原对照组相比,慢性暴露 3700 米的高原组的数字划消正确率显著低于平原组, $p < 0.05$,说明数字划消正确率明显受损。空间注意任务反应时中高原组相比平原组有延长趋势,但两组间无显著差异, $p > 0.05$;高原组的正确率显著低于平原组, $p < 0.05$,说明空间注意任务正确率受到损害;高原组的绩效显著低于平原组, $p < 0.05$,说明空间注意任务绩效受到明显损害。具体结果见图 1 及图 2。

执行功能指标显示,与平原对照组相比,慢性暴露 3700 米的高原组的灵敏度测试平均反应时显著慢于平原组, $p < 0.05$;两组间的正确率无明显差异, $p > 0.05$,说明灵敏度测试的反应时明显受损;高原组的绩效显著低于平原组, $p < 0.05$,说明灵敏度测试的绩效受到损害。具体结果见图 1 及图 2。

4. 讨论

目前,大量研究表明高原低氧环境对个体认知功能的影响是显著而持久的,但国际上对于慢性高原低氧暴露对认知影响的研究结果尚未达成共识,因此有必要进行针对性的高原实地研究,探究慢性中等程度低氧对人体认知功能的影响。本研究使用 5 项认知测试,包括匹配记忆(工作记忆)、顺序回忆(短时记忆)、数字划消(选择性注意)、空间注意(注意集中)和灵敏度测试(抑制控制),对长期工作于高原的工人的认知水平展开了调查,可对记忆力、注意力和执行功能三个方面进行认知评估。结果发现,慢性高原暴露后人体的记忆、注意和执行功能各项指标均出现了不同程度的改变。

测量记忆能力的两项测试结果显示,高原组匹配记忆任务的正确率显著下降,顺序回忆任务的反应时显著延长、绩效表现不如平原组,即工作记忆准确度降低、短时记忆反应时延长且认知表现变差,说明慢性中等海拔的高原暴露对人体的工作记忆和短时记忆造成了部分损害。Chen 等比较了移居高原人群静息态脑功能的变化,fMRI 局部一致性(ReHo)分析显示该人群的右下侧感觉运动皮层 ReHo 显著升高,双侧视觉皮质信号显著增强且与被试的血红蛋白浓度显著相关,说明慢性低氧暴露对脑自发性神经活动同步性与连接度造成了影响(Chen 等, 2016),暗示了人体暴露在慢性低氧环境中认知功能改变的脑功能基础。一项对长期高海拔居住的高原移居人群的研究发现,移居高原后额下中回、枕中回、丘脑等部位活动减少,语言工作记忆相关反应强度较平原人群相比显著降低(Yan 等, 2011a)。上述研究提示了慢性低氧环境可能使工作记忆相关脑区功能发生改变,这可能是本研究中工作记忆准确度降低的生理基础。近年,一项使用 N-back 任务的行为研究同样发现,与平原对照组相比,长期低氧的高原迁移组在 2-back 任务中的准确性较低,并且反应时延长(Ma 等, 2020)。本研究中工作记忆反应时无明显差异的原因可能是本研究仅控制了工人的学历水平,而被试的具体工作内容和职能没有进行划分,导致了结果中平均反应时的标准差偏大,个体差异较大,有研究显示个体的工作性质也会对认知造成影响(吴兴裕等, 1999),这可能也导致了单纯低氧效应的混杂。Hogan 等(2010)研究了久居 500 米、2500 米和 3700 米海拔当地居民的认知功能,使用韦氏智力测验中的数字跨度测试短时记忆,符号搜索和编码任务测量处理速度,结果并未发现短时记忆成绩在不同海拔上的差异,但处理速度在 3700 米时有显著降低。虽然采用的测量方法不同,但本研究中高原组与平原组短时记忆准确度无显著差异的结果与 Hogan 大致相同,而任务反应时的延长暗示了处理速度的降低。

测量注意能力的两项测试结果显示,高原组数字划消测验和空间注意任务的正确率显著低于平原组,

且在这两项测试上的绩效表现也明显低于平原组,说明了慢性中等海拔的高原暴露对人体的选择性注意和集中性注意造成了部分损害。该结果与前人研究大致相同,一项 fMRI 的研究发现,双侧前额叶和右侧扣带回等与注意力相关脑区的灰质减少可能是生活在高海拔地区汉族人注意受损的神经基础(Yan 等, 2011b)。在视觉搜索任务中, N2pc (N2-posterior-contralateral)是一种有效的电生理指标,主要负责将视觉注意力分配给目标, Zhang 等(2018)发现高原移居组的 N2pc 分量的振幅小于平原对照组; N2cc (N2-central-contralateral)反映了注意方向和相应选择之间串联的阻碍,高原移居组的 N2cc 分量的振幅大于平原对照组,揭示了长期低氧对注意的资源分配造成了影响,这可能是本研究中选择性注意和集中性注意表现下降内在机制。长期高原暴露(3年)会延长移居高原人群的视觉空间注意反应时间(Zhang 等, 2018; Wang 等, 2014),并且注意网络测试(ANT)中的警觉性和执行控制能力下降(马海林等, 2017)。而本研究结果显示慢性中等海拔暴露 2 个月以上的空间注意反应时间与对照组相比无明显差异,这可能是由于上述研究中高原暴露的持续时间更长,即暴露时长的差异,例如保宏翔等(2015)的行为研究发现,15 个月长期高海拔暴露比 3 个月高海拔暴露对注意广度的损害更严重。以上结果表明,长期低氧不仅降低了对目标的注意资源分配功能,而且降低了对目标选择和反应准备的功能,并且随着暴露时间延长,受损程度加重。

测量执行功能的灵敏度测试结果显示,高原组的反应时相比平原组显著延长,且绩效表现也明显低于平原组,但正确率在两组间无显著差异,说明了慢性中等程度海拔高原暴露对人体的执行功能造成了部分损害。本研究主要测量了执行功能中的抑制控制能力,指抑制不符合当前需求的不当行为的能力,其对于人们根据环境变化做出灵活反应和目标导向的行为至关重要(Logan 和 Cowan, 1984)。本次实验结果与前人研究大致相同。有学者通过 ERP 技术研究了长期在高海拔居住两年以上的大学生抑制和控制能力,发现高原组的 P3 (冲突解决的指标)振幅在处理冲突任务时更小,说明高原移居者在处理相同难度的任务时需要投入更多的认知资源来控制冲突(Ma 等, 2015c)。在 Go/No-Go 任务中,高原移居组 NoGo-N2 (体现了反应抑制早期处理阶段的冲突监控过程)的潜伏期延长, P3 幅值较小,即在冲突监控阶段,高原长期居住会影响了个体的反应抑制,从而影响冲突处理速度(Ma 等, 2015a, 2015b)。此种负面影响在本研究中表现为高原组的抑制控制的反应时延长、绩效降低。然而,上述各项研究均未发现长期高原暴露对行为层面反应抑制准确性的影响,研究者认为可能是由于采取的实验范式和任务难度设定过于简单,例如在本研究中两组被试的正确率普遍偏高,未来可使用相对复杂的抑制任务或提高任务难度来揭示慢性低氧暴露对行为层面更深入的影响。

5. 局限与展望

高原现场调查的机会来之不易,虽然事先进行了详细的工作安排和计划,但鉴于高原环境的恶劣,工地现场研究的复杂,本研究仍存在诸多局限。

在实验对象上,本研究的两组被试虽然均属于学历不高的从事体力劳动的工人群体,但由于现场情境限制,对被试具体的工作内容、职能没有进行区分,铁路工人和建筑工人的工作性质并不完全相同,其面临的不同工作场景和需要进行的精细操作对不同认知功能的需求也存在差异;本研究将慢性低氧笼统概括为高原暴露 2 个月以上,而实际招募的被试中各自低氧暴露时长也各有不同,个别被试在高原工作的时间甚至可达十余年,以上均可能导致个体差异过大从而混杂了单纯低氧效应。并且,仅收集了年龄和学历的资料,所有被试均为男性,人口学资料较为单一,在实验结果的推广性和普适性方面存疑。未来有待进一步精细划分研究群体,扩大样本量,充分考虑各岗位的工作内容和工作时长等因素,提高测量的针对性,增强被试的同质性。

在研究方法上,仅通过认知测试评测量了行为层面的认知表现,并未衡量个体生理方面和大脑内部

信号的改变, 缺乏更为直观的证据, 因此对于机制的分析、脑信号预测标志物等的研究受限, 期望在未来结合更多生理指标, 以更明确认知与生理适应之间的关系。并且, 本研究与当前关于慢性高原暴露的大多研究一样, 采用了横断面研究的方法, 缺乏纵向的追踪报道。未来可考虑进行纵向追踪研究, 更系统、透彻地了解慢性高原低氧环境作用的连续过程以及量变质变的规律, 进一步确定因果关系。

在研究内容上, 本次测量主要集中在记忆、注意等个体的基本认知功能上, 对于语言、思维、推理等高级认知功能的探讨有所欠缺。有研究显示急性低氧暴露对思维和语言存在负面影响, 主要表现为思维缓慢和语言流畅度受损(Yang et al., 2003; Lieberman et al., 1995)。而人体在长期慢性高原低氧环境中高级认知功能的表现是否与急性低氧环境类似、或是否会因暴露时间更长对机体造成的功能损害更严重目前尚不清楚, 有待在未来研究中予以关注。

6. 结论

结果提示, 慢性中等海拔高原暴露后人体的各项认知功能会受到不同层面的影响, 具体表现为: 短时记忆和抑制控制能力的反应时延长, 工作记忆、选择性注意和注意集中的准确性下降, 并且注意和执行功能的认知绩效表现也出现显著降低, 表明了慢性高原低氧暴露对认知功能的记忆、注意和执行功能均造成了部分损害。相信随着认知神经科学的发展, 未来高原低氧环境与认知受损的关系和相关机制将得到更深层次的阐明。

参考文献

- 保宏翔, 陈竺, 王东勇(2015). 海拔 3700 m 驻防 3 个月和 15 个月的男性新兵认知功能对比研究. *第二军医大学学报*, 36(4), 455-458.
- 郭文昀(2016). *急性中等海拔高原暴露对认知能力影响的研究*. 博士学位论文, 重庆: 第三军医大学.
- 吉维忠, 吴世政(2019). 高原低氧环境诱导认知功能损害研究现状. *中国高原医学与生物学杂志*, 40(3), 189-193.
- 马海林, 张新娟, 杨振涛(2017). 长期高海拔暴露对移居者和世居者注意网络的影响. *中国高原医学与生物学杂志*, 38(4), 267-272.
- 汪斌如, 徐先荣, 梁耕田, 张莹莹, 刘莉, 张涓(2015). 中重度 OSAHS 患者海马及脑皮质代谢紊乱与认知功能障碍的相关性研究. *临床耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 29(7), 607-611.
- 吴兴裕, 李学义, 王家同, 周悦, 韩历萍, 吴燕红(1999). 《基本认知能力要素测试系统》的编制与信度、效度分析. *第四军医大学学报*, 20(9), 835-837.
- 姚静, 孙学礼, 王洪明(2004). 正常成人认知功能与年龄、性别、受教育程度的关系. *中国临床心理学*, 12(4), 414-416.
- Chen, F., Zhang, W., Liang, Y., Huang, J., Li, K., Green, C. D. et al. (2012). Transcriptome and Network Changes in Climbers at Extreme Altitudes. *PLOS ONE*, 7, e31645. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0031645>
- Chen, J., Li, J., Han, Q., Lin, J., Yang, T., Chen, Z., & Zhang, J. (2016). Long-Term Acclimatization to High-Altitude Hypoxia Modifies Interhemispheric Functional and Structural Connectivity in the Adult Brain. *Brain and Behavior*, 6, e00512. <https://doi.org/10.1002/brb3.512>
- de Aquino Lemos, V., Antunes, H. K. M., dos Santos, R. V. T., Lira, F. S., Tufik, S., & de Mello, M. T. (2012). High Altitude Exposure Impairs Sleep Patterns, Mood, and Cognitive Functions. *Psychophysiology*, 49, 1298-1306. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2012.01411.x>
- Hogan, A. M., Virues-Ortega, J., Botti, A. B., Bucks, R., Holloway, J. W., Rose-Zerilli, M. J. et al. (2010). Development of Aptitude at Altitude. *Developmental Science*, 13, 533-544. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00909.x>
- Kong, F. Y., Li, Q., & Liu, S. X. (2011). Poor Sleep Quality Predicts Decreased Cognitive Function Independently of Chronic Mountain Sickness Score in Young Soldiers with Polycythemia Stationed in Tibet. *High Altitude Medicine & Biology*, 12, 237-242. <https://doi.org/10.1089/ham.2010.1079>
- Lan, L., Wargocki, P., & Lian, Z. (2014). Thermal Effects on Human Performance in Office Environment Measured by Integrating Task Speed and Accuracy. *Applied Ergonomics*, 45, 490-495. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.06.010>
- Lieberman, P., Protopapas, A., & Kanki, B. G. (1995). Speech Production and Cognitive Deficits on Mt. Everest. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 66, 857-864.

- Logan, G. D., & Cowan, W. B. (1984). On the Ability to Inhibit Thought and Action: A Theory of an Act of Control. *Psychological Review*, *91*, 295-327. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.91.3.295>
- Ma, H. L., Mo, T., Zeng, T. A., & Wang, Y. (2020). Long-Term Exposure to High Altitude Affects Spatial Working Memory in Migrants-Evidence from Time and Frequency Domain Analysis. *Acta Physiologica Sinica*, *72*, 181-189.
- Ma, H., Wang, Y., Wu, J., Liu, H., Luo, P., & Han, B. (2015a). Overactive Performance Monitoring Resulting from Chronic Exposure to High Altitude. *Aerospace Medicine and Human Performance*, *86*, 860-864. <https://doi.org/10.3357/AMHP.4261.2015>
- Ma, H., Wang, Y., Wu, J., Luo, P., & Han, B. (2015b). Long-Term Exposure to High Altitude Affects Response Inhibition in the Conflict-Monitoring Stage. *Scientific Reports*, *5*, Article No. 13701. <https://doi.org/10.1038/srep13701>
- Ma, H., Wang, Y., Wu, J., Wang, B., Guo, S., Luo, P., & Han, B. (2015c). Long-Term Exposure to High Altitude Affects Conflict Control in the Conflict-Resolving Stage. *PLOS ONE*, *10*, e0145246. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0145246>
- Schlaepfer, T. E., Bärtsch, P., & Fisch, H. U. (1992). Paradoxical Effects of Mild Hypoxia and Moderate Altitude on Human Visual Perception. *Clinical Science (London, England: 1979)*, *83*, 633-636. <https://doi.org/10.1042/cs0830633>
- Tulek, B., Atalay, N. B., Kanat, F., & Suerdem, M. (2013). Attentional Control Is Partially Impaired in Obstructive Sleep Apnea Syndrome. *Journal of Sleep Research*, *22*, 422-429. <https://doi.org/10.1111/jsr.12038>
- Virués-Ortega, J., Buela-Casal, G., Garrido, E., & Alcázar, B. (2004). Neuropsychological Functioning Associated with High-Altitude Exposure. *Neuropsychology Review*, *14*, 197-224. <https://doi.org/10.1007/s11065-004-8159-4>
- Wang, J., Ke, T., Zhang, X., Chen, Y., Liu, M., Chen, J., & Luo, W. (2013). Effects of Acetazolamide on Cognitive Performance during High-Altitude Exposure. *Neurotoxicology and Teratology*, *35*, 28-33. <https://doi.org/10.1016/j.ntt.2012.12.003>
- Wang, Y., Ma, H., Fu, S., Guo, S., Yang, X., Luo, P., & Han, B. (2014). Long-Term Exposure to High Altitude Affects Voluntary Spatial Attention at Early and Late Processing Stages. *Scientific Reports*, *4*, Article No. 4443. <https://doi.org/10.1038/srep04443>
- Willmann, G., Ivanov, I. V., Fischer, M. D., Lahiri, S., Pokharel, R. K., Werner, A., & Khurana, T. S. (2010). Effects on Colour Discrimination during Long Term Exposure to High Altitudes on Mt Everest. *British Journal of Ophthalmology*, *94*, 1393-1397. <https://doi.org/10.1136/bjo.2009.178491>
- Yan, X., Zhang, J., Gong, Q., & Weng, X. (2011a). Prolonged High-Altitude Residence Impacts Verbal Working Memory: An fMRI Study. *Experimental Brain Research*, *208*, 437-445. <https://doi.org/10.1007/s00221-010-2494-x>
- Yan, X., Zhang, J., Gong, Q., & Weng, X. (2011b). Adaptive Influence of Long Term High Altitude Residence on Spatial Working Memory: An fMRI Study. *Brain and Cognition*, *77*, 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2011.06.002>
- Yang, G., Feng, Z., & Wang, T. (2003). Effects of Altitude Hypoxia on Psychological Function and Its Protection. *Chinese Journal of Behavioral Medical Science*, *12*, 471-473.
- Zhang, D., Ma, H., Huang, J., Zhang, X., Ma, H., & Liu, M. (2018). Exploring the Impact of Chronic High-Altitude Exposure on Visual Spatial Attention Using the ERP Approach. *Brain and Behavior*, *8*, e00944. <https://doi.org/10.1002/brb3.944>
- Zhang, J., Liu, H., Yan, X., & Weng, X. (2011). Minimal Effects on Human Memory Following Long-Term Living at Moderate Altitude. *High Altitude Medicine & Biology*, *12*, 37-43. <https://doi.org/10.1089/ham.2009.1085>