

研究论文

长期高海拔暴露影响移居者空间工作记忆——来自时域和频域分析的证据

马海林^{1,2,#}, 莫婷^{2,#}, 曾桐奥², 王妍^{1,*}

¹中国科学院心理研究所, 心理健康重点实验室, 老年心理研究中心, 北京 100101; ²西藏大学-华南师范大学高原脑科学研究中心, 拉萨/广州 850000/510631

摘要: 长期高海拔暴露影响空间工作记忆。以往研究主要集中于分析时域脑电成分, 而非关注频域上不同频段的神经振荡。为探究长期高海拔暴露影响空间工作记忆的时间动态特征与神经振荡过程, 本研究采用n-back任务结合事件相关电位技术记录生长在低海拔地区、成年后移居高海拔地区满3年的20名健康年轻人(高海拔组)和从未到过高海拔的21名年轻人(低海拔组)的脑电数据, 并进行时域与频域分析。结果显示, 与低海拔组相比, 高海拔组反应时更长, 在2-back条件下正确率更低; 在2-back条件下, 高海拔组的P2波幅更正, 晚期正电位(late positive potential, LPP)波幅更负; 早期delta频段(1~4 Hz, 160~300 ms)的能量值更大, 晚期delta频段(1~4 Hz, 450~650 ms)、theta频段(4~8 Hz, 450~650 ms)的能量值更小。以上结果表明, 长期高海拔暴露影响移居者空间工作记忆能力, 主要体现为后期匹配阶段注意资源不足, 反应抑制能力与信息维持能力降低, 从而损害空间工作记忆能力。

关键词: 空间工作记忆; 高海拔; P2; 晚期正电位; 时频分析

中图分类号: B84; B845; B845.1

Long-term exposure to high altitude affects spatial working memory in migrants — evidence from time and frequency domain analysis

MA Hai-Lin^{1,2,#}, MO Ting^{2,#}, ZENG Tong-Ao², WANG Yan^{1,*}

¹Center on Aging Psychology, CAS Key Laboratory of Mental Health, Institute of Psychology, Chinese Academy Sciences, Beijing 100101, China; ²Plateau Brain Science Research Center, Tibet University/South China Normal University, Lhasa/Guangzhou 850000/510631, China

Abstract: Long-term exposure to high altitude affects spatial working memory. Previous studies have focused on the analysis of electroencephalogram (EEG) components in time domain rather than in frequency domain. To explore the influence of long-term high altitude exposure on time dynamic characteristics and neural oscillation process of the spatial working memory, n-back task combined with the technology of event related potential recording was performed on 20 young migrants who grew at low altitude before the age of 18 and moved to high altitude more than three years ago, and 21 young people who had never been to the high altitude. EEG data were recorded, and the time domain and frequency domain analyses were performed. The results showed that the response time was longer and the accuracy rate was lower under the 2-back condition in the high altitude group compared with those in low altitude group. The late positive potential (LPP) amplitude was more negative, P2 amplitude was more positive in the 2-back condition, and the power value of early delta frequency band (1–4 Hz, 160–300 ms) was larger, while the power values of late delta frequency band (1–4 Hz, 450–650 ms) and theta frequency band (4–8 Hz, 450–650 ms) were smaller in the high altitude group compared with those in low altitude group. The results suggested that long-term exposure to high altitude affected the spatial working memory ability of the

Received 2019-07-10 Accepted 2019-12-16

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31660274, 31560277, 31771247, 31100810).

[#]These authors contributed equally to this work.

^{*}Corresponding author. E-mail: wangyan@psych.ac.cn

migrants, which was reflected in the lack of attention resources in the later matching stage, decreased response inhibition ability and information maintenance ability, and thus resulted in impaired spatial working memory.

Key words: spatial working memory; high altitude; P2; late positive potential; time-frequency analysis

低压低氧、寒冷干燥、日照时间长、太阳辐射强是高海拔自然环境的特点。高海拔环境大气中的含氧量和氧分压降低, 导致人体肺泡内氧分压降低以及弥散入肺毛细血管血液中的氧减少, 并造成动脉血氧分压和饱和度也随之降低。当血氧饱和度下降至一定程度, 就会引起各器官组织供氧不足, 从而导致缺氧^[1]。低氧是高原环境对人体影响最明显也是最严重的因素^[2–7]。大量研究表明高原低氧对机体认知功能产生全方位的损伤^[8, 9], 而损伤最严重的认知功能之一是工作记忆^[9, 10]。

工作记忆是对信息进行暂时加工与存储的机制^[11]。目前发现至少两种不同类型的平行工作记忆系统, 即负责处理语言信息的言语工作记忆和负责处理视觉空间信息的空间工作记忆^[12]。空间工作记忆指在短时间内对刺激物空间位置信息的保持与操控能力, 主要涉及个体对客体位置的感知与记忆、对动态物体位移的觉知及位置刷新等, 是完成复杂认知任务的关键环节^[13]。研究者们对长期高海拔暴露是否影响空间工作记忆进行了研究。Yan 等人研究发现生长在高海拔地区的汉族人视觉皮层灰质密度下降, 说明高海拔地区居民视觉系统存在缺陷^[10]; 此外, Yan 等人还发现高海拔汉族人的枕叶激活下降, 说明高海拔导致个体的视空间认知能力下降^[9]。目前, 很少有研究探究高海拔暴露对移居者的空间工作记忆的影响。

n-back 范式是考察空间工作记忆能力的主要范式^[14]。空间工作记忆 n-back 实验要求被试记住字母出现的相对位置, 忽略字母的名称, 进行相对空间位置信息加工^[15]。事件相关电位 (event related potential, ERP) 技术具有高精度时间分辨率, 可以更精准地考察空间工作记忆的时间进程。Song 等人采用 n-back 范式的 ERP 研究发现, P2 和晚期正电位 (late positive potential, LPP) 成分与空间工作记忆相关^[16]。前额叶 P2 成分反映了空间工作记忆早期编码阶段的注意资源分配, 在编码阶段中投入更多注意资源时, 诱发更大的 P2 成分波幅^[17]。LPP 属于晚期正成分, 反映了匹配阶段的注意资源分配, 定位于顶叶与前额叶^[18]。与匹配任务相比, 不匹配任务需要更多的注意资源, 诱发更正的 LPP 成分^[19]。

在采用 n-back 范式进行的 ERP 研究中, 研究者不仅分析刺激诱发的 P2 和 LPP 成分, 还分析刺激相关的神经振荡。大脑的振荡活动携带着重要的认知加工信息, 但不能用传统的时域方法检测到, 只能用时频分析方法分析不同频段的神经振荡, 且不同频段的神经振荡与人类的认知活动有关^[20, 21]。Delta、theta 频段与空间工作记忆相关。Kane 等人研究发现前额叶 delta 频段的能量值最高, 与工作记忆和注意力等认知功能调节有关^[22]。Harmony 等人研究工作记忆时发现, delta 频段与行为抑制能力相关, 进行反应抑制时, delta 能量增强^[23]。Raghavachari 等人认为 theta 频段是通往空间工作记忆的“大门”, 只要进行空间工作记忆加工, theta 频段的能量值就会增强, 且认知负荷越大, theta 的能量值越大^[24]。Chou 等人指出 theta 频段反映信息维持功能, 只要不提取与任务相关的信息, theta 频段就始终存在, 并且可能更高^[25]。

在本研究中, 我们选取了在高海拔 (3 680 m) 居住满 3 年的 20 名汉族移居者和 21 名低海拔健康年轻人, 采用 n-back 范式结合 ERP 技术来探究长期高海拔暴露对移居者空间工作记忆的影响。同时采用时域和频域两种技术分析高海拔暴露者在空间工作记忆任务上的 P2 和 LPP 成分的变化以及 delta 与 theta 频段的变化。我们假设, 高海拔组比低海拔组的反应时更长、正确率更低; 高海拔组诱发更负的 P2 与 LPP 波幅, 更小的 delta 与 theta 频段, 以此证明长期高海拔暴露对高原移居者的空间工作记忆产生的影响。

1 研究方法

1.1 被试 共 45 名来自西藏大学和北京高校的汉族大学生参与本次实验, 因为脑电 (electroencephalogram, EEG) 干扰太大剔除了 4 名被试, 剩余 41 名被试。所有被试年龄 20~24 岁, 视力正常或者矫正后正常, 均为右利手。高海拔组 20 名被试, 其中男性 10 名, 平均年龄 (21.26 ± 1.41) 岁, 18 岁之前生长在低海拔地区, 在拉萨 (海拔 3 680 m) 居住满 3 年。低海拔组的 21 名被试来自低海拔地区, 10 名男性, 平均年龄 (22.75 ± 1.08) 岁, 且从未去

过高海拔地区。两组被试大学入学时的高考成绩无显著差异 ($P > 0.05$)。实验前所有被试均签署了知情同意书。

1.2 实验设计与流程 实验在一间电隔离、隔音和减光的房间里进行的。被试坐在电脑显示器前，距离显示屏 60 cm。在 n-back 任务中，首先呈现注视点“+” 200~400 ms，随后呈现 1 个大写字母 300 ms 作为目标刺激。共 12 个大写字母 (A~L) 随机呈现。目标可能出现的位置位于以屏幕中心为圆心，半径为 2 或 6 cm 的假想圆形与 3 条穿过圆心的等距直线的交叉点上，共 12 个位置。只要求被试记住字母呈现的位置，忽略字母语音。被试需要确定当前呈现的字母的位置是否与前一个字母的位置一致 (1-back)，或者是否与两个试次前显示的字母的位置一致 (2-back)。实验共计 368 个试次，1-back 与 2-back 条件下均有 184 个试次，一致和不一致的试次数量相等，均为 184 个试次。同时一半的试次中，被试被告知要用左手食指按“F”键表示一致的刺激和右手食指按“J”键表示不一致的刺激，另一半试次的响应作业手交换。如果没有回应，下一个试次将在 1 500 ms 后开始 (图 1)。同时在线记录反应时 (response time, RT)、正确率 (accuracy rate, ACC) 和各试次的详细反应。对反应时与正确率进行两因素重复测量方差分析。两因素分别为条件类型 (1-back、2-back) 和海拔 (高海拔、低海拔)。条件类型为被试内变量，组别为被试间变量。方差分析的 P 值 (< 0.05) 采用 Greenhouse-Geisser 法校正。

1.3 EEG 记录 采用 NeuroScan ERP 记录与分析系统，按国际 10-20 系统扩展的 64 导电极帽记录 EEG。在头顶的 CZ 和 CPZ 中间的点放置参考电极，

离线数据分析时采用双侧乳突的均值进行重参考。双眼外侧放置电极记录水平眼电 (horizontal electrooculogram, HEOG)，左眼上下放置电极记录垂直眼电 (vertical electrooculogram, VEOG)。信号经放大器放大，记录连续 EEG，模拟滤波为 0.05~100 Hz，采样频率为 500 Hz/导，头皮阻抗 $< 5 \text{ k}\Omega$ 。

1.4 ERP 数据处理与统计分析 EEG 数据离线处理采用人工去除伪迹法去除受身体活动和肌肉活动所污染的时程。用 NeuroScan 软件校正 VEOG 和 HEOG，数字滤波为低通 30 Hz。本研究对目标刺激出现后的 EEG 数据进行分析。分析时程 (epoch) 为 -200~1 000 ms，基线为目标刺激出现前 200 ms。

共选取 6 个电极点进行分析：F3、FC3 (左)；FZ、FCZ (中线)；F4、FC4 (右)。ERP 成分分析时间窗为假设驱动，参考以往 n-back 范式的 ERP 成分分析窗口。P2 平均波幅和 LPP 平均波幅的时间窗分别为 160~300 ms 和 450~650 ms。对两个 ERP 成分的平均波幅进行三因素重复测量方差分析。三个因素分别为条件类型 (1-back、2-back)、头皮位置 (左、中、右) 和海拔 (高海拔、低海拔)。方差分析的 P 值 (< 0.05) 采用 Greenhouse-Geisser 法校正。

1.5 时频分析方法 时频分析计算时间窗为 -200~1 000 ms。时频分析用短时傅立叶的汉宁窗分析方法，频率范围为 1~30 Hz，步长为 1 Hz。短时傅立叶把每个被试每种条件下的时频分析取平均值，能量值的基线校正为 -200~0，在进行基线校正后，频谱分析基线的能量值不存在差异。这些计算均使用 FieldTrip 工具箱运算，在 MATLAB 软件上运行。共选取 6 个电极点进行分析：F3、FC3 (左)；FZ、FCZ (中线)；F4、FC4 (右)。时频分析的时间窗口基于 EEG 数据分析的时间窗口，目前研究主要集中在 delta (1~4 Hz, 160~300 ms/450~650 ms) 和 theta (4~8 Hz, 450~650 ms) 频段。对两个频段的能量值进行三因素重复测量方差分析。三个因素分别为条件类型 (1-back、2-back)、头皮位置 (左、中、右) 和海拔 (高海拔、低海拔)。方差分析的 P 值 (< 0.05) 采用 Greenhouse-Geisser 法校正。

2 结果

2.1 行为结果

对正确率进行 2 (条件类型) $\times$ 2 (组别) 两因素方差分析，结果显示条件类型主效应显著 [$F(1, 38) = 48.054, P < 0.001, \eta_p^2 = 0.558$]，1-back 正确率明显高

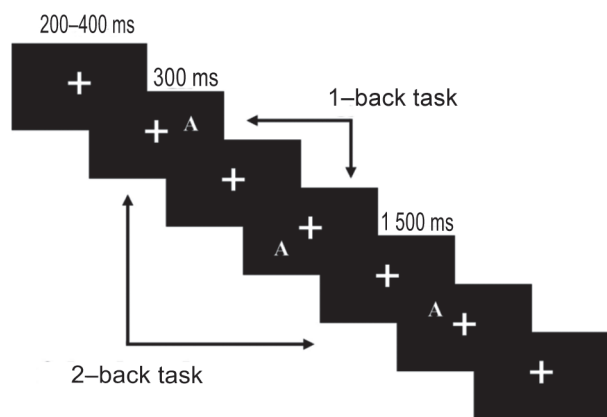


图 1. n-back 实验流程图

Fig. 1. n-back diagram of experiment.

于 2-back ($P < 0.001$)。条件类型与组别的交互作用边缘显著 [$F(1, 38) = 3.514, P = 0.069, \eta_p^2 = 0.085$], 2-back 条件下, 高海拔组正确率明显低于低海拔组 ($P < 0.05$) (表 1)。

对反应时进行 2 (条件类型) $\times$ 2 (组别) 两因素方差分析, 结果显示组别主效应显著 [$F(1, 38) = 38.411, P < 0.001, \eta_p^2 = 0.686$], 高海拔组反应时明显长于低海拔组 ($P < 0.001$); 条件类型主效应显著 [$F(1, 38) = 82.905, P < 0.001, \eta_p^2 = 0.434$], 1-back 反应时明显短于 2-back 反应时 ($P < 0.001$); 没有发现其他主效应或交互作用 (表 1)。

2.2 时域ERP结果

对 P2 (160–300 ms) 平均波幅进行 2 (条件类型) $\times$ 2 (组别) $\times$ 3 (电极) 三因素重复测量方差分析, 结果显示电极点主效应显著 [$F(1, 39) = 5.954, P < 0.01, \eta_p^2 = 0.337$], 右侧 P2 平均波幅显著小于左侧与中线 P2 平均波幅 ($P < 0.001, P < 0.001$)。条件类型与组别的交互作用显著 [$F(1, 39) = 6.167, P < 0.05, \eta_p^2 = 0.094$], 表现为 2-back 条件下, 高海拔组 P2 平均

波幅显著大于低海拔组 ($P < 0.05$) (图 2)。

对 LPP (450–650 ms) 平均波幅进行 2 (条件类型) $\times$ 2 (组别) $\times$ 3 (电极) 三因素重复测量方差分析, 结果显示组别主效应显著 [$F(1, 39) = 5.619, P < 0.05, \eta_p^2 = 0.088$], 表现为高海拔组 LPP 平均波幅显著小于低海拔组 ($P < 0.05$); 电极点主效应显著 [$F(1, 39) = 14.343, P < 0.05, \eta_p^2 = 0.130$], 表现为右侧 LPP 平均波幅显著大于左侧与中线 LPP 平均波幅 ($P < 0.05, P < 0.05$); 条件类型与组别的交互作用也显著 [$F(1, 39) = 5.135, P < 0.05, \eta_p^2 = 0.107$], 表现为 2-back 条件下, 高海拔组 LPP 平均波幅显著小于低海拔组 ($P < 0.05$) (图 2)。

2.3 频域事件相关频谱扰动(event-related spectral perturbation, ERSP)结果

对早期 delta 频段 (1–4 Hz, 160–300 ms) 能量值进行 2 (条件类型) $\times$ 2 (组别) $\times$ 3 (电极) 三因素重复测量方差分析, 结果显示组别的主效应显著 [$F(1, 41) = 27.534, P < 0.05, \eta_p^2 = 0.092$], 表现为高海拔组早期 delta 频段能量值显著大于低海拔组的能量值 ($P < 0.05$); 条件类型 [$F(1, 41) = 5.082, P < 0.05, \eta_p^2 = 0.110$] 与电极点 [$F(2, 40) = 15.549, P < 0.001, \eta_p^2 = 0.195$] 主效应均显著, 表现为 1-back 条件下能量值明显小于 2-back 条件下能量值 ($P < 0.05$), 中线能量值明显大于左侧与右侧能量值 ($P < 0.05, P < 0.001$); 条件类型与组别的交互作用边缘显著 [$F(1, 41) = 3.069, P = 0.087, \eta_p^2 = 0.070$], 表现为 1-back 条件下, 高海拔组 delta 频段能量值大于低海拔组能量值 ($P < 0.05$), 低海拔组 1-back 条件下

表1. 高海拔组和低海拔组在n-back任务中的反应时与正确率
Table 1. Response time (RT) and accuracy rate (ACC) of n-back task in high altitude and low altitude groups

Task load	Group	n	RT (ms)	ACC (%)
1-back	High-altitude	20	585 $\pm$ 91	90.5 $\pm$ 3.8
	Low-altitude	21	555 $\pm$ 56	90.9 $\pm$ 3.2
2-back	High-altitude	20	719 $\pm$ 129	82.9 $\pm$ 7.0
	Low-altitude	21	700 $\pm$ 141	86.5 $\pm$ 4.5

Mean $\pm$ SD.

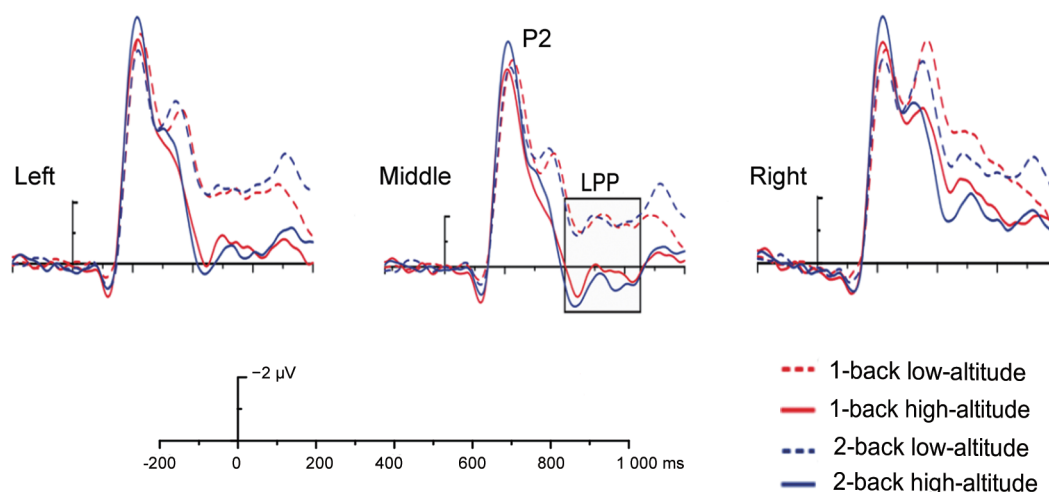


图 2. ERP波形图

Fig. 2. The ERP component map.

delta 频段能量值小于 2-back 条件下能量值 ($P < 0.01$) (图 3、4、5, 表 2)。

对晚期 delta 频段 (1~4 Hz, 450~650 ms) 能量值进行 2 (条件类型) $\times$ 2 (组别) $\times$ 3 (电极) 三因素重复测量方差分析, 结果显示组别主效应显著 [$F(1, 41) = 35.605, P < 0.05, \eta_p^2 = 0.140$], 高海拔组晚期 delta 频段能量值显著小于低海拔组能量值 ($P < 0.05$); 条件类型 [$F(1, 41) = 15.708, P < 0.001, \eta_p^2 = 0.277$] 与电极点 [$F(2, 40) = 21.709, P < 0.001, \eta_p^2 = 0.520$] 主效应都显著, 表现为 1-back 条件下能量值明显大于 2-back 条件下能量值 ($P < 0.001$), 中线 delta 频段能量值明显大于左侧与右侧能量值 ($P < 0.05, P < 0.001$); 条件类型与组别的交互作用显著

[$F(1, 41) = 12.587, P = 0.001, \eta_p^2 = 0.235$], 表现为 1-back 条件下, 高海拔组晚期 delta 频段能量值小于低海拔组能量值 ($P < 0.01$), 低海拔组 1-back 条件下晚期 delta 频段的能量值显著大于 2-back 条件下能量值 ($P < 0.001$) (图 3、4、5, 表 2)。

对晚期 theta 频段 (4~8 Hz, 450~650 ms) 能量值进行 2 (条件类型) $\times$ 2 (组别) $\times$ 3 (电极) 三因素重复测量方差分析, 结果显示组别主效应显著 [$F(1, 41) = 21.3995, P < 0.001, \eta_p^2 = 0.288$], 表现为高海拔组晚期 theta 频段的能量值显著小于低海拔组能量值 ($P < 0.01$); 条件类型主效应显著 [$F(1, 41) = 21.3995, P < 0.001, \eta_p^2 = 0.343$], 表现为 1-back 条件下能量值明显大于 2-back 条件下能量值 ($P < 0.01$); 电极点

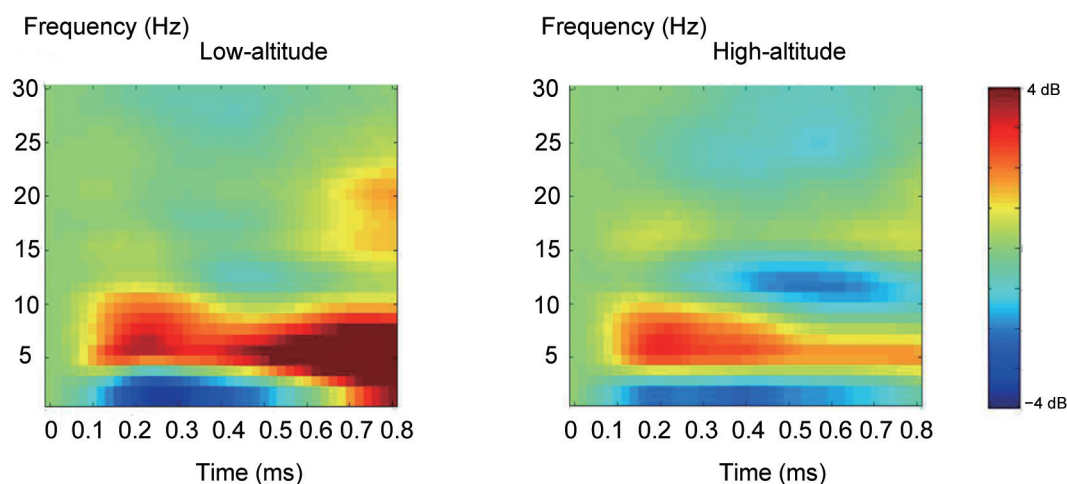


图 3. 1-back条件下低海拔与高海拔被试的频率图

Fig. 3. Frequency diagram of low altitude and high altitude subjects under the 1-back condition.

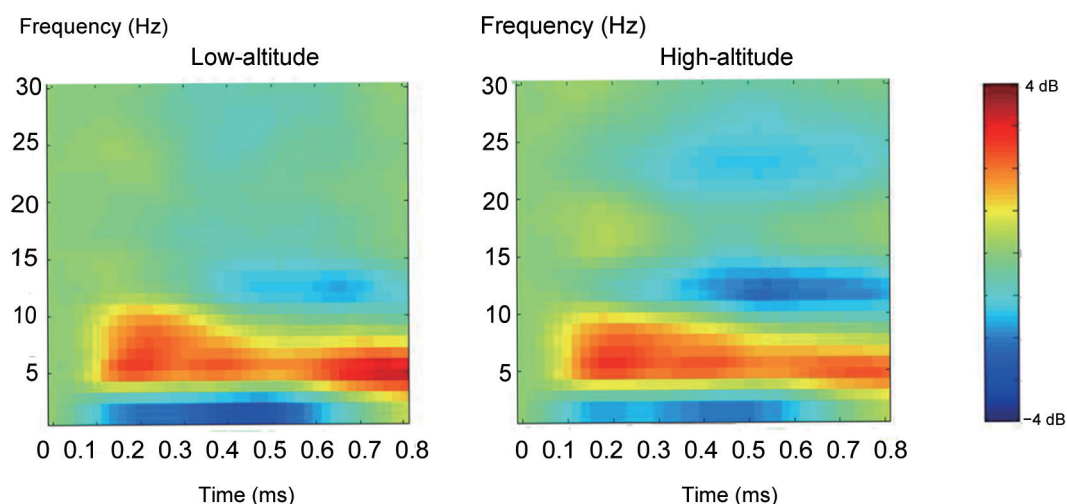


图 4. 2-back条件下低海拔与高海拔被试的频率图

Fig. 4. Frequency diagram of low altitude and high altitude subjects under the 2-back condition.

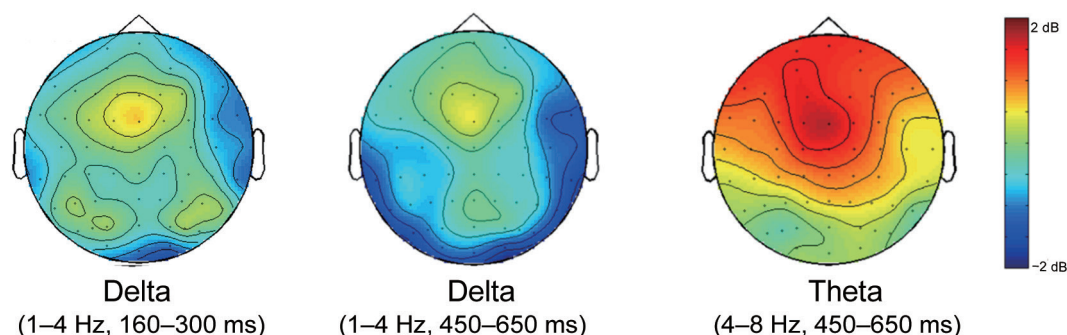


图 5. 各个频段能量值的差异脑地形图

Fig. 5. Brain topographic map of power value difference in each frequency band.

表2. 低海拔与高海拔被试delta与theta频段能量值

Table 2. Power values of delta and theta bands of low altitude and high altitude subjects

	1-back			2-back		
	Left	Middle	Right	Left	Middle	Right
Low-altitude ($n = 21$)						
Delta (1–4 Hz, 160–300 ms)	-0.85 ± 1.33	-0.75 ± 1.38	-1.20 ± 1.18	-0.38 ± 1.34	-0.07 ± 1.31	-0.35 ± 1.34
Delta (1–4 Hz, 450–650 ms)	1.84 ± 1.75	1.85 ± 1.71	1.41 ± 2.03	-0.31 ± 1.30	0.02 ± 1.26	-0.45 ± 1.20
Theta (4–8 Hz, 450–650 ms)	3.58 ± 1.60	3.58 ± 1.45	3.42 ± 1.73	1.31 ± 1.09	1.37 ± 0.92	1.06 ± 1.05
High-altitude ($n = 20$)						
Delta (1–4 Hz, 160–300 ms)	0.06 ± 1.12	0.15 ± 1.25	-0.17 ± 1.37	0.10 ± 0.89	0.33 ± 1.05	-0.14 ± 1.11
Delta (1–4 Hz, 450–650 ms)	0.03 ± 1.18	0.32 ± 1.00	-0.22 ± 1.32	-0.03 ± 0.82	0.23 ± 0.77	-0.41 ± 0.97
Theta (4–8 Hz, 450–650 ms)	1.23 ± 1.40	1.63 ± 1.27	1.00 ± 1.33	1.19 ± 1.19	1.34 ± 1.13	0.94 ± 1.29

Mean $\pm$ SD.

主效应显著 [$F(2, 41) = 14.092, P < 0.001, \eta_p^2 = 0.413$], 中线 theta 频段能量值明显大于左侧与右侧能量值 ($P < 0.05, P < 0.001$)。再者, 条件类型与组别的交互作用显著 [$F(1, 41) = 17.008, P < 0.001, \eta_p^2 = 0.293$], 表现为在 1-back 条件下, 高海拔组晚期 theta 频段能量值显著小于低海拔组能量值 ($P < 0.001$); 低海拔组 1-back 条件下 theta 频段能量值显著大于 2-back 条件下能量值 ($P < 0.001$) (图 3、4、5, 表 2)。

3 讨论

本研究采用 ERP 技术以及时频分析技术考察了长期高海拔暴露对高海拔移居者空间工作记忆的影响。研究结果显示, 在行为层面, 高海拔组的反应时变长、正确率降低; 脑电结果的时域分析发现, 高海拔组的 P2 成分波幅变大, LPP 成分波幅下降; 脑电结果的频域分析发现, 高海拔组早期 delta 频段的能量值显著增大, 但是晚期 delta 频段和 theta 频段能量值显著下降。我们发现, 长期高海拔暴露对移居者空间工作记忆产生损伤作用主要体现在工作记忆任务加工后期匹配阶段的注意资源投入量降

低, 致使反应抑制能力与信息维持能力受损。

高海拔组的长反应时及 2-back 任务中的低正确率反映其工作记忆加工速度减缓, 与本课题组以往研究结果相似^[8]。此外, 生长在高海拔地区的汉族年轻人, 其反应时也明显长于生长在低海拔的年轻人^[9]。模拟高压氧舱进行的反应时测试也报告反应时延长^[26]。低氧影响视觉反应时, 可能是由于低氧使得视觉敏感性降低, 从而使认知速度变慢^[27]。低氧减缓大脑思维速度, 使其对刺激判断时间延长, 反应时变慢^[28]。以上研究表明, 长期高海拔暴露使移居者的视觉敏感性降低, 同时认知速度变慢, 对刺激判断时间延长, 导致反应时延长。

P2 成分属于工作记忆早期成分, 反映工作记忆编码阶段的注意资源分配^[17]。慢性应激使与注意资源相关的前部 P2 成分波幅显著增大, 说明慢性应激组需付出更多注意资源, 以完成与对照组相同的外显行为绩效^[29]。在本实验中, 2-back 条件类型下, 高海拔组 P2 波幅显著大于低海拔组。这就表明在 2-back 任务负荷中, 高海拔组需要投入更多注意资源, 其付出的注意资源高于低海拔组, 说明在记忆

编码早期阶段, 高海拔组注意资源能够得到充分分配。

LPP 成分属于工作记忆晚期成分, 反映工作记忆匹配阶段的注意资源分配^[18], 注意资源消耗越多, LPP 成分波幅越大^[30]。本研究发现 2-back 任务中高海拔组 LPP 波幅小于低海拔组, 表明在任务难度较大的 2-back 任务中, 高海拔组的注意资源投入量显著变小。1973 年 Kahneman 在《注意与意志》一书中提出注意资源理论, 该理论认为人们根据具体任务对注意力的要求支配自己有限的注意资源^[31]。LPP 波幅实验结果说明由于注意资源有限, 高海拔组在早期编码加工阶段中付出了充足的注意资源进行工作记忆编码, 导致在后期匹配加工阶段中, 没有足够的注意资源完成难度较大的实验任务。以往研究显示, 长期高海拔暴露导致前额叶脑区受损, 进而影响注意力、情绪、记忆等认知功能^[32, 33]。Wang 等 (2014 年) 考察了移居高海拔地区 3 年的汉族年轻人空间注意功能, 结果显示在视觉随意注意任务晚期加工阶段中, 高海拔组注意资源下降^[34], 这与本研究结果一致。由此可知长期高海拔暴露影响了空间工作记忆匹配阶段的注意资源分配。

Delta 频段反映空间工作记忆的反应抑制能力^[23], 在执行反应抑制时诱发 delta 频段能量活动。在早期阶段编码加工过程中, 高海拔组 delta 频段能量值显著高于低海拔组, 这就表明相对于低海拔组, 高海拔组在记忆编码过程中有更多的反应抑制加工参与。早期 delta 频段时间窗在 160~300 ms, 结合位于 160~300 ms 时间窗的脑电 P2 成分, 说明在空间工作记忆的编码阶段, 高海拔组投入了充足的注意资源, 能够对信息编码的同时排除无关信息。与以往研究结果一致, 中线 delta 能量值显著高于左右两侧, 反映了额叶中线区域负责工作记忆中的反应抑制能力的调节^[22]。其次, 在后期阶段的匹配过程中, 高海拔组 delta 频段能量值显著低于低海拔组, 表明在匹配与不匹配的记忆任务中, 高海拔组反应抑制能力下降。结合位于 450~650 ms 时间窗的 LPP 成分, 说明高海拔组在匹配阶段投入的注意资源减少, 可以用于反应抑制加工的注意资源不足, 从而导致反应抑制能力下降。

Theta 频段反映空间工作记忆的信息维持能力^[35], 在执行信息维持加工时, 诱发 theta 频段的能量活动。在后期阶段匹配过程中, 高海拔组 theta 能量值显著小于低海拔组, 表明相对于高海拔组,

低海拔组信息维持能力更强。Theta 频段时间窗在 450~650 ms, 结合位于 450~650 ms 时间窗的脑电 LPP 成分, 说明高海拔组在空间工作记忆匹配阶段, 注意资源投入量减少, 导致信息维持能力减弱。与以往结果研究一致, 中线 theta 能量值显著大于左右两侧, 这恰好印证了额中线 theta 频段激活最大, 反映了额中线 theta 频段振荡在工作记忆中起着关键作用^[36]。Theta 振荡缺失机制的系列研究显示, 脑小血管病工作记忆障碍以及癫痫工作记忆障碍导致 theta 振荡缺失^[37]。结合本实验结果可以得出, 高海拔组 theta 频段能量活动减弱说明空间工作记忆功能受损。

本研究的主要结果为高海拔组 LPP 波幅更负, 晚期 delta 频段 (1~4 Hz, 450~650 ms) 和 theta 频段 (4~8 Hz, 450~650 ms) 能量值更小。高海拔组 LPP 波幅的降低表明在晚期匹配阶段任务中, 注意资源投入量减少, 导致晚期阶段的反应抑制能力与信息维持能力降低, 主要体现为晚期 delta 与 theta 频段能量值降低。可以推测, 高海拔组在完成相同的工作记忆任务中, 由于注意资源不足, 导致在晚期匹配阶段中, 反应抑制与信息维持能力降低, 从而导致行为数据的反应时延长, 以及任务负荷增强时正确率下降。

高海拔组工作记忆能力损伤的主要原因是注意资源的不足, 导致反应抑制与信息维持损伤。那么如何提升高海拔组工作记忆能力? 我们应该致力于提高注意资源, 以此提升空间工作记忆能力。高海拔移居者因为长期处于缺氧状态, 导致注意资源降低, 所以提升注意资源的主要措施为增加供氧。移居者可以在家中安装制氧机, 提高家中的空气含氧量, 或者定期在固定的医疗场所进行吸氧, 减少低氧状态的存在, 提高注意力, 提升空间工作记忆能力。

参考文献

- 1 Yang GY (杨国愉), Feng ZZ, Wang T. Effects of altitude hypoxia on psychological function and protection. *J Behav Med Brain Sci* (中华行为医学与脑科学杂志) 2003; 12(4): 471-473 (in Chinese with English abstract).
- 2 Zhang K (张宽), Zhu LL, Fan M. Effect of the plateau environment on the cognitive function of humans. *Milit Med* (军事医学) 2011; 35(9): 706-709 (in Chinese with English abstract).
- 3 Yang GY (杨国愉), Feng ZZ, Qin AF, Xue Y. Study on cog-

- nitive function of soldiers during altitude training. *Med Sci (医学争鸣)* 2005; 26(3): 272–275 (in Chinese with English abstract).
- 4 Jiang CH (蒋春华), Liu FY, Cui JH, Wang HY, Gao L, Gao JQ. Effects of migration to high altitude on auditory-visual cognitive functions. *Med J Natl Defend Forces Southwest Chin (西南国防医药)* 2009; 19(10): 969–971 (in Chinese with English abstract).
 - 5 Xie XM (谢新民), Wen YL. Effects of long-term hypoxia on human cognitive function. *Chin J Public (中国公共卫生)* 2008; 24(7): 814–815 (in Chinese with English abstract).
 - 6 Chen TY (陈天勇), Li DM. New progress on executive function and cognitive aging. *Chin J Gerontol (中国老年学杂志)* 2003; 23(10): 710–712 (in Chinese with English abstract).
 - 7 Han GL (韩国玲). Study on the effect of altitude hypoxia on human cognitive function. *J High Alt Med (高原医学杂志)* 2009; 19(4): 62–63 (in Chinese with English abstract).
 - 8 Ma H, Zhang D, Li X, Wang N, Wang Y. Long-term exposure to high altitude attenuates verbal and spatial working memory: Evidence from an event-related potential study. *Brain Behav* 2019; 9(4): e01256.
 - 9 Yan X, Zhang J, Gong Q, Weng X. Adaptive influence of long term high altitude residence on spatial working memory: An fMRI study. *Brain Cogn* 2011; 77(1): 53–59.
 - 10 Yan X, Zhang J, Gong Q, Weng X. Prolonged high-altitude residence impacts verbal working memory: an fMRI study. *Exp Brain Res* 2011; 208(3): 437–445.
 - 11 Baddeley A. Working memory: looking back and looking forward. *Nat Rev Neurosci* 2003; 4(10): 829–839.
 - 12 Baddeley A, Jarrold C. Working memory and Down syndrome. *J Intellect Disabil Res* 2010; 51(12): 925–931.
 - 13 Huntley J, Bor D, Hampshire A, Owen A, Howard R. Working memory task performance and chunking in early Alzheimer's disease. *Brit J Psychiat* 2011; 198(5): 398–403.
 - 14 Gevins A, Cutillo B. Spatiotemporal dynamics of component processes in human working memory. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1993; 87(3): 128–143.
 - 15 Jonides J, Smith EE, Koeppe RA, Awh E, Minoshima S, Mintun MA. Spatial working memory in humans as revealed by PET. *Nature* 1993; 363(6430): 623–625.
 - 16 Song WQ, Li X, Luo Y J, Du B, Ji X, Luo YJ. Brain dynamic mechanisms of scale effect in visual spatial attention. *Neuroreport* 2006; 17(15): 1643–1647.
 - 17 Smith, Michael E. Neurophysiological manifestations of recollective experience during recognition memory judgments. *J Cognitive Neurosci* 1993; 5(1): 1–13.
 - 18 Kusak G, Grune K, Hagendorf H, Metz AM. Updating of working memory in a running memory task: an event-related potential study. *Int J Psychophysiol* 2000; 39(1): 51–65.
 - 19 Kiss I, Pisio C, Francois A, Schopflocher D. Central executive function in working memory: Event-related brain potential studies. *Brain Res Cogn Brain Res* 1998; 6(4): 235–247.
 - 20 Wang XJ. Neurophysiological and computational principles of cortical rhythms in cognition. *J Physiol Rev* 2010; 90(3): 1195–1268.
 - 21 Tiesinga P, Fellous JM, Sejnowski TJ. Regulation of spike timing in visual cortical circuits. *Nat Rev Neurosci* 2008; 9(2): 97–107.
 - 22 Kane MJ, Engle RW. The role of prefrontal cortex in working-memory capacity, executive attention, and general fluid intelligence: An individual-differences perspective. *Psychon Bull Rev* 2002; 9(4): 637–671.
 - 23 Harmony T, Fernández T, Silva J, Bernal J, Rodríguez M. EEG delta activity: an indicator of attention to internal processing during performance of mental tasks. *Int J Psychophysiol* 1996; 24(1–2): 161–171.
 - 24 Raghavachari S, Kahana MJ, Rizzuto DS. Gating of human theta oscillations by a working memory task. *J Neurosci* 2001; 21(9): 3175–3183.
 - 25 Chou WC, Duann JR, She HC, Huang LY, Jung TP. Explore the functional connectivity between brain regions during a chemistry working memory task. *PLoS One* 2015; 10(6): e0129019.
 - 26 Viruésortega J, Garrido E, Javierre C, Kloeze-manb KC. Human behaviour and development under high-altitude conditions. *Dev Sci* 2010; 9(4): 400–410.
 - 27 Cheng HW (程宏伟), Ma RS. Effects of acute hypoxia on brain event-related potential and response time induced by different sensory pathways. *Chin J Aero Med (中华航空航天医学杂志)* 1998; 9(3): 141–144 (in Chinese with English abstract).
 - 28 Li XY (李学义), Wu XY. Effects of acute mild and moderate hypoxia exposure on psychomotor response. *Space Med Med Eng (航天医学与医学工程)* 2000; 13(4): 235–239 (in Chinese with English abstract).
 - 29 Gan JL (甘景梨), Gao CY, Li XQ, Yang DD, Hu XH, Zhang WH. Visual and auditory evoked potentials in patients with post-traumatic stress disorder. *J Clin Psychiat (临床精神医学杂志)* 2004; 14(6): 324–326 (in Chinese with English abstract).
 - 30 Hajcak G, Nieuwenhuis S. Reappraisal modulates the electrocortical response to unpleasant pictures. *Cogn Affect Behav Neurosci* 2006; 6(4): 291–297.
 - 31 Egeth H, Kahneman D. Attention and effort. *Am J Psychol* 1975; 88(2): 339.
 - 32 Hackett PH, Roach RC. High-altitude illness. *N Engl J Med* 2001; 345(2): 107–114.

- 33 Bahrke MS, Shukitthale B. Effects of altitude on mood, behaviour and cognitive functioning. A review. *Sports Med* 1993; 16(2): 97–125.
- 34 Wang Y, Ma H, Fu S, GuoS, Yang X, Luo P, Han B. Long-term exposure to high altitude affects voluntary spatial attention at early and late processing stages. *Sci Rep* 2014; 4: 1–8.
- 35 Lou W, Shi L, Wang D, Tam CW, Chu WC, Mok VC, Cheng ST, Lam LC. Decreased activity with increased background network efficiency in amnesic MCI during a visuospatial working memory task. *Hum Brain Mapp* 2015; 36(9): 3387–3403.
- 36 Osipova D, Takashima A, Oostenveld R, Fernandez G, Maris E, Jensen O. Theta and gamma oscillations predict encoding and retrieval of declarative memory. *J Neurosci* 2006; 26(28): 7523–7531.
- 37 Gao SS (郜姗姗), Wang YX, Cao J, Song YJ. Study on theta oscillation deficiency in temporal lobe epilepsy working memory disorder. *Int J Biol Eng* (国际生物医学工程杂志) 2016; 39(3): 134–139, 148 (in Chinese with English abstract).