



静息态脑电信号可识别不同高原习服能力的脑功能差异*

李昊^{1,2}, 王琳^{1,2}, 刘晓彤^{1,2}, 吴怡璠^{1,2}, 汪念念^{1,2}, 任鸿^{1,2}, 苏瑞^{1,2}, 马海林^{1,2,△}

1. 西藏大学高原脑科学研究中心(拉萨 850000); 2. 西藏自治区高原脑科学与环境习服重点实验室(拉萨 850000)

【摘要】目的 基于静息态脑电活动的微状态和功能连接分析探究高原习服良好与习服不良者的脑功能差异。**方法** 在3650 m海拔条件下共招募44名受试者作为研究对象,按高原习服指数(altitude acclimatization index, AAI)分为两组。高原习服良好组共22名,平均(20.48±2.09)岁,男10名,女12名;藏族10名,汉族12名。习服不良组共22名,平均(18.90±1.25)岁,男18名,女4名;藏族7名,汉族15名。采用K均值聚类算法将脑电微状态分为A~D四类,比较平均持续时间、覆盖率、发生频率及微状态间转移概率。通过相干分析(coherence analysis, COH)评估脑网络连接强度。**结果** 相对于习服良好组,习服不良组微状态C持续时间较长、发生频率与覆盖率均较高;微状态D的覆盖率较高;而微状态B的发生频率与覆盖率较低。习服不良组微状态B向A和D的转换减少,C向B和D、D向A和C的转换增加,组间差异有统计学意义($P<0.05$)。在 α 、 β 、 δ 、 θ 频段,习服不良组的COH强度在额叶、枕叶等区域均较高,且左右脑功能连接对称。**结论** 高原习服良好者与习服不良者在微状态和功能连接上表现出不同的神经机制,在视觉信息处理、抗干扰能力、脑网络稳定性和连贯性等方面存在显著差异。

【关键词】 高原习服 微状态 功能连接 脑电图

Identification of Differences in Brain Functions at Varied Degrees of Acclimatization to High Altitudes Based on Resting-State Electroencephalogram Signals LI Hao^{1,2}, WANG Lin^{1,2}, LIU Xiaotong^{1,2}, WU Yifan^{1,2}, WANG Niannian^{1,2}, REN Hong^{1,2}, SU Rui^{1,2}, MA Hailin^{1,2,△}. 1. High-Altitude Brain Science Center, Tibet University, Lhasa 850000, China; 2. Tibet Autonomous Region Key Laboratory of High-Altitude Brain Science and Environmental acclimatization, Lhasa 850000, China

△ Corresponding author, E-mail: David_ma79@163.com

【Abstract】Objective To explore the differences in brain functions between individuals with good acclimatization to high altitudes and those with poor acclimatization based on microstate and functional connectivity analysis of resting-state electroencephalogram (EEG) activities. **Methods** A total of 44 residents exposed to the high-altitude environment of 3650 m above sea level were enrolled. They were divided into two groups according to their findings for the high-altitude acclimatization index (AAI), with 22 in the good acclimatization group and 22 in the poor acclimatization group. The good acclimatization group had 10 males and 12 females of the mean age of (20.48±2.09) years. Among them, 10 were Tibetans, and 12 were Han Chinese. The poor acclimatization group consisted of 18 males and 4 females, with a mean age of (18.90±1.25) years. Among them, 7 were Tibetans, and 15 were Han Chinese. The K-means clustering algorithm was used to classify EEG microstates into four categories of A, B, C, and D. The average duration, coverage, occurrence frequency, and transition probabilities between microstates were compared. Coherence analysis (COH) was performed to assess the strength of brain network connectivity. **Results** Compared to the good acclimatization group, the poor acclimatization group exhibited a longer duration, higher occurrence frequency, and coverage of microstate C. The coverage of microstate D was also higher, while the occurrence frequency and coverage of microstate B were lower. The poor acclimatization group showed a decrease in transitions from microstate B to A or D, while transitions from C to B or D, and those from D to A or C increased, showing statistically significant differences between the groups ($P<0.05$). In the α , β , δ , and θ frequency bands, the poor acclimatization group had higher COH strength in regions such as the frontal and occipital lobes, showing symmetrical functional connectivity between the left and right hemispheres. **Conclusion** The good and poor high-altitude acclimatization groups exhibit different neural mechanisms in terms of microstates and functional connectivity. There are significant differences between individuals with good acclimatization and those with poor acclimatization regarding visual information processing, interference resistance, brain network stability, and coherence.

【Key words】 High-altitude acclimatization Microstates Functional connectivity Electroencephalogram

* 国家自然科学基金(No. U23A20476, No. 32260212)和西藏自治区科技计划项目(No. XZ202303ZY0013G, No. 2023ZYJ001)资助

△ 通信作者, E-mail: David_ma79@163.com

出版日期: 2024-11-20

在高海拔环境中,人体因高原低压缺氧而面临一系列生理与病理挑战。高原习服作为衡量个体在高原地区整体健康状态,特别是脑健康的关键指标,体现了平原个体通过代偿机制逐渐增强机体氧利用能力的适应过程。习服良好的个体能够维持稳定的红细胞和血红蛋白水平,且无身体不适,保持正常的工作与学习能力^[1]。考虑到大脑对氧气的高度依赖及其在高原环境中易受缺氧影响的特性^[2],深入探索不同高原习服能力的大脑神经活动差异对于理解高原适应具有重要意义。

静息状态脑电信号作为大脑功能状态的直接反映,为研究高原缺氧条件下大脑的功能表现提供了重要窗口^[3]。特别是在无外部刺激的情况下,静息脑电图能够敏感地捕捉到内源性神经活动的细微变化,为揭示大脑在低氧环境中的适应机制提供了宝贵信息。然而,当前的高海拔脑电图研究受限于传统分析方法,未能深入揭示大脑内部复杂的协调机制。为了突破这些局限,本研究旨在结合微状态分析与大脑功能连通性分析,以更深入地理解高原缺氧对大脑功能的影响。

微状态分析能够捕捉到大脑神经认知网络中快速而动态的活动变化。LEHMANN等^[4]将微状态定义为多通道静息态脑电信号中 α 频段(8~13 Hz)所表现出的有限数量的准稳态模式。它具有毫秒级分辨率,能够定义任意时间点的空间地形,更适合检测大规模神经认知网络中的快速动态活动。这在一定程度上弥补了脑电图在空间分辨率和分析大规模脑网络异常方面的不足^[4]。因此,引入微状态分析对于精细解析高原缺氧对大脑功能的影响至关重要。

同时,功能连通性作为评估神经群体间功能整合程度的指标,其解释力往往超越单一脑区定位的分析^[5]。在高原环境下,通过功能连通性分析,可以更深入地理解不同脑区之间的相互作用如何受到缺氧的影响,以及这种影响如何与个体的习服水平相关联。这有助于揭示高原习服过程中大脑神经活动的动态变化及其与认知功能的关系。

本研究通过采集高原缺氧条件下的静息态脑电信号,期望能够通过微状态分析与大脑功能连接分析,深入探究不同的高原习服能力对大脑神经活动的影响,为高原健康保障与认知功能维护提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 研究对象

根据实验设计采用G*Power软件进行本实验的样本量估计,计算得到在效应值(effect size)为0.8的前提下、

设定显著标准 $\alpha=0.05$ 且检验功效(Power)为0.7时^[6],每组需要至少20个样本。纳入标准:①年龄18~25岁;②无精神疾病史;③排除严重呼吸系统疾病、癫痫及其他脑器质性疾病;④发育正常。本研究在3650 m海拔条件下共招募44名受试者,平均(19.74±1.90)岁。所有参与者实验前签署知情同意书。本研究已获得西藏大学伦理委员会批准,批准号XZTU2022ZRG-02。

1.2 方法

1.2.1 分组

采集血氧饱和度(oxygen saturation measured by pulse oximetry, SpO₂)和红细胞压积(hematocrit test, HCT)计算高原习服指数(altitude acclimatization index, AAI)^[7],该指标为SpO₂与HCT的比值,适用于高海拔移居者和世居者的高原习服或适应程度评估,AAI=1.7228作为高原习服或适应的临界值,小于该值表示习服不良,反之则表示习服良好。44名受试者根据AAI分为习服良好组和习服不良组。其中高原习服良好组共22名,平均(20.48±2.09)岁,男10名,女12名;藏族10名,汉族12名。习服不良组共22名,平均(18.90±1.25)岁,男18名,女4名;藏族7名,汉族15名。

1.2.2 脑电采集

本研究在受试者闭眼并保持清醒的情况下收集受试者的静息脑电图数据5 min^[8],通过Neuroscan公司的SynAmps2放大器记录在线脑电数据,并采用Curry7系统按照国际10-20系统扩展的64导Ag/AgCl电极帽记录脑电信号。记录的通道顺序依次为:FP1、FPZ、FP2等64个。采样率为500 Hz,脑电图数据以右侧乳突(M1)和右侧乳突(M2)为参照,所有阻抗均保持在5 k Ω 以下。

1.2.3 脑电数据预处理

使用MATLAB环境(2021b版, The MathWorks, Inc., Natick, MA)下的一个开源工具箱脑电图EEGLAB^[9]对脑电图数据进行离线处理。原始数据在处理前被降采样到250 Hz,采用带通滤波器(0.1~40 Hz)过滤。提取连续的0.5 s时段,手动标记并拒绝受到污染的时段。使用独立成分分析(independent component analysis, ICA)算法^[10]纠正了受眼电、肌电、心电、线路噪声、通道噪声污染的脑电图数据。使用ICLabel插件^[8]删除眼电、肌电、心电、线路噪声、通道噪声概率大于0.7的成分^[11](平均每名被试去除5个成分,SD=2.0),剔除振幅超过 $\pm 100 \mu\text{V}$ 的时段。从每个被试中选择360个无伪迹的时段拼接成连续的脑电图数据(180 s)用于微状态分析。

1.2.4 微状态分析

使用微状态分析工具箱对静息状态脑电图数据进行

微观状态分析^[12]。预处理后的脑电图数据首先用2~20 Hz的带通滤波器进行了滤波,以消除低频噪声(例如眼睛的眨动和移动)和低频噪声(例如肌肉活动)^[13]。对于每组中的每个参与者,计算全局场功率(GFP)。使用了一种修改版的K均值聚类算法,根据地形图相似性获得地形图,同时忽略极性。通过交叉验证来确定最优簇的数量(本研究中为4个),将两组地形图分别聚类为4个微状态(A~D),见图1。

在获得被试的微状态后,基于微状态的时间序列,提取了3种常用的脑电图微状态特征:平均持续时间(duration)、发生频率(occurrence)和覆盖率(coverage),以供后续分析。最后,计算每个参与者所有微状态之间的转换概率。

1.2.5 功能连接分析

功能连接分析采用相干分析(coherence analysis, COH)方法^[14]。本质上,COH就是定量地度量两个脑电图信号在频域上的相关系数;在频率点 f 处,COH实际测量的是脑电图信号 $x(t)$ 的方差中有多大的比例可以用与信号 $y(t)$ 的最佳拟合的线性关系来解释。在本研究中,对于每一对脑电图信号 $x(t)$ 和 $y(t)$,COH可以表示为:

$$C_{xy}(f) = |R_{xy}(f)|^2 = \frac{|P_{xy}(f)|^2}{P_{xx}(f)P_{yy}(f)}$$

其中, $C_{xy}(f)$ 和 $R_{xy}(f)$ 分别表示 $x(t)$ 和 $y(t)$ 在频率 f 处的相干值和复相关系数。 $P_{xy}(f)$ 表示 $x(t)$ 和 $y(t)$ 在频率 f 处的互谱, $P_{xx}(f)$ 和 $P_{yy}(f)$ 分别表示基于welch谱估计的 $x(t)$ 和 $y(t)$ 在频率 f 处的自谱。在每个频率点 f 上,计算复相关系数 $R_{xy}(f)$ 的平方,即可得到 $C_{xy}(f)$,其数值定义在[0,1]范围内,数值越大代表两信号在频域的相关性越大。

在每个频率点 f 处,COH会估计其对应的 $C_{xy}(f)$;随后,

基于 $C_{xy}(f)$,每一对电极之间的连接权重来自于感兴趣频段内的COH均值。每名被试的每个脑电图数据段,均会得到维度为21×21的邻接矩阵;进一步,将所有数据段的邻接矩阵叠加平均,即得到每名被试的静息态脑电图网络。

本研究利用各频段的通道矩阵分布图观察产生相关性差异的具体通道,其中横纵坐标代表通道编号,颜色代表连接强度大小,从蓝色到红色对应的连接值范围为[0,1]。由于都是无向网络,因此邻接矩阵关于对角线对称。

1.2.6 统计学方法

数据分析均使用SPSS 26.0软件进行。服从正态分布的计量资料采用 $\bar{x} \pm s$ 表示。微状态指标的组间比较采用独立样本 t 检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 微状态分析结果

高原习服良好组和高原习服不良组平均全局解释方差分别为56.91%和56.90%。如表1所示,与高原习服不良组相比,高原习服良好组微状态C的平均持续时间缩短;微状态B的发生频率增高,微状态C的发生频率降低;微状态C和D的覆盖率降低,微状态B的覆盖率增高。

对于高原习服良好组和高原习服不良组,从一个微状态到另一个微状态的转变概率如表2所示。相比之下,高原习服不良组在A到B、B到A,以及B到D的转换比高原习服良好组更少,差异有统计学意义($P < 0.05$);但是,高原习服不良组在C到B、C到D、D到A、D到C的转换比高原习服良好组更多,差异有统计学意义($P < 0.05$)。这些结果表明,高原习服不良组减少了微状态B与微状态A和D之间的转换,但增加了微状态C与微状态B和D之间的

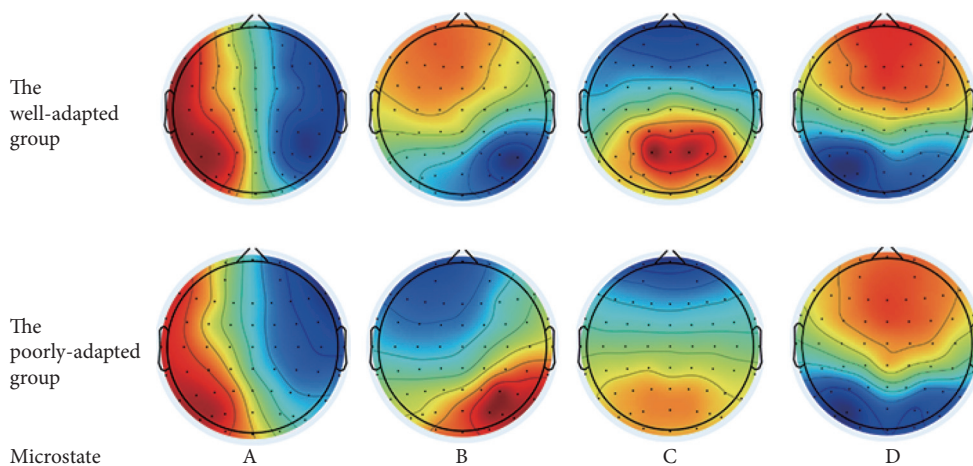


图1 高原习服良好组和高原习服不良组的微状态拓扑图

Fig 1 Topological map of microstates in the group well adapted to high altitude and the group poorly adapted to high altitude

表 1 持续时间、发生频率以及覆盖率统计分析

Table 1 Statistical analysis of duration, occurrence, and coverage

Index	Microstate	The well-adapted group (n=22)	The poorly-adapted group (n=22)	t	P
Duration/ms	A	70.57±11.00	68.27±8.78	0.731	0.469
	B	75.84±14.16	70.00±8.26	1.668	0.104
	C	65.60±6.54	75.25±12.32	-3.019	0.006
	D	85.23±18.54	91.87±20.50	-1.098	0.279
Occurrence/s ⁻¹	A	2.34±0.57	2.07±0.52	1.573	0.124
	B	4.02±0.85	3.21±0.97	2.845	0.007
	C	2.10±0.99	2.72±0.83	-2.153	0.037
	D	4.87±1.09	4.97±1.33	-0.255	0.800
Coverage	A	0.17±0.04	0.1434±0.04	1.573	0.124
	B	0.30±0.06	0.2207±0.05	4.574	<0.001
	C	0.13±0.06	0.2032±0.06	-3.401	0.002
	D	0.40±0.03	0.4327±0.02	-3.946	<0.001

表 2 转移概率统计分析

Table 2 Statistical analysis of transition probabilities

Transition direction	Transition probabilities		t	P
	The well-adapted group (n=22)	The poorly-adapted group (n=22)		
A→B	0.22±0.07	0.17±0.06	2.353	0.024
A→C	0.18±0.05	0.16±0.07	1.303	0.200
A→D	0.23±0.07	0.24±0.08	-0.548	0.587
B→A	0.38±0.09	0.27±0.08	4.206	<0.001
B→C	0.28±0.11	0.22±0.08	1.931	0.061
B→D	0.53±0.12	0.41±0.12	3.211	0.003
C→A	0.16±0.08	0.2±0.08	-1.687	0.099
C→B	0.14±0.05	0.19±0.09	-2.557	0.014
C→D	0.23±0.12	0.34±0.12	-2.852	0.007
D→A	0.46±0.07	0.53±0.07	-3.144	0.003
D→B	0.64±0.09	0.63±0.11	0.083	0.934
D→C	0.54±0.12	0.62±0.14	-2.063	0.046

转换, 以及微状态D与微状态A和C之间的转换。

2.2 功能连接分析结果

两组被试在 α 、 β 、 δ 、 θ 四个频段的脑区COH如图2所示, 高原习服不良组在 α 频段1~14通道(FP1~P7)的COH连接强度高于高原习服良好组, 在 β 频段3~15通道(FPZ~P8)的COH连接强度高于高原习服良好组, 在 δ 频段3~14通道(FPZ~P7)的COH连接强度高于高原习服良好组, 在 θ 频段3~14通道(FPZ~P7)的COH连接强度高于高原习服良好组。结果提示两组被试的脑网络连接差异有统计学意义。

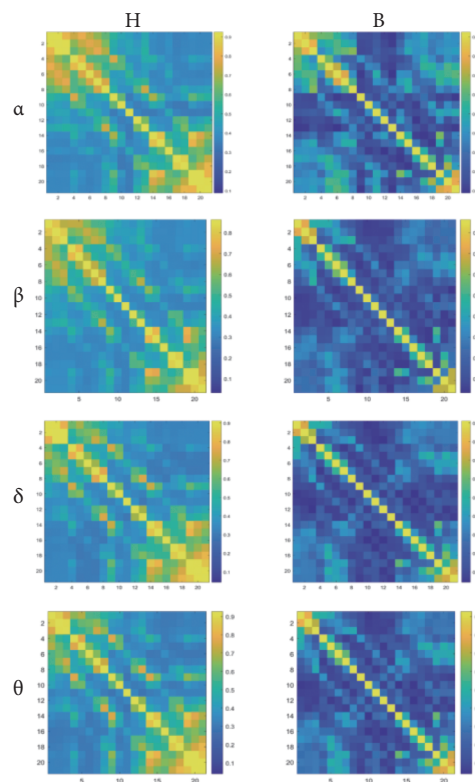


图 2 两组被试在各频段的通道相干性(COH)矩阵结果
Fig 2 The coherence (COH) matrices of the channels at each frequency band for the two groups of subjects

H refers to the well-adapted group; B refers to the poorly-adapted group.

通过COH的对比分析发现(图3), 在 α 频段, 高原习服不良组的COH在右侧前额区与左侧枕叶区(PF2~P3)通道、额叶区所有通道与枕叶区所有通道(F7、F3、Fz、F4、F8~P3、Pz、P4、O1、Oz、O2)的强度都显著增强($t = 2.323$,

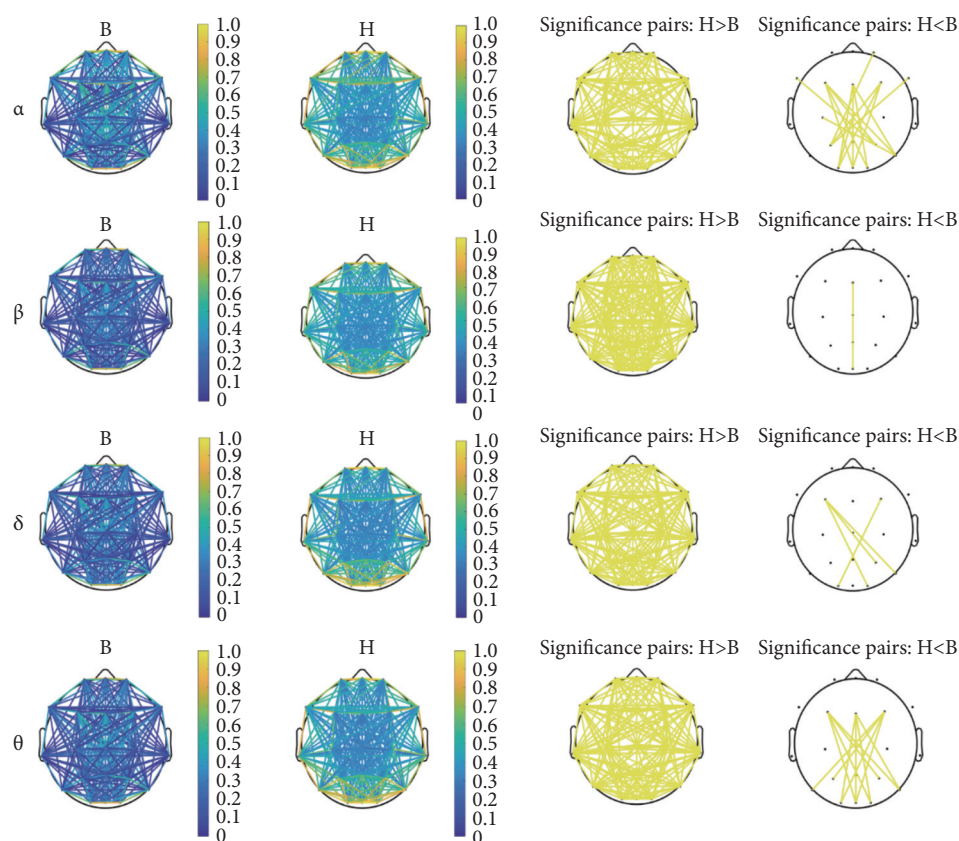


图 3 两组被试在各频段的脑区功能连接结果

Fig 3 The results of brain region functional connectivity across different frequency bands for the two groups of subjects

The well-adapted group (H) has good adaptability, while the poorly-adapted group (B) has poor adaptability. Significant pairs H>B: The connectivity of group H is significantly greater than that of group B ($P<0.05$); significant pairs H<B: the connectivity of group B is significantly greater than that of group H ($P<0.05$).

$P=0.018$), 而除此以外的高原习服良好组所有通道的COH强度都显著大于高原习服不良组。在 β 频段, 高原习服不良组的COH在额叶区与中央区(FZ~CZ)通道、中央区与枕叶区(CZ~OZ)通道的强度显著增强($t=2.552$, $P=0.011$), 除此以外的高原习服良好组所有通道的COH强度都与 α 频段相同且显著大于高原习服不良组。在 δ 频段, 高原习服不良组的COH在左侧额叶区与枕叶区(F3~O2/P4/P8)通道、右侧额叶区与枕叶区(F4~O1)通道显著增强($t=2.828$, $P=0.006$), 除此以外的高原习服良好组所有通道的COH强度都与 α 、 β 频段相同且显著大于高原习服不良组。在 θ 频段, 高原习服不良组的COH在额叶区与枕叶区(F3/FZ/F4~P7/P8/O1/OZ/O2)通道的强度显著增加($t=2.318$, $P=0.021$), 其他通道依旧是高原习服良好组COH显著大于高原习服不良组。在以上差异有统计学意义的前提下, 功能连接结果在大脑结构上呈现对称性, 说明该结果是大脑功能的整体性变化, 而不是某一脑区的局部病变。

3 讨论

本研究聚焦于高原环境下个体习服不良的脑电特

征, 通过采集高原个体静息状态下的脑电信号, 并运用微状态与功能连通性分析技术, 深入探索了高原低氧环境对认知功能影响的脑神经机制。

微状态分析揭示, 高原习服良好组在微状态B上的表现尤为突出, 其发生频率和覆盖率均显著高于高原习服不良组。微状态B与视觉网络紧密相关, 涉及双侧枕下回、楔状叶、舌回及中部枕区的激活, 对纹状体外视觉信息的处理至关重要^[15-16]。高原习服良好组在此微状态上的高活跃性, 可能意味着他们在视觉信息处理方面更为高效, 能迅速适应高原环境带来的视觉挑战。相反, 高原习服不良组在微状态C上表现出更高的参数, 该状态与突显网络相关, 负责检测并定位内外源性刺激, 与抗干扰和执行功能紧密相关^[17]。高原习服不良组的高参数可能反映了他们对高原环境的不适应, 处理内外源性刺激时更为敏感, 而高原习服良好组则可能通过优化注意资源分配, 展现出更强的抗干扰和执行能力。

进一步分析微状态间的自我转换率, 高原习服良好组展现出更高的稳定性和连贯性, 表明他们的大脑在不同认知功能模式间切换更为流畅。然而, 高原习服不良

组在特定转换路径上,如C→B、C→D等,自我转换率异常增高,这可能暗示了他们在处理特定认知任务时的混乱或不稳定性,尤其是在注意力分配和认知资源调动上。

功能连通性分析进一步印证了上述发现。高原习服良好组在各频段(α 、 β 、 δ 、 θ)的连接强度均高于高原习服不良组,显示出更紧密的脑网络结构。特别是高原习服不良组在多个频段表现出连通性降低,与意识障碍的严重程度相关^[18-19],可能反映了高原缺氧对脑网络的损伤^[20]。而在 α 、 δ 、 θ 频段,有研究发现精神分裂症的额叶连通性高于健康的人,但 β 频段额叶和顶颞叶连通性低于健康的人^[21]。结合本研究的结果,暗示精神分裂症和脑的高原习服不良在 α 、 δ 、 θ 频段有相似的模式, β 频段的模式却相差甚远,其原因可能在于虽然都存在认知障碍,但大脑的具体损伤不同,但也可能是因为本研究未将 β 频段分为高频 β 与低频 β ,导致两个不同的模式相互混淆。此外,高原习服不良组在 α 波段的额叶-枕叶连接增强,这与专注度下降相关^[22],进一步证实了高原脑习服不良对认知功能的负面影响。

综上所述,本研究通过微状态和功能连通性分析,揭示了高原环境下个体习服不良的脑电特征及其与认知功能损伤的内在联系。习服良好者与习服不良者在视觉信息处理、抗干扰能力、脑网络稳定性和连贯性等方面存在显著差异。然而,本研究也存在一定的局限性,如缺乏平原健康对照组和未充分考虑混杂因素等。因此,未来研究需进一步扩大样本量,细化高原脑习服的脑电特征模式,并探索其与健康状况的普遍关联,为高原适应训练和认知功能保护提供科学依据。

* * *

作者贡献声明 李昊负责论文构思、研究项目管理、监督指导和审读与编辑写作,王琳和吴怡璠负责可视化和初稿写作,刘晓彤负责初稿写作,汪念念负责正式分析、软件、可视化和审读与编辑写作,任鸿负责正式分析、软件、可视化和初稿写作,苏瑞负责验证,马海林负责经费获取、提供资源和审读与编辑写作。所有作者已经同意将文章提交给本刊,且对将要发表的本刊进行最终定稿,并同意对工作的所有方面负责。

Author Contribution LI Hao is responsible for conceptualization, project administration, supervision, and writing--review and editing. WANG Lin and WU Yifan are responsible for visualization and writing--original draft. LIU Xiaotong is responsible for writing--original draft. WANG Niannian is responsible for formal analysis, software, visualization, and writing--review and editing. REN Hong is responsible for formal analysis, software, visualization, and writing--original draft. SU Rui is responsible for validation. MA Hailin is responsible for funding acquisition, resources, and writing--review and editing. All authors consented to the submission of the article to the Journal. All authors approved the final version to be published and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Declaration of Conflicting Interests All authors declare no competing interests.

参 考 文 献

- [1] 高钰琪, 罗德成, 牛文忠, 等. 高原习服的评价标准与方法研究. *第三军医大学学报*, 2001, 23(12): 1453-1454. doi: 10.3321/j.issn:1000-5404.2001.12.023.
GAO Y Q, LUO D C, NIU W H, *et al.* Research on evaluation criteria and methods of plateau adaptation. *J Third Milit Med Univ*, 2001, 23(12): 1453-1454. doi: 10.3321/j.issn:1000-5404.2001.12.023.
- [2] BLIEMRIEDER K, WEISS E M, FISCHER R, *et al.* Cognition and neuropsychological changes at altitude--a systematic review of literature. *Brain Sci*, 2022, 12(12): 1736. doi: 10.3390/brainsci12121736.
- [3] BURYKH É A. Interaction between changes in local and temporospatial spectral EEG characteristics during exposure of humans to hypoxia. *Neurosci Behav Physiol*, 2007, 37(2): 133-146. doi: 10.1007/s11055-007-0161-x.
- [4] LEHMANN D, OZAKI H, PAL I. EEG alpha map series: brain microstates by space-oriented adaptive segmentation. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 1987, 67(3): 271-288. doi: 10.1016/0013-4694(87)90025-3.
- [5] PFURTSCHHELLER G, DALY I, BAUERNFEIND G, *et al.* Coupling between intrinsic prefrontal HbO₂ and central EEG beta power oscillations in the resting brain. *PLoS One*, 2012, 7(8): e43640. doi: 10.1371/journal.pone.0043640.
- [6] FAUL F, ERDFELDER E, BUCHNER A, *et al.* Statistical power analyses using G*Power 3. 1: Tests for correlation and regression analyses. *Behav Res Methods*, 2009, 41(4): 1149-1160. doi: 10.3758/BRM.41.4.1149.
- [7] 李昊, 刘晓彤, 吴怡璠, 等. 高原习服与适应的评估模型构建. *科学通报*, 2024, 69(24): 3628-3641. doi: 10.1360/TB-2023-1258.
LI H, LIU X T, WU Y F, *et al.* Evaluation model of acclimatization and adaptation at high altitude (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2024, 69(24): 3628-3641. doi: 10.1360/TB-2023-1258.
- [8] PION-TONACHINI L, KREUTZ-DELGADO K, MAKEIG S. ICLabel: An automated electroencephalographic independent component classifier, dataset, and website. *NeuroImage*, 2019, 198: 181-197. doi: 10.1016/j.neuroimage.2019.05.026.
- [9] DELORME A, MAKEIG S. EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *J Neurosci Methods*, 2004, 134(1): 9-21. doi: 10.1016/j.jneumeth.2003.10.009.
- [10] JUNG T P, MAKEIG S, MCKEOWN M J, *et al.* Imaging brain dynamics using independent component analysis. *Proc IEEE*, 2001, 89(7): 1107-1122. doi: 10.1109/5.939827.
- [11] BAGDASAROV A, ROBERTS K, BRÉCHET L, *et al.* Spatiotemporal dynamics of EEG microstates in four- to eight-year-old children: age- and sex-related effects. *Dev Cognit Neurosci*, 2022, 57: 101134. doi: 10.1016/j.dcn.2022.101134.
- [12] POULSEN A T, PEDRONI A, LANGER N, *et al.* Microstate EEGlab toolbox: an introductory guide. *bioRxiv*, 2018: 289850. (2018-03-27)[2024-03-26]. <https://doi.org/10.1101/289850>.

- [13] QIU S, WANG S, PENG W, *et al.* Continuous theta-burst stimulation modulates resting-state EEG microstates in healthy subjects. *Cogn Neurodynamics*, 2022, 16(3): 621-631. doi: [10.1007/s11571-021-09726-6](https://doi.org/10.1007/s11571-021-09726-6).
- [14] LEE RODGERS J, NICEWANDER W A. Thirteen ways to look at the correlation coefficient. *Am Stat*, 1988, 42(1): 59-66. doi: [10.1080/00031305.1988.10475524](https://doi.org/10.1080/00031305.1988.10475524).
- [15] ANDROULAKIS X M, KREBS K A, JENKINS C, *et al.* Central executive and default mode network intranet work functional connectivity patterns in chronic migraine. *J Neurol Disorders*, 2018, 6(5): 393. doi: [10.4172/2329-6895.1000393](https://doi.org/10.4172/2329-6895.1000393).
- [16] THOMAS YEO B T, KRIENEN F M, SEPULCRE J, *et al.* The organization of the human cerebral cortex estimated by intrinsic functional connectivity. *J Neurophysiol*, 2011, 106(3): 1125-1165. doi: [10.1152/jn.00338.2011](https://doi.org/10.1152/jn.00338.2011).
- [17] STEVENS C, WALKER G, BOYER M, *et al.* Severe tinnitus and its effect on selective and divided attention. *Int J Audiol*, 2007, 46(5): 208-216. doi: [10.1080/14992020601102329](https://doi.org/10.1080/14992020601102329).
- [18] WU D Y, CAI G, ZOROWITZ R D, *et al.* Measuring interconnection of the residual cortical functional islands in persistent vegetative state and minimal conscious state with EEG nonlinear analysis. *Clin Neurophysiol*, 2011, 122(10): 1956-1966. doi: [10.1016/j.clinph.2011.03.018](https://doi.org/10.1016/j.clinph.2011.03.018).
- [19] ROSANOVA M, GOSSERIES O, CASAROTTO S, *et al.* Recovery of cortical effective connectivity and recovery of consciousness in vegetative patients. *Brain*, 2012, 135(4): 1308-1320. doi: [10.1093/brain/awr340](https://doi.org/10.1093/brain/awr340).
- [20] VAROTTO G, FAZIO P, ROSSI SEBASTIANO D, *et al.* Altered resting state effective connectivity in long-standing vegetative state patients: an EEG study. *Clin Neurophysiol*, 2014, 125(1): 63-68. doi: [10.1016/j.clinph.2013.06.016](https://doi.org/10.1016/j.clinph.2013.06.016).
- [21] POLLONINI L, POPHALE S, SITU N, *et al.* Information communication networks in severe traumatic brain injury. *Brain Topogr*, 2010, 23(2): 221-226. doi: [10.1007/s10548-010-0139-9](https://doi.org/10.1007/s10548-010-0139-9).
- [22] XU Z, ZHANG P, TU M, *et al.* Brain optimization with additional study time: potential brain differences between high- and low-performance college students. *Front Psychol*, 2023, 14: 1209881. doi: [10.3389/fpsyg.2023.1209881](https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1209881).

(2024-03-27 收稿, 2024-08-18 修回)

编辑 吕熙



开放获取 本文使用遵循知识共享署名—非商业性使用 4.0 国际许可协议 (CC BY-NC 4.0), 详细信息请访问

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>。

OPEN ACCESS This article is licensed for use under Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (CC BY-NC 4.0). For more information, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

© 2024 《四川大学学报(医学版)》编辑部

Editorial Office of *Journal of Sichuan University (Medical Sciences)*