

• 中枢神经影像学 •

短期睡眠剥夺影响持续性注意力的认知神经机制:基于静息态功能 MRI 低频振幅分数分析

徐永强,王兴瑞,胡文钟,印弘,朱元强

【摘要】 目的:基于静息态功能 MRI,分析健康成人 24 h 睡眠剥夺前后大脑低频振幅分数(fALFF)的变化,探讨持续性注意力损伤的神经影像机制。**方法:**将 50 例健康志愿者纳入本研究,每例志愿者分别于正常睡眠(RW)及剥夺睡眠(SD)24 h 后进行静息态 fMRI 扫描,采用精神运动警觉性任务(PVT)采集每例志愿者的持续性注意力行为学数据。使用 DPABI 平台和 fALFF 方法对 2 次静息态 fMRI 数据进行分析处理,并将志愿者在睡眠剥夺前、后的 fALFF 差值与执行 PVT 任务时脱漏(反应时间 >500 ms)次数的差值(ALSD-ALRW)进行相关性分析。**结果:**24 h 睡眠剥夺严重影响持续性注意力水平,睡眠剥夺后大脑 fALFF 有明显变化,表现为以背外侧前额叶为主的额顶网络区域的 fALFF 降低及以丘脑为主的皮层下灰质区域 fALFF 升高。RW 和 SD 后 PVT 任务中脱漏数量的差值与颞中回 fALFF 的差值呈正相关($r=0.34, P=0.01$),与背外侧额上回 fALFF 的差值呈负相关($r=-0.32, P=0.02$)。**结论:**额顶网络及丘脑等皮层下灰质区域自发神经活动的改变可能是睡眠剥夺后持续性注意力下降的重要神经机制。

【关键词】 功能磁共振成像;睡眠剥夺;比率低频振幅;精神运动警觉性任务;背外侧前额叶;丘脑

【中图分类号】 R445.2;R474.9 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2021)02-0158-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2021.02.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Neural mechanism of sustained attention deficits after sleep deprivation: a resting-state functional-MRI study using fractional amplitude of low-frequency fluctuation XU Yong-qiang, WANG Xing-rui, HU Wen-zhong, et al. Department of Radiology, Xijing Hospital, Air Force Medical University, Xi'an 710032, China

【Abstract】 Objective: To study the changes of fractional amplitude of low-frequency fluctuation (fALFF) in healthy adults after rest wakefulness (RW) and after 24 hours of sleep deprivation (SD) using resting-state functional magnetic resonance imaging (rs-fMRI), and to explore the neural mechanism of sustained attention deficits after sleep deprivation. **Methods:** Fifty healthy subjects underwent rs-fMRI scanning after RW and after 24 hours of SD, respectively. Just 10 minutes before rs-MRI scanning, psychomotor vigilance test (PVT) was used to measure sustained attention of each subjects. Calculation and statistics for fALFF were analyzed using DPABI platform. Finally, correlation analysis was performed between changes of fALFF and changes of attention lapses (>500 ms) in PVT. **Results:** Sleep deprivation severely affected the level of sustained attention. After SD, fALFF showed significantly decreased activation in frontal-parietal regions, mainly in the dorso-lateral prefrontal cortex, and increased activation in subcortical gray matter regions, mainly in the thalamus. The changes of PVT lapses were significantly positively correlated with the changes of fALFF in temporal middle gyrus ($r=0.34, P=0.01$), and significantly negatively correlated with the changes of fALFF in dorsolateral prefrontal lobe ($r=-0.32, P=0.02$). **Conclusion:** The changes of spontaneous neural activity within fronto-parietal network and the subcortical thalamus may underlie the sustained attention deficits after

作者单位: 710032 西安,空军军医大学第一附属医院放射科(徐永强,胡文钟,印弘,朱元强); 710018 西安,西北大学附属医院(西安市第三医院)放射科(王兴瑞)

作者简介: 徐永强(1990-),男,山东青州人,硕士研究生,住院医师,主要从事功能磁共振成像及神经影像学临床研究工作。

通信作者: 朱元强, E-Mail: zhu_yq_fmnu@163.com

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(81801772)

sleep deprivation.

【Key words】 Functional magnetic resonance imaging; Sleep deprivation; Fractional amplitude of low-frequency fluctuation; Psychomotor vigilance test; Dorsolateral prefrontal cortex; Thalamus

随着社会节奏的加快,个体的压力与日俱增,睡眠不足或睡眠剥夺(sleep deprivation, SD)已经成为一种常见的社会现象和公共卫生问题^[1]。大量的研究结果显示 SD 给社会、经济和人类带来了较大的损失^[2]。《2018 中国睡眠质量调查报告》对 10 万人的调查结果显示有 83.8% 的被调查者经常受到睡眠问题困扰,16% 的被调查者夜间睡眠时间不足 6 h。SD 会导致个体多种认知能力的下降,如注意力、决策能力、记忆力等^[3-5]。其中持续性注意力是受 SD 影响最为严重的注意力功能^[6],但其损伤背后的神经影像机制尚不清楚。静息态功能磁共振(resting-state functional magnetic resonance imaging, rs-fMRI)可无创性检测大脑局部脑区神经功能活动情况,已被广泛应用于神经及精神等多种疾病的影像机制研究。低频振幅分数(fractional amplitude of low frequency fluctuations, fALFF)是在低频振幅基础上得到的衡量各个体素在静息状态下自发活动水平的指标,在一定程度上避免了 ALFF 易受脑室内脑脊液及生理噪声影响等弊端,能有效抑制静息态 fMRI 中的非特异性信号成分,显著提高对局部自发脑活动检测的敏感性和特异性^[7]。本研究拟采用 rs-fMRI 技术及 fALFF 分析方法,分析 SD 后健康成人局部脑区活动及持续性注意力的变化情况,揭示 SD 导致持续性注意力降低的神经影像机制。

材料与方法

1. 研究对象

通过广告向西安市高校招募 54 例健康志愿者,男 29 例,女 25 例,年龄(22.46 ± 1.81)岁。纳入标准:①右利手;②18~30 岁;③智力水平正常;④体内无金属植入物,无磁共振扫描禁忌证。排除标准:①有酒精或药物滥用史;②有神经系统或精神疾病史;③曾经或目前患严重心、脑、肝、肾疾病及其它严重躯体疾病;④有睡眠障碍;⑤有幽闭恐惧症;⑥绝对“清晨型”或者绝对“夜晚型”(使用中文版清晨型/夜晚型量表^[8]评估每例志愿者的睡眠习惯)。要求每例志愿者在磁共振扫描前的 1 周内不能摄取任何含有咖啡因或酒精的刺激性饮料。睡眠日记结果显示本组被试的平均入睡时间为 22 点 29 分 $\pm$ 17 分,早上起床时间为 6 点 27 分 $\pm$ 11 分,夜间持续睡眠时间为 7 小时 57 分 $\pm$ 21 分。此外,所有研究对象的匹兹堡睡眠质量指数(Pittsburgh sleep quality index, PSQI)得分小于 5 分,表明睡眠质

量良好。

本研究经本院临床试验伦理委员会批准。实验前向每例志愿者详细说明研究目的、方法及注意事项,所有志愿者均为自愿参加并签署知情同意书。

2. 实验流程

研究期间每例研究对象需到访实验室 3 次,主要的实验流程(图 1):第 1 次到访的主要内容了解研究目的并签署知情同意书,每例研究对象领取一块腕表,用于记录每天的睡眠情况;另外 2 次分别为正常睡眠后清醒状态(rest wakefulness, RW)和 SD 后进行 MRI 扫描。为保证研究结果不受节律信号的影响,磁共振扫描的时间均为早上 8 点。为防止 SD 持续效应的干扰,每例研究对象两次 MRI 扫描的间隔时间为 1 周,扫描的先后顺序采用伪随机的实验设计,以尽量减少扫描顺序对实验结果的影响^[9]。

SD 过程从第一天的早上 8 点整开始至第二天早上 8 点整结束。每例研究对象在 SD 实验的第一天,先进行正常的工作和学习,但中午不能午休(研究人员通过检查研究对象腕表记录的活动情况来确认)。每例研究对象于 18 点抵达实验室,至第二天早上 MRI 扫描结束后离开实验室。在此期间要求研究对象必须一直保持清醒状态,可以进行看书、上网等活动,但是不能进行剧烈活动。餐饮食物由实验室统一提供,但 22 点后不再提供夜宵。整个 SD 过程由两名研究人员共同监视,避免研究对象入睡。对于 RW,要求研究对象 MRI 扫描当天早上 7 点 40 前抵达实验室。

3. 行为学数据采集

所有研究对象在 MRI 扫描之前进行 10 min 的精神运动警觉性任务(psychomotor vigilance test,

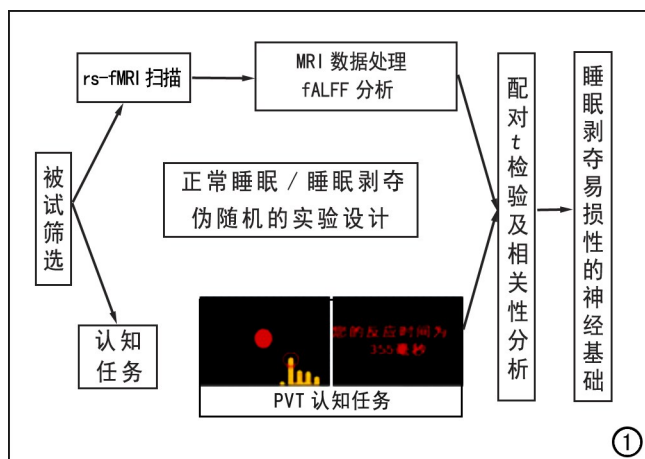


图 1 实验流程图。

PVT)^[10]。PVT 通过 E-prime 3.0 软件呈现,研究对象端坐在 14 寸笔记本电脑屏幕前,眼睛距离屏幕中心 50~60 cm,在 2~10 s 的随机时间间隔内,电脑屏幕中心会出现一个红点,要求研究对象观察屏幕并在红点出现时迅速按压键盘的空格键(即作出反应),记录其反应时间(图 2)。将反应时间大于 500 ms 的试次定义为注意力脱漏(attention lapses, AL),记录每例研究对象两次实验中的 AL 数量并将两次数量的差值(ALSD-ALRW)作为评估持续性注意力损伤的指标^[11-12]。本研究 PVT 任务中红点出现次数的均值为 54.68 ± 2.49 。

4. MRI 数据采集和后处理

使用 GE Discovery MR750 3.0T 磁共振扫描仪和 8 通道头线圈进行磁共振扫描。扫描时要求研究对象安静平卧于检查床,佩戴耳塞,保持清醒,放松睁眼,尽量避免思维活动。使用棉垫及胶带将研究对象头部固定以减少头动。每次扫描时通过麦克风提醒研究对象保持清醒,扫描结束后询问研究对象在扫描过程中是否保持清醒、有无睡着,同时记录心率及呼吸频率等数据。扫描序列和参数如下。矢状面 3D Bravo T₁ WI (结构像)扫描参数:TE 3.2 ms, TR 8.2 ms,视野 256 mm×256 mm,层厚 1.0 mm,矩阵 256×256,翻转角 12°,图像分辨率 1.0 mm×1.0 mm×1.0 mm,共采集 196 帧图像,总扫描时间 6 min 17 s;静息态 fMRI 横轴面扫描参数:GRE EPI 序列,TE 30 ms, TR 2000 ms,层厚 3.0 mm,层间距 0 mm,视野 240 mm×240 mm,翻转角 90°,层数 45,矩阵 128×128,210 个时间点共采集 9450 帧图像,总扫描时间 7.0 min。

由同一位高年资放射科医师 MRI 图像质量进行评价,并确保所有研究对象的脑部无器质性病变。首先,使用基于 Matlab 2016b 和 SPM12 的脑影像标准化计算平台(DPABI_V4.5)对 MRI 数据进行图像预处理^[13]。具体步骤:①手动去除前 10 个时间点的图像;②时间校正;③头动校正,排除 MRI 扫描中头动大于 1 mm(横移)和/或旋转角度大于 1°的数据。为了进一步减少微小头动对 fALFF 测量结果的影响,我们采用了更高级别的 Friston-24 模型对微小头动效应进

行回归处理(24 个参数,包括每个时间点的 6 个头动参数,相应时间点之前一个时间点的 6 个头动参数以及上述 12 个头动参数对应的平方项);④空间标准化,与 T₁ WI(结构像)联合配准;⑤采用 4 mm 半高全宽的高斯核进行平滑处理;⑥去线性漂移。然后将每个体素的时间序列转换成频率域,计算 0.01~0.08 Hz 频段的功率谱,接着对功率谱数据进行开方,得到 ALFF 值,再将各个频段的 ALFF 值相加获得全频段总和值,每个体素的 ALFF 值除以全频段 ALFF 总和值即得到 fALFF 值^[7]。

5. 统计学分析

使用 IBM SPSS 23.0 软件对数据进行统计分析。所有 AL 的数量以均数±标准差表示,采用配对样本的 Wilcoxon 符号秩检验对 RW 后和 SD 后的 AL 值进行比较,以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

影像学数据的统计分析共 3 步:第一步,使用 DPABI 软件对 RW 和 SD 后脑组织内 fALFF 的空间分布情况进行单样本 t 检验,体素水平采用错误检出率(false discovery rate, FDR)检验,检验水准 $\alpha = 0.05$;在簇(cluster)水平使用 AlphaSim 多重比较进行校正,设置 $P < 0.05$ 且体素阈值 > 54 个为结果具有统计学意义。第二步,使用 DPABI 软件对 RW 和 SD 后脑组织的 fALFF 变化进行配对 t 检验,同样在体素水平采用 FDR 检验,以 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义;在簇水平使用 AlphaSim 多重比较进行校正,设置 $P < 0.05$ 且体素阈值 > 54 个为结果具有统计学意义。第三步,将第二步得到的有差异脑区的 fALFF 值提取出来,计算 SD 后与 RW 后 fALFF 的差值,采用 Bonferroni 多重校正方法,与 ALS-ALRW 进行皮尔逊相关性分析,以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。对各脑区的定位和描述统一使用大脑自动解剖标记(anatomical automatic labeling, AAL)图谱进行命名^[14]。

结 果

在对所有研究对象的 MRI 数据进行头动校正后发现,4 例(男 1 例,女 3 例)研究对象的 MRI 数据因头动大于 1 mm(横移)和/或旋转角度大于 1°而被剔除。后续研究基于 50 例研究对象的数据进行分析,其中男 28 例,女 22 例,平均年龄(22.38 ± 1.76)岁,男、女性组之间平均年龄的差异无统计学意义($t = -0.263, P = 0.794$)。

行为学检查结果:RW 后执行 PVT 任务的平均 AL 数量为(1.18 ± 1.47)次,SD 后平均 AL 次数为(7.82 ± 6.36)次,两次测试中 AL 次数的差值(ALSD-AL

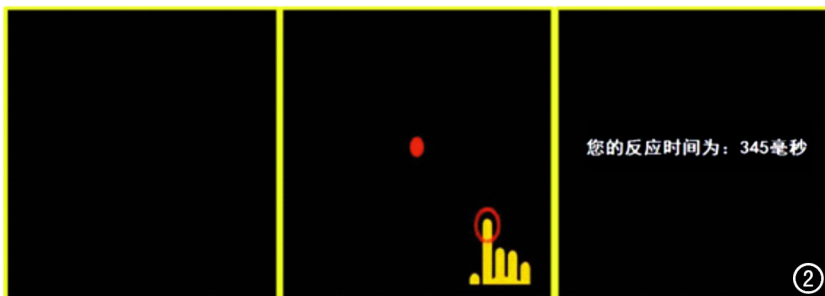


图 2 PVT 任务示意图。

RW)为 6.64 ± 5.87 , 两次测试之间 AL 次数的差异有显著统计学意义($Z = -6.104, P < 0.001$), 表明 SD 后持续性注意力水平明显下降。但男性组与女性组之间 AL 次数的差异无统计学意义($t = 1.427, P = 0.16$)。

不同睡眠状态下脑组织 fALFF 分析结果: 对 RW 及 SD 后的脑组织 fALFF 数据进行单样本 t 检验, 两种状态下大脑自发活动模式相似, 均表现为灰质区 fALFF 较高, 白质区域 fALFF 较低。fALFF 较高的脑区包括额叶、顶叶、枕叶和颞叶等新皮层区域, fALFF 较低的脑区包括丘脑、尾状核、壳核和苍白球等皮层下灰质区域(图 3)。

SD 后 fALFF 分析结果: 配对 t 检验结果显示, SD 对不同脑区 fALFF 存在显著影响。与 RW 后相比, 既有 fALFF 显著升高的脑区, 也有显著降低的脑区; 显著升高的脑区包括左侧丘脑、左侧颞中回、右侧中央后回、右侧脑干, 其中以左侧丘脑的改变最为显

著; fALFF 显著降低的脑区包括右侧额中回、右背外侧额上回、右侧小脑、右侧角回、右侧楔前叶、右侧颞下回、右侧眶部额中回、左侧角回合左侧小脑等区域(表 1, 图 4)。

4. 相关性分析

相关性分析结果显示(图 5): SD 和 RW 后左侧颞中回 fALFF 的差值与 AL 次数的差值(ALSD-AL-RW)之间呈正相关($r = 0.34, P = 0.01$); 右背外侧额上回 fALFF 的差值与 AL 数量的差值(ALSD-AL-RW)之间呈负相关($r = -0.32, P = 0.02$); 其它脑区 fALFF 的差值与 AL 数量的差值之间无显著相关性($P > 0.05$)。

讨 论

本研究采用自身前后对照试验设计, 运用 rs-fMRI 技术探讨 SD 对全脑 fALFF 的影响及 fALFF 与持续性注意力水平的相关性。行为学检测结果发现, 与清醒状态相比, SD 严重影响持续性注意力水平, 表现为 AL 数量的显著增加; 脑 MRI 结果显示, SD 后额顶区域的 fALFF 显著下降, 丘脑等皮层下灰质区域的 fALFF 显著上升; 进一步的相关性分析结果表明, 背外侧额上回及颞中回 fALFF 的变化与 AL 数量的差值直接具有显著相关性。

持续性注意力指在持续的一段时间内, 个体保持稳定警觉水平的能力, 是进行高级认知功能的基础^[15]。AL 是衡量注意力稳定性的一个非常敏感的指标, 我们发现 SD 后持续性注意力 AL 数量显著增加, 表明 SD 对持续性注意力的影响除了减弱平均反应速度以外, 另一个影响是显著增加了认知表现的不稳定性。

表 1 SD 与 RW 比较 fALFF 值显著变化的脑区

脑区(AAL)	体素大小	峰值的 MNI 坐标			t 值	
		X	Y	Z		
RW<SD						
右侧中央后回	5535	45	-21	42	-9.4508	
左侧丘脑	3321	-12	-12	0	-10.3102	
左侧颞中回	213	-45	-66	9	-6.3002	
右侧脑干	88	6	-21	-42	-6.0263	
RW>SD						
右侧额中回	6282	18	39	54	8.2450	
右侧小脑	543	21	-90	-45	7.9847	
左侧小脑	347	-42	-75	-48	7.3960	
右侧角回	801	54	-66	36	7.3347	
右侧楔前叶	963	15	-51	30	7.1918	
左侧角回	526	-51	-66	27	6.8309	
右侧颞下回	66	54	-12	-45	5.1712	
右背外侧额上回	76	21	-9	42	5.0213	
右侧眶部额中回	55	13	30	-33	5.0091	

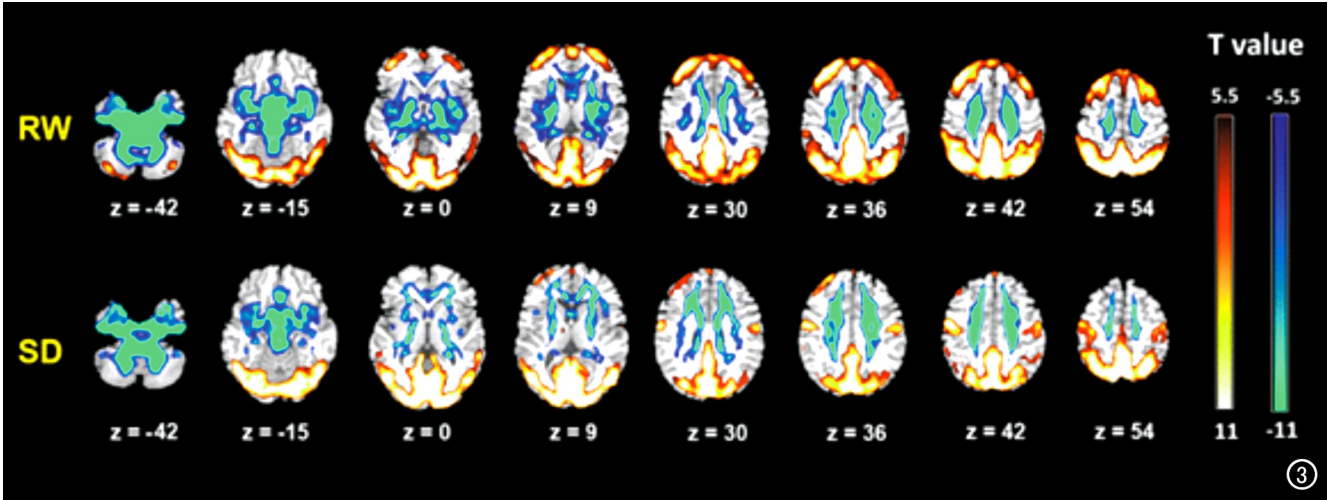


图 3 RW 及 SD 后全脑 fALFF 图。注: 图像左侧代表实际的右侧; 暖色调代表 fALFF 较高, 冷色调代表 fALFF 较低; RW: rest wakefulness 正常睡眠后清醒状态, SD: sleep deprivation 睡眠剥夺; $P < 0.05$, 图中 Z 值代表层数。

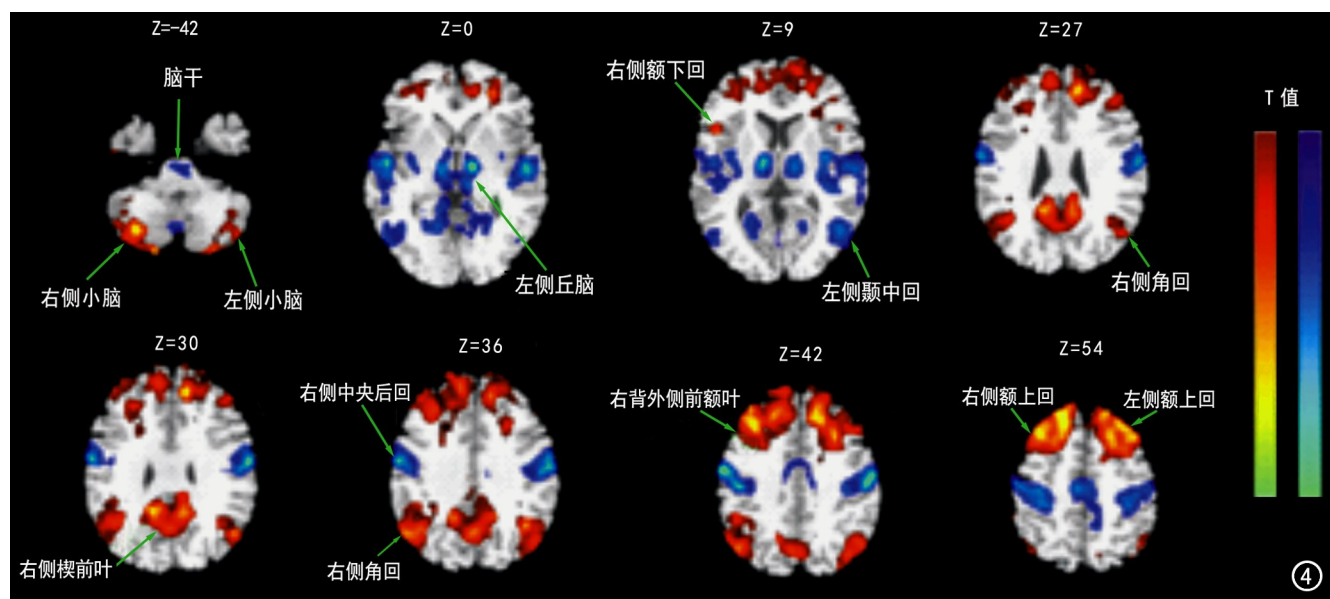


图 4 SD 后全脑 fALFF 值变化 ($P < 0.05$)。图像左侧代表实际的右侧;暖色调代表 RW 时 fALFF 大于 SD 时的脑区,冷色调代表 RW 时 fALFF 小于 SD 时的脑区;Z 值代表层数。

近年来有大量研究表明 SD 引起注意力、记忆及执行功能等行为学改变可能与特殊脑功能区变化有关^[16-18]。本组结果显示:相对于 RW,SD 后 fALFF 显著降低的脑区主要有额中回、背外侧额上回、角回和颞下回;而 fALFF 显著升高的脑区主要为丘脑及脑干。基于上述结果,笔者认为 SD 对人脑的主要影响为负责高级认知功能的额顶网络区域受 SD 影响较大,而丘脑等负责觉醒水平的皮层下区域可能通过增强自发活动水平,以一种补偿机制来保证注意力水平。

丘脑与睡眠和觉醒控制等意识的维持机制有关^[19]。已有来自损伤、药理学和遗传学等多方面研究的实验证据表明丘脑在睡眠-觉醒状态维持的多个方面发挥作用^[20]。本研究结果显示丘脑在 SD 后 fALFF 显著升高,在一定程度上验证了丘脑在睡眠觉醒状态及注意力水平的维持上发挥重要作用。

本研究的相关分析结果发现,SD 后左侧颞中回

fALFF 的变化与 AL 数量的差值呈正相关,右背外侧额上回 fALFF 的变化与 AL 数量的差值呈负相关。颞叶是大脑中多种感知觉信息早期加工的主要脑区,其中颞中回又是视听觉信息的整合处理中枢,有研究认为颞中回等区域在 SD 之后活动程度的变化是个体在持续觉醒的条件下维持清醒和警觉的需要^[21-23],本研究结果提示 SD 后颞中回区域的局部自发活动水平的下降会导致 PVT 任务 AL 数量的增加,也就是个体注意力的稳定性水平下降。注意力受自上而下(top-down)的认知因素和自下而上(bottom-up)的感觉因素的影响^[24],作为大脑中负责认知控制功能的核心脑区,背外侧前额叶是注意力自上而下调控的重要区域。最近一项研究发现 SD 后背外侧前额叶的葡萄糖代谢水平显著下降,并且与 PVT 任务的平均反应时呈显著相关^[25]。这与本研究的结果基本一致,提示 SD 之后背外侧前额叶局部神经元整合能力出现了下降,这

可能是导致 SD 之后高级认知等能力下降的重要原因,SD 后机体需要募集更多的与高级认知功能相关的特异性脑区参与完成一系列的功能活动,使机体保持警觉状态并完成认知任务。本研究主要存在以下 3 点不足:首先,在研究对象的选取上以高校大学生为主,年龄在 19~26 岁,年龄偏小,具有一定的选择偏倚;其次,在研究对象的睡眠质量评价上仅使用了睡眠日记,缺少相关睡眠仪器的使用,如脑电图检测等,进一步的研究中可选择使用;最后,本研

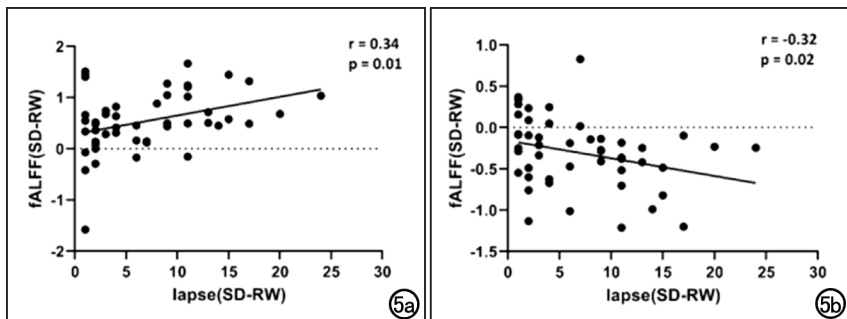


图 5 相关性分析散点图。a)SD 和 RW 后左侧颞中回 fALFF 差值与 AL 次数的差值之间呈正相关;b)SD 和 RW 后右背外侧额上 fALFF 差值与 AL 次数的差值之间呈负相关。

究仅采集了 24h SD 后的功能 MRI 数据,未进行多时间点的数据采集,不能进行动态观察,另外,在今后的研究中也会考虑延长 SD 的时间来观察后续变化。

综上所述,本研究结果显示短期睡眠剥夺后健康成人的持续性注意力显著下降,PVT 任务 AL 数量显著增加。进一步研究发现 SD 后代表自发活动水平的 fALFF 有显著变化,主要表现为额顶网络区域的下降以及丘脑觉醒区域的增加,并且背外侧额上回与颞中回 fALFF 指标的差值与反映持续性注意力水平的 PVT 任务中 AL 次数的差值之间具有显著相关性,可能是 SD 后持续性注意力下降的重要神经机制。

参考文献:

- [1] Basner M, Rao H, Goel N, et al. Sleep deprivation and neurobehavioral dynamics[J]. *Curr Opin Neurobiol*, 2013, 23(5): 854-863.
- [2] Irwin MR, Olmstead R, Carroll JE. Sleep disturbance, sleep duration, and inflammation: a systematic review and Meta-analysis of cohort studies and experimental sleep deprivation[J]. *Biol Psychiatry*, 2015, 80(1): 40-52.
- [3] Jeffrey M, Ellenbogen. Cognitive benefits of sleep and their loss due to sleep deprivation[J]. *Neurology*, 2005, 64(7): E25-E27. DOI: 10.1212/01.WNL.0000159942.64562.AD.
- [4] Chee MW, Chuah YM. Functional neuroimaging and behavioral correlates of capacity decline in visual short-term memory after sleep deprivation[J]. *Proc Nat Acad Sci USA*, 2007, 104(22): 9487-9492.
- [5] Chen Jie, Liang Jie, Lin Xiao, et al. Sleep deprivation promotes habitual control over goal-directed control: behavioral and neuroimaging evidence[J/OL]. *J Neurosci*, 2017, 37: e11979-e11992. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1612-17.2017.
- [6] Ning M, Dinges DF, Mathias B, et al. How acute total sleep loss affects the attending brain: a Meta-analysis of neuroimaging studies[J]. *Sleep*, 2015, 38(2): 233-240.
- [7] Zou QH, Zhu C, Yang Y, et al. An improved approach to detection of amplitude of low-frequency fluctuation (ALFF) for resting-state fMRI: fractional ALFF[J]. *J Neurosci Meth*, 2008, 172(1): 137-141.
- [8] 张斌,郝彦利,荣润国.中文版清晨型/夜晚型量表的信度与效度研究[A].中国心理卫生协会.首届中青年心理卫生学者学术研讨会论文集[C].中国心理卫生协会和中国心理卫生协会,2006.
- [9] van Dongen Hans PA, Maislin Greg, Mullington Janet M, et al. The cumulative cost of additional wakefulness: dose-response effects on neurobehavioral functions and sleep physiology from chronic sleep restriction and total sleep deprivation[J]. *Sleep*, 2003, 26(2): 117-126.
- [10] Lim J, Dinges DF. Sleep deprivation and vigilant attention[J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2008, 1129(1): 305-322.
- [11] Bradley AJ, Anderson KN, Gallagher P, et al. The association between sleep and cognitive abnormalities in bipolar disorder[J]. *Psychol Med*, 2020, 50(1): 125-132.
- [12] Plante DT, Hagen EW, Finn LA, et al. Impaired neurobehavioral alertness quantified by the psychomotor vigilance task is associated with depression in the wisconsin sleep cohort study[J].

Sleep, 2019, 42(Suppl1): S361-S361.

- [13] Yan CG, Wang XD, Zuo XN, et al. DPABI: data processing & analysis for (resting-state) brain imaging[J]. *Neuroinformatics*, 2016, 14(3): 339-351.
- [14] Tzourio-Mazoyer N, Landeau B, Papathanassiou D, et al. Automated anatomical labeling of activations in SPM using a macroscopic anatomical parcellation of the MNI MRI single-subject brain[J/OL]. *Neuroimage*, 2002, 15: e273-e289. DOI: 10.1006/nimg.2001.0978
- [15] Whitney P, Hinson JM, Satterfield BC, et al. Sleep deprivation diminishes attentional control effectiveness and impairs flexible adaptation to changing conditions[J/OL]. *SciRep*, 2017, 7(1): e16020. DOI: 10.1038/s41598-017-16165-z
- [16] Chee Michael WL, Chuah Lisa YM, Venkatraman Vinod, et al. Functional imaging of working memory following normal sleep and after 24 and 35h of sleep deprivation: correlations of frontoparietal activation with performance[J/OL]. *Neuroimage*, 2006, 31: e419-e428. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2005.12.001
- [17] Zhu YQ, Xi YB, Sun JB, et al. Neural correlates of dynamic changes in working memory performance during one night of sleep deprivation[J/OL]. *Hum Brain Mapp*, 2019, 40: e3265-3278. DOI: 10.1002/hbm.24596
- [18] Hudson Amanda N, van Dongen Hans PA, Honn Kimberly A. Sleep deprivation, vigilant attention, and brain function: a review[J/OL]. *Neuropsychopharmacology*, 2020, 45: e21-e30. DOI: 10.1038/s41386-019-0432-6.
- [19] Lehmann Mick, Hock Andreas, Zoelch Niklaus et al. Dynamic metabolic changes in the human thalamus at the transition from waking to sleep-insights from simultaneous functional MR spectroscopy and polysomnography[J]. *Front Neurosci*, 2019, 13: 1158. DOI: 10.3389/fnins.2019.01158
- [20] Thomas CG, Claudio LAB, Antoine RA. Sleep-wake control and the thalamus[J/OL]. *Curr Opin Neurobiol*, 2018, 52: e188-e197. DOI: 10.1016/j.conb.2018.08.002
- [21] Zhang L, Huang Y, Zhang Y, et al. Enhanced high-frequency precuneus-cortical effective connectivity is associated with decreased sensory gating following total sleep deprivation[J/OL]. *Neuroimage*, 2019, 1972: e255-e263. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2019.04.057
- [22] Bak N, Glenthøj BY, Rostrup E, et al. Source localization of sensory gating: a combined EEG and fMRI study in healthy volunteers[J]. *Neuroimage*, 2011, 54(4): 2711-2718.
- [23] Mayer AR, Hanlon FM, Franco AR, et al. The neural networks underlying auditory sensory gating[J]. *Neuroimage*, 2009, 44(1): 182-189.
- [24] Li L, Gratton C, Yao D, et al. Role of frontal and parietal cortices in the control of bottom-up and top-down attention in humans[J]. *Brain Res*, 2010, 1344: 173-184. DOI: 10.1016/j.brainres.2010.05.016
- [25] Xu J, Zhu Y, Fu C, et al. Frontal metabolic activity contributes to individual differences in vulnerability toward total sleep deprivation-induced changes in cognitive function[J]. *J Sleep Res*, 2016, 25(2): 169-180.

(收稿日期: 2019-11-26 修回日期: 2020-09-29)