

# 睡眠剥夺影响数字记忆的功能磁共振成像研究

樊双义 李志方 孙彬彬 杨维晰

**【摘要】 研究背景** 长时间连续作业易导致大脑疲劳,已有证据显示脑疲劳对作业者认知功能和行为反应能力具有严重损害作用,因此揭示连续作业和睡眠剥夺对认知功能影响的机制,有助于对抗连续作业所致疲劳,提高连续作业能力。本研究通过分析睡眠剥夺前后功能磁共振成像(fMRI)特点,探讨睡眠剥夺影响学习记忆的神经机制。**方法** 共6例健康男性志愿者接受48 h睡眠剥夺,采用组块设计方法评价睡眠剥夺前后数字记忆功能变化,fMRI比较数字记忆编码、维持和提取阶段各脑区的激活特点。**结果** 睡眠剥夺48 h,受试者对4~7个0~9数字记忆的错误率并未增加(均 $P > 0.05$ );对4~6个0~9数字记忆的反应时间与睡眠剥夺前无明显差异(均 $P > 0.05$ ),仅7个0~9数字记忆的反应时间增加( $P = 0.005$ )。睡眠剥夺后激活减弱的脑区在数字记忆试验编码阶段为左侧海马旁回 Brodmann 30区、颞上回 Brodmann 42区、岛叶 Brodmann 41区和额叶 Brodmann 6区;在维持阶段分别为左侧颞上回 Brodmann 38区、颞中回 Brodmann 21区、海马旁回和杏仁核 Brodmann 30区、额中回 Brodmann 47区、豆状核和丘脑,以及右侧豆状核、左侧扣带前回 Brodmann 30区、右侧扣带前回 Brodmann 30区、双侧扣带前回 Brodmann 24区、双侧额中回和额内侧回 Brodmann 6区;提取阶段包括双侧海马、右侧杏仁核和顶下小叶 Brodmann 40区、左侧楔前叶 Brodmann 19区和丘脑。**结论** 在数字记忆的不同阶段,机体通过激活不同的脑区来维持清醒状态,48 h睡眠剥夺后参与数字记忆的大脑皮质及皮质下结构广泛受损。

**【关键词】** 睡眠剥夺; 记忆; 磁共振成像; 神经心理学测验

## A functional MRI study of the influence of sleep deprivation on digital memory in human brain

FAN Shuang-yi, LI Zhi-fang, SUN Bin-bin, YANG Wei-xi

Department of Neurology, Affiliated Hospital of Academy of Military Medical Sciences, Beijing 100071, China

Corresponding author: FAN Shuang-yi (Email: fanshy309@sina.com)

**【Abstract】 Background** Working for long hours often leads to mental fatigue. There is evidence that mental fatigue is serious damage to cognitive function and behavior of the operator. Revealing the mechanism of continuous operation and sleep deprivation (SD) on cognitive function, will help to combat the fatigue caused by continuous operation and to improve capacity of operators. This functional magnetic resonance imaging (fMRI) study focused on the influence of sleep deprivation on digital memory in human brain. **Methods** Totally 6 healthy subjects underwent a digital memory encoding, maintenance and retrieval session during fMRI scanning before and after 48 h sleep deprivation. **Results** The digital memory test had the same error rate before and after sleep deprivation ( $P > 0.05$ , for all), but the response time of seven-number memory was longer after sleep deprivation ( $P = 0.005$ ). During encoding trials decreased fMRI regions of significant activation between sleep control and sleep deprivation were in left parahippocampal gyrus Brodmann 30, left superior temporal gyrus Brodmann 42, left insular lobe Brodmann 41 and left frontal lobe Brodmann 6. During maintenance trials decreased fMRI regions of significant activation were at left superior temporal gyrus Brodmann 38, left middle temporal gyrus Brodmann 21, left parahippocampus and amygdaloid nucleus Brodmann 30, left middle frontal gyrus Brodmann 47, left lenticular nucleus and thalamus, right lenticular nucleus, left retrosplenial granular cortex Brodmann 30,

doi:10.3969/j.issn.1672-6731.2013.05.010

基金项目:国家自然科学基金资助项目(项目编号:81100897);国家科技支撑计划课题(项目编号:2012BAI38B01);军队“十一五”科技攻关项目(项目编号:08-G280);解放军总医院科技创新课题(项目编号:07CX313);军事医学科学院附属医院创新科研基金资助项目(项目编号:2012ycx18)

作者单位:100071 北京,军事医学科学院附属医院神经内科

通讯作者:樊双义 (Email: fanshy309@sina.com)

right retrosplenial granular cortex Brodmann 30, bilateral cingulate gyrus Brodmann 24 and bilateral middle frontal gyrus, medial frontal gyrus Brodmann 6. During retrieval trials decreased fMRI regions of significantly positive activation were at bilateral hippocampus, right amygdaloid nucleus and inferior parietal lobule Brodmann 40, left precuneus Brodmann 19 and thalamus. **Conclusion** Different brain regions are activated at different stages of the digital memory to keep awake after sleep deprivation. The cerebral cortical and subcortical structures participated digital memory will be injured after 48 h of sleep deprivation.

**【Key words】** Sleep deprivation; Memory; Magnetic resonance imaging; Neuropsychological tests

This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 81100897), Supporting Program for Science and Technology Research of China (No. 2012BAI38B01), Key Science and Technology Project of "Eleventh Five - Year Plan" of Chinese PLA (No. 08 - G280), Scientific and Technological Innovation Project of Chinese PLA General Hospital (No. 07CX313) and Affiliated Hospital of Academy of Military Medical Sciences (No. 2012ycx18).

睡眠剥夺(SD)系指由于自身或环境因素引起的睡眠缺失状态,即24小时中睡眠不足4小时,并引起情绪、学习记忆、免疫功能等一系列改变,伴疲劳增加及心理、生理甚至行为改变。睡眠剥夺可以导致短期记忆力减退、注意力分散、警觉力和自知力下降、失定向等<sup>[1-4]</sup>。本研究采用认知神经科学领域无创性脑功能磁共振成像(fMRI)技术,以阿拉伯数字为试验材料,观察睡眠剥夺前后数字记忆编码、维持和提取过程中相关激活脑区的激活规律,进而探讨睡眠剥夺影响学习记忆的神经机制。

## 对象与方法

### 一、研究对象

选择的6例受试者均来自中国人民解放军某部接受体格检查的健康志愿者,均为男性;年龄18~29岁,平均(22±4)岁;受教育程度>12年;均为右利手。平时能够严格遵守部队作息制度,睡眠时间为晚间22:00至次日6:00,每晚保证8h睡眠。所有受试者均无精神障碍,且入组时精神状况良好,既往无严重躯体疾病病史、颅脑创伤史、药物及咖啡或酒精依赖史。本研究经军事医学科学院医学伦理委员会批准,受试者知情同意。

### 二、研究方法

1. 48 h睡眠剥夺试验 受试者剥夺睡眠48 h,剥夺期间为其提供良好的饮食、充足饮水和水果,但禁止饮用咖啡及其他兴奋性物质;同时提供各种娱乐条件如打牌、看电视、打球等。监督者分为3组轮流值班,采取一对一监督,受试者始终保持清醒状态,直至试验结束。

2. 数字记忆试验 睡眠剥夺前后均采用组块设计(block design),根据George Miller 1956年提出的

组块学说,“神奇数字”即为能贮存在短时记忆中供即时回忆的数目。随机出现4~7个数字共6种组合(6个组块)、每种组合各4个时相、每一时相共持续30 s,交替进行,总历时4 min。观察数字记忆错误率和反应时间,计算机自动计算。数字记忆试验分为编码阶段、维持阶段和提取阶段。在任务执行过程中进行fMRI扫描时,患者头戴耳机以降低噪音并通过头盔上的平面反射镜注视位于扫描仪前方的投影屏幕,根据提示完成认知作业。每一组块开始后,屏幕上即呈现数字0~9之间的4~7个数字,依次为4、5、6、7个顺序出现,即编码阶段;然后屏幕空白30 s以强化识记,即维持阶段;最后屏幕上依次呈现数字0~9之间的4~7个数字,此时要求受试者判断所呈现的数字是否出现过,如出现过,按左键,否则按右键,此为提取阶段。在所有组块任务中,受试者按左右键的概率相同,判断正确计为1分、判断错误计为0分;同时记录判断数字是否出现过的反应时间。

3. MRI检查 所有受试者均于进行数字记忆试验的同时进行MRI扫描。(1)检查方法:采用德国Siemens公司生产的3.0T MAGNETOM Trio Tim MRI扫描仪,8通道相控阵头线圈,平卧位,保持安静,软垫固定头部。结构像采用磁化准备快速梯度回波(MPRAGE)序列获得T<sub>1</sub>WI,重复时间(TR)为2300 ms、回波时间(TE)为3.01 ms,视野(FOV)为256 mm×240 mm,矩阵256×256,翻转角度(FA)9°,扫描层厚1 mm、层间距0.50 mm,层数176层,扫描全部脑组织。激活态功能像采用梯度回波序列-回波平面成像(GRE-EPI),重复时间2000 ms、回波时间30 ms,视野210 mm×100 mm,矩阵64×64,翻转角度90°,扫描层厚4 mm、层间距0,层数30层,扫描

全部脑组织,共采集 210 个时间点。(2)数据处理与分析:由同一位具有临床经验的神经放射科医师对受试者 MRI 图像进行评价,以确保无图像质量问题和脑部器质性病变。采用 MRicro 软件(<http://www.mricro.com>)检查原始数据,排除图像中伪影过大或不完整数据。数据处理基于 MATLAB2009a 软件,采用 DPARSFD 软件对 fMRI 原始数据进行预处理,包括 DICOM 格式转换、时间校正、头动校正、空间标准化(EPI 模板)。其中头动校正可获得受试者水平头动与旋转头动图像,依据头动校正曲线,剔除头动平移 > 1 mm 和(或)旋转角度 > 1°的数据。将头动校正后数据配准到蒙特利尔神经病学研究所(MNI)空间坐标,重新采样到 3 mm × 3 mm × 3 mm 立方体素。然后,对预处理数据进行去线性漂移和滤波(0.01 ~ 0.08 Hz),REST 软件(<http://www.restfmri.sourceforge.net>)计算全脑每一像素的 ReHo 值,每一受试者获得 1 张 ReHo 图像,最后进行高斯平滑,采用 SPM5 软件对睡眠剥夺前后的试验数据进行配对 *t* 检验,设定差异有统计学意义( $P < 0.01$ )的体素体积  $\geq 270 \text{ mm}^3$ 。

4. 统计分析方法 以 SPSS 13.0 统计软件进行数据处理与分析。计量资料以均数 ± 标准差( $\bar{x} \pm s$ )表示,数字记忆试验错误率和反应时间的比较采用配对 *t* 检验。以  $P \leq 0.05$  为差异具有统计学意义。

## 结 果

### 一、睡眠剥夺前后数字记忆试验成绩的评价

所有受试者睡眠剥夺前后数字记忆试验错误率比较,差异无统计学意义(均  $P > 0.05$ , 表 1)。当屏幕上出现的记忆数字为 4 ~ 6 个时,受试者睡眠剥夺前后数字记忆试验反应时间差异无统计学意义(均  $P > 0.05$ );当出现 7 个记忆数字时,睡眠剥夺后反应时间延长,且差异具有统计学意义( $P = 0.005$ , 表 2)。提示经过 48 h 的完全性睡眠剥夺,受试者表现为困倦、乏力、精神萎靡等不适感,然而进入试验后仍可集中注意力,短期记忆无明显损害,但相对较复杂的短期记忆(即出现 7 个记忆数字时)受损。

### 二、睡眠剥夺前后不同脑区激活程度的 fMRI 观察

与睡眠剥夺前相比,在数字记忆试验编码阶段,睡眠剥夺后激活减弱的脑区分别为左侧海马旁回 Brodmann 30 区、颞上回 Brodmann 42 区、岛叶 Brodmann 41 区和额叶 Brodmann 6 区(图 1);在维持

表 1 受试者睡眠剥夺前后数字记忆试验错误率的比较( $\bar{x} \pm s, \%$ )

Table 1. Comparison of the error rate in digital memory test before and after sleep deprivation ( $\bar{x} \pm s, \%$ )

Group	N	Number of digit			
		4	5	6	7
Pre-SD	6	8.30 ± 10.60	0	11.20 ± 10.20	8.20 ± 5.40
Post-SD	6	9.70 ± 10.80	4.20 ± 7.10	11.00 ± 4.60	13.70 ± 10.10
P value		0.312	0.103	0.482	0.171

SD, sleep deprivation, 睡眠剥夺。The same as table below

表 2 受试者睡眠剥夺前后数字记忆试验反应时间的比较( $\bar{x} \pm s, \text{ms}$ )

Table 2. Comparison of the reponse time in digital memory test before and after sleep deprivation ( $\bar{x} \pm s, \text{ms}$ )

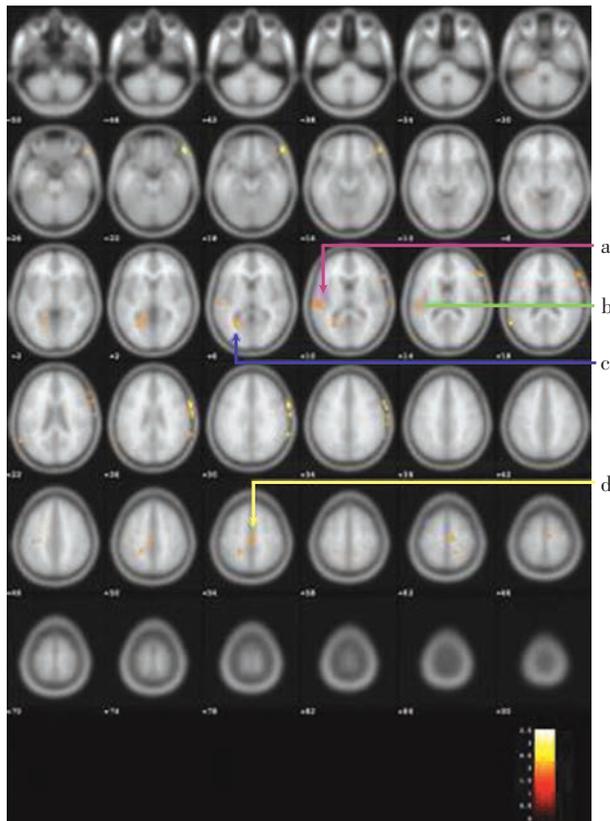
Group	N	Number of digit			
		4	5	6	7
Pre-SD	6	868.00 ± 85.50	720.40 ± 81.40	791.20 ± 78.50	738.00 ± 82.10
Post-SD	6	878.20 ± 93.60	736.60 ± 67.30	829.30 ± 75.30	824.30 ± 52.30
P value		0.372	0.253	0.124	0.005

阶段,睡眠剥夺后激活减弱脑区较其他阶段增多,包括左侧颞上回 Brodmann 38 区、颞中回 Brodmann 21 区、海马旁回和杏仁核 Brodmann 30 区、额中回 Brodmann 47 区、豆状核和丘脑,以及右侧豆状核、左侧扣带后回 Brodmann 30 区、右侧扣带后回 Brodmann 30 区、双侧扣带回 Brodmann 24 区、双侧额中回和额内侧回 Brodmann 6 区(图 2);在提取阶段,睡眠剥夺后激活减弱的脑区为双侧海马、右侧杏仁核和顶下小叶 Brodmann 40 区、左侧楔前叶 Brodmann 19 区和丘脑(图 3)。

## 讨 论

睡眠剥夺对学习记忆的影响已成为近年关注的焦点。越来越多的研究表明,睡眠剥夺导致认知损害与睡眠剥夺时间呈正相关,觉醒时间愈长,认知损害愈严重<sup>[1-2]</sup>。动物实验证实,睡眠剥夺可以损害大鼠 Morris 水迷宫实验位置学习、复杂性压杆操作训练等海马依赖性或非依赖性记忆<sup>[3-4]</sup>。一项历时 3 小时的快速眼动睡眠期(REM)睡眠剥夺试验结果显示,受试者与情感相关的陈述性记忆不能维持,知觉学习后进行整夜快速眼动睡眠剥夺,其表现为表现仍无明显改善。

数字记忆是人脑的基本认知功能,数字记忆从时程上来讲,属于短时记忆的范围,要求受试者在



- a: Left superior temporal gyrus Brodmann 42
- b: Left insular lobe Brodmann 41
- c: Left parahippocampal gyrus Brodmann 30
- d: Frontal lobe Brodmann 6

**图 1** fMRI 检查显示的彩色明亮颜色区域为数字记忆试验编码阶段被激活的脑区。与睡眠剥夺 48 h 前相比,睡眠剥夺后激活减弱的脑区分别为左侧海马旁回 Brodmann 30 区、颞上回 Brodmann 42 区、岛叶 Brodmann 41 区和额叶 Brodmann 6 区

**Figure 1** fMRI revealed the activated cerebral regions (bright color indicates) during digital memory encoding session. Attenuated activation was seen in left parahippocampal gyrus Brodmann 30, superior temporal gyrus Brodmann 42, insular lobe Brodmann 41, and frontal lobe Brodmann 6 after sleep deprivation.

较短的时间内将不断出现的数字信息记忆、贮存并与以前记住的数字进行比较、判断,数字信息在此过程中进行了初步加工。相关研究显示,在数字表征和比较过程中,额顶枕叶皮质、感觉和运动功能区均出现一定激活<sup>[5]</sup>。一般认为,额叶是工作记忆的主要脑区,顶叶与数字比较、近似计算和估算等认知功能有关,枕叶则负责处理数字视觉信息,基底核贮存程序性算术知识,故额叶和顶叶被认为是数字加工最重要的功能脑区<sup>[6]</sup>。然而针对睡眠剥夺条件下数字记忆不同认知成分,即编码、维持和提取阶段皮质激活模式及与负荷变化相关脑区的系统研究,目前仍较少。fMRI 可以动态观察局部脑血流动力学变化,实时观察皮质功能活跃和功能静止时的信号变化,不仅可以在结构上定位参与数字记忆编码或提取的脑区,而且可以在功能上明确二者的分工协作关系。

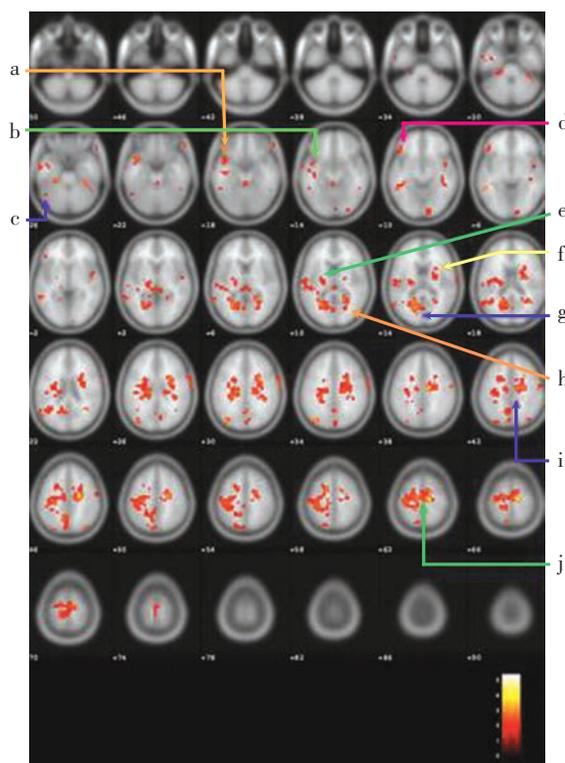
记忆功能一直是认知神经科学的研究热点。记忆过程包括按时间顺序排列的不同认知成分和过程,即编码期(encoding)、维持期(maintenance)和提取期(retrieval)。这一记忆过程依赖于记忆神经环路的作用,其中海马通过联系内嗅区皮质(EC),

以及听觉和视觉中枢等皮质结构参与编码和提取过程。既往研究显示,执行数字记忆短时任务时,激活的脑区包括双侧额顶枕叶、颞下回、扣带回、壳核、尾状核和小脑,其中以左侧枕叶激活最为显著;执行数字记忆长时任务时,激活的脑区包括双侧额顶颞枕叶、左侧扣带回、双侧纹状体、双侧丘脑<sup>[7]</sup>。一项关于视觉-听觉数字记忆的 fMRI 研究显示,在执行这些数字任务时,有纹状体边缘区的激活。本研究采用组块设计,任务是屏幕上依次呈现阿拉伯数字 0~9 之间 4~7 个数字,4、5、6、7 个顺序出现,即编码阶段;然后屏幕空白 30 秒以强化识记,即维持阶段;最后屏幕上再依次呈现 4~7 个数字,要求受试者判断所呈现的数字是否出现过,即提取阶段。目的是着重研究数字记忆中数字信息的贮存、加工及提取在睡眠剥夺前后哪些脑区改变明显。结果显示,在数字记忆试验编码阶段,睡眠剥夺后激活减弱的脑区分别为左侧海马旁回、颞上回、岛叶和额叶;维持阶段脑区激活较其他阶段明显增多,睡眠剥夺后激活减弱的脑区为左侧颞上回、颞中回、海马旁回和杏仁核、额中回、豆状核和丘脑,以及右侧豆状核、双侧扣带回、双侧额中回和额内

- a: Left superior temporal gyrus Brodmann 38  
 b: Left parahippocampal gyrus and amygdaloid nucleus Brodmann 30  
 c: Left middle temporal gyrus Brodmann 21  
 d: Left middle frontal gyrus Brodmann 47  
 e: Left lenticular nucleus and thalamus  
 f: Right lenticular nucleus  
 g: Left retrosplenial granular cortex Brodmann 30  
 h: Right retrosplenial granular cortex Brodmann 30  
 i: Bilateral cingulate gyrus Brodmann 24  
 j: Bilateral middle frontal gyrus and medial frontal gyrus Brodmann 6

图 2 fMRI 检查显示的彩色明亮颜色区域为数字记忆试验维持阶段激活的脑区。与睡眠剥夺前相比,睡眠剥夺后激活减弱的脑区为左侧颞上回 Brodmann 38 区、颞中回 Brodmann 21 区、海马旁回和杏仁核 Brodmann 30 区、额中回 Brodmann 47 区、豆状核和丘脑、右侧豆状核、左侧扣带回 Brodmann 30 区、右侧扣带回 Brodmann 30 区、双侧扣带回 Brodmann 24 区、双侧额中回和额内侧回 Brodmann 6 区

Figure 2 fMRI revealed the activated cerebral regions (bright color indicates) during digital memory maintenance session. Attenuated activation was seen in left superior temporal gyrus Brodmann 38, middle temporal gyrus Brodmann 21, parahippocampal gyrus and amygdaloid nucleus Brodmann 30, middle frontal gyrus Brodmann 47, lenticular nucleus and thalamus, right lenticular nucleus, left retrosplenial granular cortex Brodmann 30, right retrosplenial granular cortex Brodmann 30, bilateral cingulate gyrus Brodmann 24, bilateral middle frontal gyrus and medial frontal gyrus Brodmann 6 after sleep deprivation.



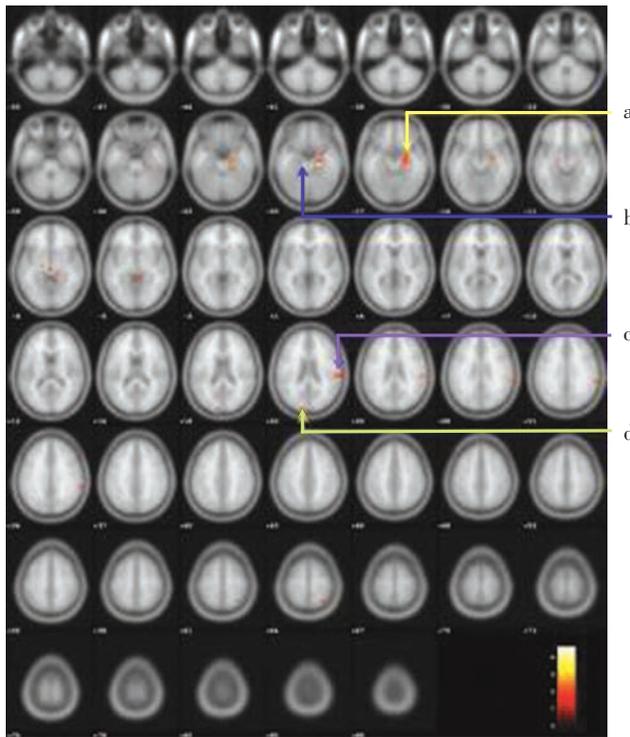
侧回;提取阶段睡眠剥夺后激活减弱的脑区为双侧海马、右侧杏仁核和顶小叶、左侧楔前叶和丘脑。上述这些脑区均为影响优势半球相关数字记忆的脑区,这与数字作为语言信息的一种主要在优势半球进行处理的理论相一致<sup>[8]</sup>。

睡眠剥夺对认知功能的影响为一持续变化的过程。随着剥夺时间的延长,认知损害会越来越严重<sup>[9-10]</sup>。宋国萍等<sup>[11]</sup>在 21、45 和 69 小时的睡眠剥夺后对受试者进行背景记忆测验,其结果显示随着睡眠剥夺时间的延长,反应时间延长、漏过率增加等认知损害症状更为明显。在本研究中,予以 48 小时睡眠剥夺后,受试者对 4、5、6 和 7 个数字记忆的错误率并未增加;对 4、5 和 6 个数字记忆的反应时间并未比睡眠剥夺前延长,仅对 7 个数字记忆的反应时间较睡眠剥夺前明显延长。推测可能与我们的数字记忆模式过于简单,不足以引起睡眠剥夺前后错误率和反应时间发生改变有关。

睡眠剥夺引起认知损害的机制主要有以下几种假说:(1)脱漏假说(lapse hypothesis)。即在非睡眠剥夺条件下对环境应答的正常反应,但在睡眠剥夺条件下不反应,即反应脱漏。(2)唤醒水平下降假说。由 Sanders<sup>[12]</sup>提出,认为长时间觉醒后可出现唤

醒水平下降,唤醒阈值升高,导致脑力资源降低。当脑力资源低于某种认知任务的需要时,即出现工作成绩下降。如果进一步延长睡眠剥夺时间,受试者脑力资源在延长反应时间后仍不能满足认知任务的需要,即可能出现正确率下降。(3)滤除无关刺激困难假说。由 Das 等<sup>[13]</sup>提出。认为受试者在疲劳状态下认知功能下降可能是由于随着任务时间的延长,不能滤除无关刺激,从而不能将注意力集中在正在进行的任务上所致。(4)神经元联系暂时中断假说。即睡眠剥夺达一定程度时,中枢神经系统局部神经回路联系暂时终止,不发生联系,从而使该神经回路所承担的脑功能受损<sup>[14]</sup>。

我们的研究表明,在 48 小时睡眠剥夺后广泛参与数字记忆的大脑皮质及皮质下结构受损,血氧水平依赖(BOLD)信号有所减弱,这是脑疲劳后相对少数的抑制性神经元削弱了大部分皮质活动引起的。然而我们的研究样本例数较小,试验结果有一定的局限性,仍待进一步研究。在既往观察空间工作记忆脑结构的研究中,大多强调前额叶的作用,但在具体脑区方面仍存在争论,或强调腹侧前额叶皮质、背外侧前额叶皮质(DLPFC)或额上回的作用,产生这种不一致的原因十分复杂<sup>[15]</sup>。神经解剖学



a: Right amygdaloid nucleus  
b: Left hippocampus  
c: Right inferior parietal lobule Brodmann 40  
d: Left precuneus Brodmann 19

图3 fMRI检查显示的彩色明亮颜色区域为数字记忆试验提取阶段被激活的脑区。与睡眠剥夺48 h前相比,睡眠剥夺后激活减弱的脑区为双侧海马、右侧杏仁核和顶下小叶 Brodmann 40 区、左侧楔前叶 Brodmann 19 区和丘脑

**Figure 3** fMRI revealed the activated cerebral regions (bright color indicates) during digital memory retrieval session. Attenuated activation was seen in bilateral hippocampus, right amygdaloid nucleus and inferior parietal lobule Brodmann 40, left precuneus Brodmann 19 after sleep deprivation.

研究已经证实边缘系统在情绪、行为和记忆中起重要作用,参与空间工作记忆的脑区不可能是单一脑区,脑区的激活应是一个网状结构,较复杂的任务对于网络的激活更显著。但迄今为止,将参与空间工作记忆贮存和复述过程的脑区分离的试验研究仍很少,利用神经电生理学、fMRI 等手段进一步研究睡眠剥夺后数字记忆即显得至关重要。

#### 参 考 文 献

- [1] Diekelmann S, Born J. The memory function of sleep. *Nat Rev Neurosci*, 2010, 11:114-126.
- [2] Li Y, Wang DC, Hu ZA. Memory consolidating during sleep. *Sheng Wu Hua Xue Yu Sheng Wu Wu Li Jin Zhan*, 2008, 35: 1219-1224. [李洋, 王得春, 胡志安. 睡眠的记忆巩固功能研究进展. *生物化学与生物物理进展*, 2008, 35:1219-1224.]
- [3] Jackson ML, Gunzelmann G, Whitney P, Hinson J M, Belenky G, Rabat A, Van Dongen HP. Deconstructing and reconstructing cognitive performance in sleep deprivation. *Sleep Med Rev*, 2013, 17:215-225.
- [4] Joo EY, Yoon CW, Koo DL, Kim D, Hong SB. Adverse effects of 24 hours of sleep deprivation on cognition and stress hormones. *J Clin Neurol*, 2012, 8:146-150.
- [5] Tang Y, Zhang W, Chen K, Feng S, Ji Y, Shen J, Reiman EM, Liu Y. Arithmetic processing in the brain shaped by cultures. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2006, 103:10775-10780.
- [6] Liu J, Ye ZX, JIN H, Ling XY, Huang L, Mo L. Brain regions for number involved in the processing of vocabulary of months in Chinese. *Sheng Li Xue Bao*, 2009, 61:230-238. [刘君, 叶知新, 金花, 凌雪英, 黄力, 莫雷. 中国人数字加工的脑区参与汉语日期名词的加工. *生理学报*, 2009, 61:230-238.]
- [7] Shu SY, Zhang ZQ, Bao XM, Zheng JL, Wu YM. The cortical and subcortical structures participated digital memory a functional magnetic resonance imaging study. *Sheng Wu Wu Li Xue Bao*, 2009, 25:263-264. [舒斯云, 张增强, 包新民, 郑金龙, 吴永明. 皮层和皮层下结构共同参与脑的数字记忆——功能磁共振研究. *生物物理学报*, 2009, 25:263-264.]
- [8] Linden DE. The working memory networks of the human brain. *Neuroscientist*, 2007, 13:257-267.
- [9] Chee MW, Chuan YM. Functional neuroimaging and behavioral correlates of capacity decline in visual short-term memory following sleep deprivation. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, 104: 9487-9492.
- [10] Yoo SS, Hu PT, Gujar N, Jolesz FA, Walker MP. A deficit in the ability to form new human memories without sleep. *Nat Neurosci*, 2007, 10:385-392.
- [11] Song GP, Miao DM, Huangpu E, Zhang K. Effects of sleep deprivation on words contextual memory. *Zhongguo Xin Li Wei Sheng Za Zhi*, 2006, 20:244-247. [宋国萍, 苗丹民, 皇甫恩, 张侃. 睡眠剥夺对词汇背景记忆的影响. *中国心理卫生杂志*, 2006, 20: 244-247.]
- [12] Sanders AF. Towards a model of stress and human performance. *Acta Psychol (Amst)*, 1983, 53:61-97.
- [13] Das JP, Nagliev JA, Kirby JR. Assessment of cognitive processes: the PASS theory of intelligence. *Boston, MA: Allyn & Bacon*, 1994: 31-35.
- [14] Wendelken C, Bunge SA, Carter CS. Maintaining structured information: an investigation into functions of parietal and lateral prefrontal cortices. *Neuropsychologia*, 2008, 46:665-678.
- [15] Osaka M, Komori M, Morishita M, Osaka N. Neural bases of focusing attention in working memory: an fMRI study based on group differences. *Cogn Affect Behav Neurosci*, 2007, 7:130-139.

(收稿日期:2013-04-26)