脑岛自发神经活动强度可预测个体错误后反应调整速度

王丽君¹, 胡学平³, 索涛¹, 赵国祥¹, 陈安涛^{2*}

1. 河南大学教育科学学院, 河南省心理与行为重点实验室, 认知、脑与健康研究所, 开封 475004;

2. 西南大学心理学部, 认知与人格教育部重点实验室, 重庆 400715;

3. 江苏师范大学语言科学与艺术学院, 江苏省语言与认知神经科学重点实验室, 徐州 221009

* 联系人, E-mail: xscat@swu.edu.cn

2019-03-09 收稿, 2019-04-12 修回, 2019-04-13 接受, 2019-07-01 网络版发表

国家自然科学基金(61431013, 31771254)、河南省教育厅人文社科项目(2019ZDJH493)和河南省博士后科研项目(001802013)资助

摘要 错误后行为调整是指错误反应发生后, 个体为了避免错误再次发生和优化未来行为执行而进行的行为调整. 本研究旨在采用静息态fMRI技术考察大脑自发神经活动对个体错误后行为调整的预测作用. 研究发现, ACC自发神经活动低频振幅(ALFF)值与个体错误后行为调整效应量相关不显著, 但是双侧脑岛自发神经活动ALFF值与个体错误后行为调整效应量呈显著正相关. 双侧脑岛ALFF值越大的个体, 错误后试次反应时越长, 错误后调整反应速度越慢. 该结果说明, 双侧脑岛参与错误后行为调整, 并对个体错误后反应速度调整有预测作用.

关键词 错误后行为调整, 静息态fMRI, 双侧脑岛, 低频振幅(ALFF)

个体想要顺利实现既定的目标和完成计划的任务需要有效调控与目标任务无关的信息干扰, 将注意力保持在任务相关的信息加工上. 这种为实现目标而有效调控个体行为的能力被称为认知控制(cognitive control). 其中错误加工是认知控制的重要组成部分. 错误发生后, 个体为了避免错误再次发生和优化未来的执行表现将会调用适当的认知控制资源进行一系列神经和行为上的调整. 错误后调整在行为上通常表现为错误后反应速度减慢(post-error slowing)和错误后反应准确率提高(post-error improvement in accuracy)^[1~4].

在错误加工神经机制研究中, 前扣带回(anterior cingulate cortex, ACC)被认为是负责监控错误的脑区, 并且能够利用监测到的错误信息调用更多认知控制资源进行自上而下的调节, 进而促使个体完成错误矫正并使个体在当前试次出现时处以积极的准备状态^[5~9]. Stemmer等人^[10]的脑损伤病人研究发现ACC损伤的病

人错误探测能力明显受损. 而强迫症和焦虑症患者在经历错误反应后, ACC激活显著强于健康被试, 存在ACC过度激活反应^[11,12]. 另外, 有研究发现ACC参与调控错误后行为反应, ACC激活越强, 错误后调整效应量越大^[3,13,14]. 这些研究结果说明, ACC不仅监控错误反应, 并且负责认知资源的调配和认知控制的执行.

但是, 越来越多的研究发现, 错误调整的完成是多个脑区共同作用的结果^[13,15]. 如, Polli等人^[16]通过对比精神分裂症患者和健康被试在反眼动任务中的执行表现, 发现精神分裂症患者ACC激活显著低于健康被试, 错误监测能力明显受损, 但是精神分裂症患者的错误矫正能力与健康被试无差异. 因此, ACC并不是唯一负责调节错误反应的脑区. 在脑网络的研究中, 研究者采用功能连接(functional connectivity)或Granger因果分析(Granger causality)发现脑岛与ACC存在显著的因果交互关系, 其中脑岛负责探测和传输错误信号, 而ACC负

引用格式: 王丽君, 胡学平, 索涛, 等. 脑岛自发神经活动强度可预测个体错误后反应调整速度. 科学通报, 2019, 64: 2207–2215

Wang L, Hu X, Suo T, et al. Spontaneous neuronal activity in insula predicts post-error adjustments (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 2207–2215, doi: [10.1360/N972018-01313](https://doi.org/10.1360/N972018-01313)

责执行错误后调整^[17~19]。该结果与两阶段认知控制模型(two-stage cognitive control model)观点相一致。两阶段认知控制模型认为在认知任务中,脑岛监测需要增强认知控制的刺激(如错误或冲突),随后脑岛把调节信号传输到ACC,由ACC完成对认知控制资源的分配和执行^[18,20]。并且,在错误意识的研究中发现,个体意识到错误时,脑岛有显著激活^[13,21~23],证实脑岛参与错误意识加工。这些研究结果说明,脑岛在错误加工中也起到重要作用。

前人对错误发生后大脑如何实现对错误监测和调整的神经机制研究主要采用任务态的功能核磁共振脑成像技术(functional magnetic resonance imaging, fMRI)。近年来研究者开始较多关注大脑自发神经活动在认知加工中的作用^[24~26]。因静息态fMRI技术不仅可以揭示大脑内在的功能结构,而且可以反映大脑内部自发神经活动和外部行为表现的关系^[27,28],该技术成为探索个体脑功能和脑结构的新方法。目前,与错误后行为调整相关的自发神经活动脑区尚不明确,因此,本研究将采用静息态fMRI技术探索ACC和脑岛自发神经活动是否可预测错误后调整效应的个体差异。

低频振幅(amplitude of spontaneous low-frequency fluctuation, ALFF; 0.01~0.08 Hz)是大脑自发神经活动强度的神经指标,主要反映了特定脑区静息状态下的局部自发活动属性^[29]。在认知功能上,ALFF被认为可以反映在人格特质和认知控制上的个体差异^[25,30,31]。如,注意瞬脱者在枕颞区和小脑区的ALFF显著高于非注意瞬脱者,而非注意瞬脱者在额顶区的ALFF显著高于注意瞬脱者,说明注意瞬脱者更易被分心物干扰,从而降低了对目标刺激的注意控制^[26]。

在本研究中,为成功考察大脑自发神经活动对错误后行为调整的作用,被试首先需要完成一项go/nogo任务,然后有足够错误试次的被试需进行静息态结构像和功能像扫描。基于前人研究^[17~19],我们采用假设驱动的兴趣区(region of interest, ROI)分析,假设错误后行为调整效应量应与ACC和双侧脑岛呈正相关关系,因此,我们把ROI设为ACC和双侧脑岛3个神经节点。并且采用小体积矫正(small volume correction, SVC)方法进行多重比较矫正^[32]。最后,通过对矫正后ROI脑区内的ALFF值和错误后行为调整效应量进行相关分析,比较错误后行为调整不同的个体在ALFF值上的差异,以期揭示对错误后行为调整有预测作用的自发神经活动脑区。

1 研究方法

(i) 被试。本实验有偿招募75名大学生参加本次实验的fMRI数据采集。所有的被试均为右利手,身心健康,视力正常或矫正视力正常,颜色识别能力正常。其中5名被试在核磁扫描时头动过大,导致伪迹太重,故该5名被试数据被删除。最终70名被试(女54, 18~20岁)的数据被用于行为和fMRI数据分析。在实验前,所有被试签署知情同意书。本实验获得西南大学心理学部伦理委员会批准。

(ii) 实验设备和实验任务。实验在19英寸的Dell电脑上进行,电脑的分辨率为1024×768,刷新率为85 Hz,屏幕背景为黑色。实验程序采用E-Prime 2.0软件编制运行。被试需在隔音的独立实验室执行go/nogo任务,并保持眼睛与电脑屏幕的距离约为60 cm。刺激是6个带颜色的汉字。当字体字义和颜色一致时,被试需要又快又准地进行按键反应,此类试次被称为go试次。其中一半被试要求使用左手食指按“A”键进行反应,而另一半被试要求使用右手食指按“L”键进行反应。另外,为了产生足够用于分析的错误试次,我们要求被试在以下两种情况不做按键反应,此类试次被称为nogo试次。一是字的字义和颜色不一致时,被试不需按键;二是呈现的汉字与先前试次完全一致时,被试不需按键。

实验流程如图1所示。首先在屏幕中央呈现200 ms的“+”注视点,然后呈现900 ms的刺激。被试需在900 ms内完成按键反应,并在按键完成后刺激消失;若没有进行按键则刺激呈现900 ms后自动消失。最后呈现600 ms的空屏作为试次间隔。

在实验开始前,每个被试需完成包含30个试次的练习实验,以达到熟悉实验规则的目的。规则了解清楚之后,被试需执行包含6组试次的正式实验,每组包含210个试次,其中go试次180个,nogo试次30个。被试完成每组试次后可休息30 s。为了有效实现实验目的,每组试次采用伪随机顺序排列。

(iii) 数据采集。被试的脑成像数据在西南大学脑成像中心3.0 T 西门子核磁共振成像仪器(Siemens Magnetom Trio TIM, Erlangen, Germany)上采集完成。本实验数据扫描采用回波平面成像序列获得T2加权成像(功能像),有240层图像被记录。实验具体的扫描参数如下:重复时间为2000 ms,回波时间为30 ms,翻转角为90°,扫描视野为200 mm×200 mm,矩阵为64×64,扫描层数为33层,层厚为3 mm,层间距为0.6 mm。接着,采用

图 1 (网络版彩色)实验流程简图

Figure 1 (Color online) Illustration of experimental procedure

快速梯度回波序列扫描高分辨率的T1加权成像(结构像),有128层图像被记录.实验具体的扫描参数如下:重复时间为2530 ms,回波时间为3.39 ms,翻转角为7°,扫描视野为256 mm×256 mm,层厚为1.33 mm. T2 功能像扫描时长约8 min, T1结构像扫描时长约4 min.在整个实验扫描期间,被试被要求保持头部和身体不动,闭眼但是保持清醒.

(iv) fMRI 数据预处理. fMRI数据采用基于MATLAB平台的数据处理工具SPM8(<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>)和DPARSF^[33]进行预处理.首先,把DICOM格式文件转换成NIFTI格式.为了确保图像磁体信号的稳定并使被试有时间适应扫描环境,每个被试的前10个功能图像被删除.其次,对剩下的230个图像进行时间层校正(slice timing).校正扫描顺序,使全脑扫描时间统一.再次,对图像进行头动矫正(Realign).以扫描获得的第一帧图像为准,将每一帧图像与第一帧图像对齐.并在X, Y和Z轴任意方向上表现大于2 ms位移或大于2°旋转的被试数据被认为头动伪迹过大需删除.将被试个人的高清结构像配准到平均的功能像.配准后的结构像将被分割为灰质、白质和脑脊液.然后,利用分割过程中得到的仿射变换矩阵将功能像标准化到MNI空间以得到3 mm × 3 mm × 3 mm的图像.

标准化完成后,使用6 mm半高宽高斯核进行空间平滑处理.为了降低低频漂移和高频噪音的影响,以0.01~0.08 Hz 频带进行去线性漂移^[34].最后,去除头动、白质和脑脊液等协变量以消除协变量带来的影响.

(v) ALFF的计算.采用静息态 fMRI 数据分析工具包 REST 1.8.^[35]进行ALFF计算.按照Zang等人^[29]2007年提出的计算方法,首先,需通过快速傅里叶变换将每个体素里的时间序列转换到频域,得到功率谱.接着,将功率谱开方.然后,计算每个体素在0.01~0.08 Hz范围内的功率谱平均,所得即为ALFF.最后,为排除全脑体积不同带来的影响,需将每个体素的ALFF除以全脑所有体素的平均ALFF即得到标准化的ALFF(mALFF).另外,由于灰质内的低频振荡信号振幅ALFF高于白质^[34],本研究只在灰质mask内进行ALFF计算.参照Wang等人^[36]的方法,我们将SPM8里面的灰质mask模板取0.4的概率值,同时去掉小脑部分,最后得到灰质mask.该灰质mask包含49483个体素.

(vi) ALFF-行为相关分析. ALFF计算完成之后,采用SPM8软件进行全脑水平分析.在全脑水平的分析过程中采用多重回归的分析统计方法来探索与错误后行为调整相关的脑区并确定脑区的位置.在回归模型中,

错误后反应速度调整效应量作为感兴趣变量,而把被试的年龄、性别和执行正确率作为无关变量进行回归,以消除无关变量对实验结果的影响.全脑水平的分析仍然只在灰质mask内进行计算.

基于假设驱动的ROI分析和前人的研究结果,我们把ROI设为ACC和双侧脑岛3个神经节点^[17~19].并且,本研究采用SVC矫正^[32],以上述脑区的AAL模板作为mask(图2)实现 $P<0.05$ (false discovery rate corrected; voxel level $P<0.0025$)的矫正标准.经过矫正后的脑区被作为感兴趣区,随后感兴趣区的时间序列被提取出来,进而将该时间序列与错误后调整效应量进行Pearson相关分析.

2 结果

2.1 行为结果

对反应时分析,为排除冲动反应和错误反应倾向的影响,反应时快于150 ms或慢于850 ms的试次被删除,共约11%的试次被删除.另外,只有反应抑制失败的nogo错误后正确试次和go正确后正确试次被纳入反应时分析,go错误后正确试次和nogo正确后正确试次则不进行分析.

错误后行为调整效应采用配对 t 检验方法进行分析.反应时分析结果发现错误后正确试次的反应时($M=485\pm 61$ ms)显著快于正确后正确试次的反应时($M=506\pm 53$ ms), $t_{(69)}=5.30$, $P<0.001$ (图3(a)).错误率分析结果发现,错误后试次的正确率($M=94\%\pm 4.5\%$)显著高于正确后试次的正确率($M=87\%\pm 4.5\%$), $t_{(69)}=10.05$,

图2 (网络版彩色)AAL模板上的ACC和双侧脑岛ROI. L, 左侧脑区; R, 右侧脑区

Figure 2 (Color online) The ROI of ACC and bilateral insula based on the AAL template. L indicates left brain, and R indicates right brain

$P<0.001$ (图3(c)).

2.2 与错误后行为调整相关的脑区

鉴于前人研究主要把错误后反应速度的调整作为错误后行为调整的反映指标^[3],我们考察了对错误后反应速度调整有影响的脑区.采用多重回归的分析方法,在回归了年龄、性别和执行正确率之后的统计分析结果显示,左侧脑岛(BA 13, $t=4.49$, $P(\text{SVC})<0.05$)和右侧脑岛(BAs 13或40, $t=3.96$, $P(\text{SVC})<0.05$)与错误后调整反应速度呈显著正相关,ACC (BA 32, $t=3.12$, $P(\text{SVC})>0.05$)与错误后调整反应速度相关不显著(表1和图4).随后的Pearson相关分析进一步证实双侧脑岛平均ALFF值与错误后反应速度调整呈显著正相关(左侧脑

图3 (网络版彩色)被试在反应时和错误率上的错误后行为调整结果. (a)和(c)分别指错误后试次和正确后试次在反应时和正确率上的执行表现. (b)指个体在错误后反应速度调整上的个体差异结果(错误后试次反应时减去正确后试次反应时). **, $P<0.01$

Figure 3 (Color online) The behavioral results of post-error adjustment. Panels (a) and (c) indicate the results of reaction time and accuracy in post-error adjustment. Panel (b) indicates the individual differences related to the adjustive time of post-error trials. Each circle represents a subject's mean adjustive time of post-error trials (the reaction time of post-error trials minus the reaction time of post-correct trials). **, $P<0.01$

表 1 对错误后反应速度调整有显著影响的脑区

Table 1 Brain regions that exhibit significant correlations between ALFF and adjustive time of post-error trials

脑区	BA	团块大小(mm ³)	MNI坐标			t值
			x	y	z	
左脑	13	118	-48	0	-12	4.49 ^{a)}
右脑	13,40	405	51	-30	18	3.96 ^{a)}
ACC	32	405	-3	33	-6	3.12

a) 该结果经小体积校正后 $P < 0.05$

图 4 (网络版彩色)对错误后反应速度调整有显著影响的脑区. L, 左侧脑区; R, 右侧脑区

Figure 4 (Color online) Brain regions that exhibit significant correlations between ALFF and adjustive time of post-error trials. L indicates left brain, and R indicates right brain

岛: $r=0.46$, $P<0.001$; 右侧脑岛: $r=0.38$, $P=0.001$; 图5).

3 讨论

本研究通过对ALFF与错误后反应速度调整的相关分析探讨自发神经活动对错误后行为调整的作用. 结果发现, ACC的ALFF值与错误后反应速度调整相关不显著, 而双侧脑岛的ALFF值与错误后反应速度调整呈显著正相关, 说明脑岛自发神经活动强度可预测错

误后反应速度调整的个体差异. 相比较任务状态的磁共振研究, 静息状态下的大脑自发性活动属性更有利于考察个体行为表现之间的个体差异. 当前错误加工领域的个体差异研究较多集中在错误加工的年龄差异和性别差异上^[37~41], 通过比较错误后行为调整速度不同的个体在大脑自发神经活动上的个体差异可以从脑结构层面上解释影响错误后调整个体差异的神经机制, 丰富和发展了错误加工领域个体差异的研究.

图5 (网络版彩色) 错误后反应速度调整与双侧脑岛平均ALFF值相关图

Figure 5 (Color online) The corrective results between the ALFF of bilateral insula and adjustive time of post-error trials

行为结果显示, 错误后正确试次反应时显著快于正确后正确试次反应时, 该结果与采用go/nogo任务范式的实验结果一致^[42]. 在Hester等人^[42]错误意识研究中发现, 相比较正确go试次反应, 察觉到错误后的试次调整速度显著加快, 而无察觉到错误后的试次调整速度显著变慢. 并且统计发现70%的错误试次被成功察觉到, 说明在go/nogo任务中错误试次有较高概率被察觉到, 这就导致整体分析(错误试次不进行分类)时呈现错误后调整的加速效应. 但是, 在采用其他实验任务(如Stroop或Flanker任务)的研究中发现, 被试在犯错后会试图通过降低反应速度来实现优化执行表现的目的^[1,2]. 这可能与不同实验任务导致的错误类型不同有关. 在Stroop和Flanker任务中, 错误发生是由刺激辨别失败或者冲动反应导致的. 在这种情况下, 错误后刺激加工时, 被试需增强认知控制来抑制无关刺激的干扰, 导致错误后调整较慢. 而在go/nogo任务中, 错误发生是由nogo刺激反应抑制失败导致的. 但是错误后的go试次不需要进行抑制控制, 因此, 错误发生后增强的认知控制会促进当前go刺激的加工, 较快完成反应执行.

在自发神经活动水平上, 双侧脑岛的ALFF值与错误后反应速度调整呈显著正相关. 具体来说, 双侧脑岛自发神经活动强度越高的个体, 错误后行为调整速度越慢. 已有研究证实脑岛参与反应结果的监测^[15,18]. 并且, Tops和Boksem认为错误发生后, 脑岛的活动增强将会干扰错误后试次的反应速度^[20,43]. 因此, 当前结果的发生可能是由于双侧脑岛ALFF值较高的个体需消耗更多的认知控制资源来确认错误的发生、矫正错误以及完成随后的刺激加工, 从而使双侧脑岛ALFF值较高

的个体完成错误后刺激相关任务耗时较长, 产生较慢的错误后行为调整. 而双侧脑岛ALFF值较低的个体在探测到错误之后, 消耗较少的资源完成错误矫正, 使得被试有足够的认知控制资源进行接下来的刺激加工, 因此双侧脑岛ALFF值较低的个体错误后行为反应比较快.

但是, 当前的研究结果发现, ACC的ALFF值与错误后反应速度调整相关不显著. 该结果可能与以下两方面原因有关. 一方面, 采用静息态fMRI技术获得的大脑自发神经活动主要用来考察个体进行认知加工时的个体差异, 因此ACC的自发神经活动强度与错误后反应速度调整相关不显著可能说明ACC虽然参与错误加工, 但不能有效预测错误后调整效应的个体差异. 另一方面, 为了增加被试犯错的概率, 我们采用了相对复杂的go/nogo任务范式, 这导致ACC在该任务中的自发神经活动较弱, 并不能成功通过全脑校正.

认知控制理论^[1,5,9]认为, 错误的发生标示着自上而下认知控制的需要. 错误发生后, 执行监控系统将调用更多的认知控制资源来加工错误后刺激的目标相关任务, 错误后调整有更优的执行表现. 但是, 注意朝向理论^[44]认为, 错误是能够引起个体朝向注意的小概率事件. 小概率事件易占用较多注意资源, 这就使得个体没有足够的注意资源完成错误后刺激相关任务, 错误后调整有较差的执行表现. 本研究结果发现, 错误后试次的正确率显著优于正确后试次的正确率. 该结果意味着错误后试次的执行表现要显著优于正确后试次, 与认知控制的理论观点相一致. 因此, 该结果进一步证实双侧脑岛ALFF值较高的个体需进行更强的执行监控, 投入更多的认知控制资源在随后的刺激加工中.

最后,本研究仍有以下一些不足之处需注意。首先,本研究采用基于Stroop任务的go/nogo任务考察错误后调整效应,该任务包含的抑制控制加工可能会影响错误后调整,研究结果能否推广到其他任务,有待进一步研究。因此,未来的研究需采用一种既可增加任务难度又包含较少抑制控制的任务来进一步验证当前的研究结果,比如增加任务的识别难度等。其次,静息态fMRI研究不仅能够揭示大脑固有的自发神经活动规律,而且可以揭示大脑的功能连接模式和脑网络拓扑特征。当前的研究已证实脑岛在错误后调整中的预测作用,但是脑岛怎样与大脑其他神经结构产生交互作用尚不清楚。因此,未来的研究可进行进一步的探索对错误后调整效应有影响的大脑网络,如以脑岛为神经节点进行固有的功能连接分析等。

4 结论

本研究结果说明,脑岛的自发神经活动水平可反映错误后行为调整的个体差异。具体表现为脑岛自发神经活动水平越强,个体的错误后反应调整速度越慢。行为结果显示,错误后试次的正确率显著高于错误后试次正确率,说明错误发生后,个体为了优化执行表现调用了更多的认知控制资源。因此,双侧脑岛ALFF值较高的个体可能消耗较多的认知控制资源来完成错误矫正和随后的刺激相关任务,导致个体错误后反应调整速度较慢。该结果说明脑岛的自发神经活动水平对错误后调整反应速度有预测作用。因此,今后的研究应重点关注脑岛的神经功能,进一步深入考察脑岛在错误加工中的具体作用。

致谢 感谢电子科技大学生命科学与技术学院辛斐博士对英文摘要的润色修改。

参考文献

- 1 Danielmeier C, Ullsperger M. Post-error adjustments. *Front Psychol*, 2011, 2: 233
- 2 Rabbitt P M. Errors and error correction in choice-response tasks. *J Exp Psychol*, 1966, 71: 264–272
- 3 Ullsperger M, Danielmeier C, Jocham G. Neurophysiology of performance monitoring and adaptive behavior. *Physiol Rev*, 2014, 94: 35–79
- 4 Wang L J, Liu C P, Hu X P, et al. The alertness level influences post-error adjustments (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 3708–3717 [王丽君, 刘长平, 胡学平, 等. 警觉水平影响错误后行为适应. 科学通报, 2016, 61: 3708–3717]
- 5 Botvinick M M, Braver T S, Barch D M, et al. Conflict monitoring and cognitive control. *Psychol Rev*, 2001, 108: 624–652
- 6 Hyman J M, Holroyd C B, Seamans J K. A novel neural prediction error found in anterior cingulate cortex ensembles. *Neuron*, 2017, 95: 447–456
- 7 Kerns J G, Cohen J D, MacDonald A W, et al. Anterior cingulate conflict monitoring and adjustments in control. *Science*, 2004, 303: 1023–1026
- 8 Iannaccone R, Hauser T U, Staempfli P, et al. Conflict monitoring and error processing: New insights from simultaneous EEG–fMRI. *NeuroImage*, 2015, 105: 395–407
- 9 Wang L, Tang D, Zhao Y, et al. Disentangling the impacts of outcome valence and outcome frequency on the post-error slowing. *Sci Rep*, 2015, 5: 8708
- 10 Stemmer B, Segalowitz S J, Witzke W, et al. Error detection in patients with lesions to the medial prefrontal cortex: An ERP study. *Neuropsychologia*, 2004, 42: 118–130
- 11 Maltby N, Tolin D F, Worhunsky P, et al. Dysfunctional action monitoring hyperactivates frontal-striatal circuits in obsessive-compulsive disorder: An event-related fMRI study. *NeuroImage*, 2005, 24: 495–503
- 12 Fitzgerald K D, Welsh R C, Gehring W J, et al. Error-related hyperactivity of the anterior cingulate cortex in obsessive-compulsive disorder. *Biol Psychiatry*, 2005, 57: 287–294
- 13 Klein T A, Endrass T, Kathmann N, et al. Neural correlates of error awareness. *NeuroImage*, 2007, 34: 1774–1781
- 14 Spunt R P, Lieberman M D, Cohen J R, et al. The phenomenology of error processing: The dorsal ACC response to stop-signal errors tracks reports of negative affect. *J Cogn Neurosci*, 2012, 24: 1753–1765
- 15 Ham T, Leff A, de Boissezon X, et al. Cognitive control and the salience network: An investigation of error processing and effective connectivity. *J Neurosci*, 2013, 33: 7091–7098
- 16 Polli F E, Barton J J S, Vangel M, et al. Schizophrenia patients show intact immediate error-related performance adjustments on an antisaccade task. *Schizophr Res*, 2006, 82: 191–201
- 17 Bastin J, Deman P, David O, et al. Direct recordings from human anterior insula reveal its leading role within the error-monitoring network. *Cereb Cortex*, 2017, 27: 1545–1557
- 18 Cai W, Chen T, Ryali S, et al. Causal interactions within a frontal-cingulate-parietal network during cognitive control: Convergent evidence from a

- multisite-multitask investigation. *Cereb Cortex*, 2016, 26: 2140–2153
- 19 Jilka S R, Scott G, Ham T, et al. Damage to the salience network and interactions with the default mode network. *J Neurosci*, 2014, 34: 10798–10807
- 20 Menon V, Uddin L Q. Saliency, switching, attention and control: A network model of insula function. *Brain Struct Funct*, 2010, 214: 655–667
- 21 Godefroid E, Pourtois G, Wiersma J. An aware error is a salient event: The anterior insula assigns salience to aware errors through interoceptive mechanisms. *Front Hum Neurosci*, 2015, 9: 197
- 22 Harsay H A, Spaan M, Wijnen J G, et al. Error awareness and salience processing in the oddball task: Shared neural mechanisms. *Front Hum Neurosci*, 2012, 6: 246
- 23 Klein T A, Markus U, Claudia D. Error awareness and the insula: Links to neurological and psychiatric diseases. *Front Hum Neurosci*, 2013, 7: 14
- 24 Mezer A, Yovel Y, Pasternak O, et al. Cluster analysis of resting-state fMRI time series. *NeuroImage*, 2009, 45: 1117–1125
- 25 Pan W, Liu C, Yang Q, et al. The neural basis of trait self-esteem revealed by the amplitude of low-frequency fluctuations and resting state functional connectivity. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 2016, 11: 367–376
- 26 Wang L, Chen J, Yang Z, et al. Individual differences in the attentional blink: Evidence from the amplitude of low-frequency fluctuations in non-blinkers and blinkers. *Biol Psychol*, 2016, 114: 33–38
- 27 Xie B, Qiu M G, Zhang Y, et al. Alterations in the cortical thickness and the amplitude of low-frequency fluctuation in patients with post-traumatic stress disorder. *Brain Res*, 2013, 1490: 225–232
- 28 Fox M D, Raichle M E. Spontaneous fluctuations in brain activity observed with functional magnetic resonance imaging. *Nat Rev Neurosci*, 2007, 8: 700–711
- 29 Zang Y F, He Y, Zhu C Z, et al. Altered baseline brain activity in children with ADHD revealed by resting-state functional MRI. *Brain Dev*, 2007, 29: 83–91
- 30 Kunisato Y, Okamoto Y, Okada G, et al. Personality traits and the amplitude of spontaneous low-frequency oscillations during resting state. *Neurosci Lett*, 2011, 492: 109–113
- 31 Mennes M, Zuo X N, Kelly C, et al. Linking inter-individual differences in neural activation and behavior to intrinsic brain dynamics. *NeuroImage*, 2011, 54: 2950–2959
- 32 Ashburner J. A fast diffeomorphic image registration algorithm. *NeuroImage*, 2007, 38: 95–113
- 33 Yan C G, Zang Y F. DPARSF: A MATLAB toolbox for “pipeline” data analysis of resting-state fMRI. *Front Syst Neurosci*, 2010, 4: 13
- 34 Biswal B, Zerrin Y F, Haughton V M, et al. Functional connectivity in the motor cortex of resting human brain using echo-planar MRI. *Magn Reson Med*, 1995, 34: 537–541
- 35 Song X W, Dong Z Y, Long X Y, et al. REST: A toolkit for resting-state functional magnetic resonance imaging data processing. *PLoS One*, 2011, 6: e25031
- 36 Wang X, Han Z, He Y, et al. Where color rests: Spontaneous brain activity of bilateral fusiform and lingual regions predicts object color knowledge performance. *NeuroImage*, 2013, 76: 252–263
- 37 Wiersma J R, van der Meere J J, Roeyers H. Developmental changes in error monitoring: An event-related potential study. *Neuropsychologia*, 2007, 45: 1649–1657
- 38 Larson M J, South M, Clayson P E. Sex differences in error-related performance monitoring. *Neuroreport*, 2011, 22: 44–48
- 39 Li C R, Zhang S, Duann J R, et al. Gender differences in cognitive control: An extended investigation of the stop signal task. *Brain Imag Behav*, 2009, 3: 262–276
- 40 Fischer A G, Danielmeier C, Villringer A, et al. Gender influences on brain responses to errors and post-error adjustments. *Sci Rep*, 2016, 6: 24435
- 41 Wang L, Tan J, Chen J, et al. The influence of observers’ sex on attention-demanding performance depends on performers’ sex. *Front Psychol*, 2015, 6: 1217
- 42 Hester R, Foxe J J, Molholm S, et al. Neural mechanisms involved in error processing: A comparison of errors made with and without awareness. *NeuroImage*, 2005, 27: 602–608
- 43 Tops M, Boksem M A S. A potential role of the inferior frontal gyrus and anterior insula in cognitive control, brain rhythms, and event-related potentials. *Front Psychol*, 2011, 2: 330
- 44 Notebaert W, Houtman F, Opstal F V, et al. Post-error slowing: An orienting account. *Cognition*, 2009, 111: 275–279

Summary for “脑岛自发神经活动强度可预测个体错误后反应调整速度”

Spontaneous neuronal activity in insula predicts post-error adjustments

Lijun Wang¹, Xueping Hu³, Tao Suo¹, Guoxiang Zhao¹ & Antao Chen^{2*}

¹ Key Laboratory of Psychology and Behavior of Henan Province, Institute of Cognition, Brain and Health, School of Education, Henan University, Kaifeng 475004, China;

² Key Laboratory of Cognition and Personality of Ministry of Education, Faculty of Psychology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

³ Key Laboratory of Language and Neuroscience of Jiangsu Province, School of Linguistics and Arts, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221009, China

* Corresponding author, E-mail: xscat@swu.edu.cn

After committing an error, humans often adopt strategies to change error behaviors, this phenomenon is termed post-error adjustment. The post-error adjustment ability is fundamental to flexible behavior and survival in a complex, varying environment. Resting-state neural activity has been associated with a variety of cognitive abilities, yet its relevance to post-error adjustment has been unclear.

Resting-state fMRI is a powerful tool for investigating this spontaneous brain activity, since it can reveal the correlation of the intrinsic functional architecture of the brain and the extrinsic behavior performance. The amplitude of low-frequency fluctuation (ALFF, 0.01–0.08 Hz) is widely used as an indicator of spontaneous fluctuations in brain activity. It has been suggested to reflect individual differences in cognitive control and personality traits. Therefore, the investigation of the spontaneous brain activity related to the post-error adjustment will provide novel insight into the understanding of the generation mechanism of post-error adjustment.

The current study employed a modified Go/NoGo task to investigate the intrinsic neural correlates of post-error adjustment by analyzing the ALFF. To yield a sufficient number of error trials, we instructed subjects to withhold their responses in two circumstances. (1) When word meaning and the font color of word were inconsistent, this trial was termed as incongruent Nogo; (2) when a word was presented on two consecutive trials (same meaning and same font color). Considering previous studies have demonstrated that anterior cingulate cortex (ACC) and bilateral insula play an important role in the error monitoring and error adaptation, thus the anterior cingulate cortex and bilateral insula were selected as the regions of interest (ROIs) in the present study. Additionally, the small volume correction was performed for multiple comparison. Moreover, since low-frequency fluctuations in the gray matter were higher than those in the white matter, the ALFF was calculated only in the gray matter.

As a result, the ALFF-behavior analysis revealed that the magnitude of post-error adjustment in reaction time was not correlated with the ALFF in ACC. However, the magnitude of post-error adjustment in reaction time was positively associated with the ALFF in bilateral insula. Specifically, stronger spontaneous neuronal activity in bilateral insula corresponded to slower post-error adjustments. Together, the findings suggest that spontaneous activity in the bilateral insula may be the neural indicator of the individual difference in post-error adjustment, which may predict the adjustive time of post-error behavior.

post-error adjustment, resting-state fMRI, bilateral insula, amplitude of spontaneous low-frequency fluctuation (ALFF)

doi: [10.1360/N972018-01313](https://doi.org/10.1360/N972018-01313)