警觉水平影响错误后行为适应

王丽君[†], 刘长平[†], 胡学平, 陈安涛^{*}

西南大学心理学部, 认知与人格教育部重点实验室, 重庆 400715

[†] 同等贡献

^{*} 联系人, E-mail: xscat@swu.edu.cn

2016-06-16 收稿, 2016-07-07 修回, 2016-07-07 接受, 2016-10-24 网络版发表

中央高校基本科研业务费专项资金(SWU1609316, SWU1609106)和国家自然科学基金(61431013, 81271477)资助

摘要 错误后适应指个体在犯错后所做的以减少后续错误为目的的一系列调整。错误后适应对于我们的生存和进化都有重要意义。但是, 错误后适应的产生机制至今仍存在争议。本研究考查了注意网络功能与错误后适应的关系, 发现注意网络的警觉功能对错误后适应有显著影响: 高警觉被试较之低警觉被试能够更有效地完成错误后适应。在达成同样程度的错误后正确率提升的情况下, 前者所付出的反应时代价显著低于后者。另一方面, 高低警觉被试在平均反应时和平均正确率上均没有差异, 说明两组被试之间错误后适应上的差异不能归结为基本反应速度的差异或者错误概率的不同。因此, 错误后适应受到警觉水平的显著调节。整合当前结果与相关文献, 我们提出错误后适应包括监测错误、警觉提升和认知调整3个关键加工。高警觉者在警觉提升这个环节具有优势, 因此能够更为高效地完成错误后适应。

关键词 错误后适应, 注意网络测试, 警觉水平, 个体差异

一般来说, 人们在做出错误反应之后会尽量避免再次出现类似的错误, 这种行为表现被称为错误后适应^[1]。错误后适应通常包括错误后正确率提高(post-error improvement in accuracy, PIA)、错误后减慢(post-error slowing, PES)和错误后干扰减少(post-error reduction of interference, PERI)三类现象^[2]。避免连续的错误对于个体的生存和进化具有重要意义。已有研究对错误后适应给予了较多关注, 发现它们是相当稳定的效应, 特别是错误后减慢效应, 并在此基础上提出多个理论解释以说明其产生机制。冲突控制理论^[3]认为错误后适应反映的是个体对目标刺激的注意增强。抑制解释^[4]认为, 错误发生后个体会抑制反应输出, 避免过快的自动反应以提升正确率。强化学习理论^[5]认为错误是学习信号, 促使个体加强正确的刺激-反应连接。

这些解释基本都是从冲突适应的相关理论中借鉴过来的, 这与已有研究将错误与冲突看作相似的心理事件有关^[6]。但冲突源自两个加工之间的竞争, 冲突不是错误也不必然导致错误。错误是行为的结果, 它可能由多种原因造成(如忘记规则、冲突干扰、注意涣散、冲动反应)。事实上, 冲突引发的调整与错误引发的调整是不同的。冲突后调整是任务特定的^[7,8], 而错误后调整却是任务一般的^[9,10]。这是因为冲突产生的原因明确, 随后的调整也具有针对性(如, 抑制分心信息加工和/或增强目标相关信息加工^[11,12])。但是, 错误产生原因复杂, 所引发的调整通常是一般化的, 如注意唤醒系统的激活^[13]。

近期, 有研究提出注意朝向理论以解释错误后适应^[14]。他们认为, 错误通常是罕见事件, 这类事件会吸引、占用注意资源, 不足的注意资源进而影响随

引用格式: 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

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, doi: 10.1360/N972015-01459

后任务的重新定向,造成错误后减慢效应。支持注意朝向理论的研究常常发现错误后正确率下降^[15]。但错误后正确率下降不是通常所说的适应性调整。注意朝向固着于错误可能只是错误引发的一种负面反应。从现有的大量研究发现了错误后正确率上升的结果来看,错误应该会引发其他的有利于实现这种适应性调整的反应。因此,错误后适应的产生机制需要再思考。

在认知控制理论(冲突控制、抑制解释和强化学习)中强调注意功能参与错误后行为的适应性调整,并且在随后的任务执行中增强的认知控制将调用更多的注意资源来完成该任务以避免再次犯错。而在注意朝向理论中强调当前的错误事件占用注意资源导致没有足够的资源来完成随后的任务。因此,注意功能究竟怎样调节错误后适应依然值得探究。值得注意的是,在错误相关的神经活动研究中发现alpha频带能量在错误发生后立即下降^[13]。alpha频带的功能主要反映了大脑皮层的唤醒度(警觉程度)^[16],因此,大脑唤醒或警觉水平的变化可能是错误后行为调整的重要原因。但到目前为止,还没有研究调查过警觉水平怎样影响错误后适应。

为了解决上述问题,本研究首先采用注意网络测试^[17](attention network test, ANT)评估被试的警觉水平。ANT测试结合了线索提示与箭头版Flanker任务,通过改变线索提示类型和靶刺激状态,能够有效地测量注意网络中警觉、朝向和执行控制三种功能效率。然后采用Eriksen-Flanker任务^[18]来调查被试在错误后适应方面的表现(为保证足够的错误试次供分析,Flanker任务中要求每个被试完成1000个试次)。为全面地评估警觉水平对错误后适应的影响,我们将分析被试在PIA, PES和PERI三个指标上的表现并进一步检查注意网络分数(尤其是警觉分数)与错误后适应的相关性。最后,基于与错误后适应有显著相关的注意网络测量结果,我们将被试进行分组并检查高低警觉组被试在错误后适应上的差异,为说明错误后适应产生机制提供更多细节性信息。

1 方法

1.1 被试

56名在校大学生(30名女生,平均年龄21.5岁, $SD=1.69$)作为有偿被试参加了本研究。所有被试均

身心健康、右利手、视力或矫正视力正常,无相关实验经历。每个被试在实验前均签署了实验知情同意书。

1.2 实验仪器与材料

实验采用计算机呈现刺激,计算机的显示器为联想LX-GJ556D, 17吋彩显,分辨率为1024×768,刷新率为85 Hz。实验程序由E-prime编制运行,被试在键盘上作按键反应,反应时和正确率由计算机自动记录。被试双眼距屏幕的距离约为60 cm,在一个亮度适中的单间实验室里单独参加测试。屏幕背景为灰色。刺激材料包括注视点(+)、线索提示符(*)和Flanker箭头。

1.3 实验程序

所有被试都需完成ANT和Flanker两种任务的测试。

(i) ANT任务。ANT测试实验程序如图1所示。

(1) 在屏幕中央呈现一个注视点“+”,呈现时间在400~1600 ms之间随机变化。(2) 在屏幕中央呈现100 ms的提示信号“*”,根据提示信号是否出现以及出现的位置可将线索条件分为无线索、中央线索、双侧线索和空间线索4种,4种条件出现的试次数相同。(3) 提示信号消失,屏幕中央仅出现黑色注视点“+”,持续时间400 ms。(4) 目标刺激(即Flanker箭头)出现,其呈现的位置与线索信号相对应。无提示、中心提示和双侧提示条件下,目标刺激可能出现在注视点的正上方或正下方,而在空间提示条件下,目标刺激与线索信号出现的位置相同。当目标刺激出现时,要求被试只根据中心箭头(靶刺激)的指向做按键反应,而忽略两边的箭头(分心刺激)。根据靶刺激与分心刺激的方向是否一致可将目标刺激分为中性、一致和不一致3种条件,每种条件的试次各占总试次的1/3。被试需在1700 ms内完成按键反应,否则刺激自动消失。(5) 程序在呈现一个持续时间随机变化的空屏后直接进入下一个循环阶段(每个试次总时长为3500 ms,该空屏持续时间为总时长减去靶刺激反应时再减去“+”字注视点呈现时长的差)。ANT测试共336个试次(其中练习试次24个),整个实验持续约30 min。正式实验分为3个组块(每个组块104个试次),每个组块结束后,被试可稍作休息。

(ii) Flanker任务。我们采用经典的箭头Flanker任务来考察被试的错误后适应。具体流程如图2所示。首先在屏幕中央呈现300 ms的注视点“+”,然后呈现

图 1 ANT实验流程图. (a) 4 种线索类型(无线索、中央线索、双侧线索和上下空间线索); (b) 3 种试次类型(一致、中性和不一致); (c) 一个ANT试次的时间流程示意图

Figure 1 The trial schema of ANT task. (a) Four cue types (no cue, central cue, bilateral cues, and spatial cue); (b) three trial types (congruent trial, neutral trial, and incongruent trial); (c) illustration of time parameters and task sets of one trial

一个持续时间为1000 ms的空屏，之后在屏幕中央出现50 ms的目标刺激，即Flanker箭头，要求被试根据中心箭头(靶刺激)的指向作反应，而忽略两边箭头(分心刺激)的指向。根据中心箭头和两边箭头的指向是否一致可将目标刺激分为一致和不一致两种条件。紧接着是一个反应屏，要求被试在1400 ms内做既快又准的按键反应，否则反应将不被记录。最后是一个呈现时间为800 ms的空屏，然后自动进入下一个循环。

刺激以随机顺序呈现。为了使被试熟悉反应规则，在正式实验前，要求被试完成40个练习试次，规则与正式实验相同。正式实验包含5个组块，每个组块200个试次，共1000个试次。被试在完成每个组块之后作适当休息。

1.4 统计分析

我们采用SPSS (18.0版本)统计软件进行统计分

图 2 Flanker任务流程图. (a) 试次类型(一致和不一致); (b) 一个Flanker试次的时间流程示意图

Figure 2 The trial schema of Flanker task. (a) Trial types (congruent trial and incongruent trial); (b) illustration of time parameters and task sets of one trial

析并首先对所有被试数据做整体分析. 对于ANT实验数据, 根据Fan等人^[17]提出的ANT测试原理, ANT任务主要通过改变线索提示和目标刺激的一致性来考察注意网络的警觉、定向和执行控制网络的功能效率. 从线索类型的角度看, 线索信号提供了目标刺激即将出现及出现位置的信息. 其中中央线索和双侧线索提供了警示目标刺激即将出现的信息, 而上或下类型的线索则不仅包含警觉性信息, 而且还包含提示目标刺激空间位置的信息. 从试次一致性角度看, 被试在不一致试次和一致试次上的反应时差异能有效地反映冲突效应的大小. 根据ANT任务的这些特点, Fan等人^[17]认为可通过以下公式分别计算注意网络的警觉、定向和执行控制功能效率: 警觉= $RT_{无}-RT_{中央}$; 朝向= $RT_{中央}-RT_{空间}$; 执行控制= $RT_{不一致}-RT_{一致}$. 之后, 我们根据被试的警觉、定向和执行控制功能效率得分检查了3个网络功能之间的相关性.

对于Flanker任务数据, 首先检查错误后适应(PES, PIA和PERI)效应是否显著. 根据前人研究, PES效应量为Flanker任务中错误后正确试次(correct trials following errors, EC)的反应时与正确后正确试次(correct trials following correct trials, CC)的反应时的差值($RT_{EC}-RT_{CC}$)^[1,19,20]. 同理, PIA效应量为错误后试次的正确率与正确后试次的正确率差值, PERI效应量为错误后试次的冲突干扰效应与正确后试次的冲突干扰效应的差值. 然后, 将显著的适应效应与注意网络分数求相关. 显著的相关性表示个体的适应效应受到注意网络功能调制. 根据我们在前言的分析和预测, 我们重点关注警觉功能对于错误后适应效应的影响. 如果警觉功能与适应效应显著相关, 那么将进一步根据警觉分数将被试分为两个组(高警觉组和低警觉组), 再对比这两个组在错误后适应效应上的差异, 以进一步检查当前研究的假设.

2 结果

2.1 整体分析

在ANT任务中, 所有被试在各实验条件(线索类型和目标刺激一致性)下的平均反应时和错误率结果如表1所示. 对反应时的线索条件(无线索、中央线索、双侧线索和上/下空间线索)和试次一致性(一致、不一致和中性)两因素重复测量方差分析(采用Greenhouse-Geisser方法进行多重比较校正)结果显示, 线索条件

($F(3, 165)=321.84, P<0.001, \eta^2=0.85$)和试次一致性($F(2, 110)=497.93, P<0.001, \eta^2=0.90$)的主效应差异显著, 二者的交互效应($F(6, 330)=7.53, P<0.001, \eta^2=0.12$)差异显著, 简单效应分析表明, 4种类型的线索条件, 在不一致试次类型上的反应时都显著延长, 尤其对警觉线索(中央线索和双侧线索)条件而言, 增强效应更加明显.

错误率上, 线索条件和试次一致性两因素重复测量方差分析(采用Greenhouse-Geisser方法进行多重比较校正)结果显示, 线索条件($F(3, 165)=7.21, P<0.001, \eta^2=0.12$)和试次一致性($F(2, 110)=30.79, P<0.001, \eta^2=0.36$)的主效应差异显著, 二者的交互效应($F(6, 330)=4.48, P<0.01, \eta^2=0.08$)差异显著. 进一步的简单效应分析表明, 只有当目标刺激为不一致试次时, 不同类型线索条件下的错误率才存在显著差异. 这些结果一方面说明目标刺激的试次一致性和线索条件的类型均会影响被试的反应时和错误率. 另一方面说明ANT任务能有效地分离出被试在不同条件下的反应时和错误率, 因此, 结合统计部分关于ANT任务特点的说明, 我们便可以通过不同条件下的反应时差异有效地测量注意的警觉、定向和执行控制网络效率.

在上述测试结果的基础上, 我们根据统计分析部分给出的方法分别计算了警觉(30 ± 16) ms、朝向(47 ± 22) ms和执行控制(77 ± 27) ms分数, 统计表明它们都显著大于0 ($P_s<0.001$). 进一步的皮尔逊相关分析显示, 3个网络分数之间没有显著相关(警觉和朝向: $r=-2.14, P>0.11$; 警觉和执行功能: $r=0.11, P>0.60$; 朝向和执行功能: $r=0.02, P>0.88$). 这些结果与经典的ANT测试研究一致^[17,21], 说明了ANT任务在考察注意网络功能效率上的有效性.

Flanker任务中所有被试行为结果如表2所示, 统计分析表明, 在反应时上不一致条件(449 ± 68) ms显著慢于一致条件(390 ± 52) ms, $t(55)=17.76, P<0.001$. 而正确率上不一致条件 $88.31\%\pm 9.31\%$ 显著低于一致条件 $97.57\%\pm 4.61\%$, $t(55)=10.66, P<0.001$. 这些结果说明当前研究获得了显著的冲突干扰效应.

然后, 我们分别计算了PES效应(错误后正确反应时: 433 ± 57) ms; 正确后正确反应时: 419 ± 54 ms, PES= (14 ± 16.52) ms), PIA效应(错误后正确率: $95\%\pm 4.9\%$; 正确后正确率: $93\%\pm 5.8\%$, PIA= $1.58\%\pm 4.37\%$), PERI(错误后干扰效应: 64 ± 30) ms; 正确后干扰效应: (67 ± 25) ms; PERI= (-3 ± 27) ms), 单样本 t 检验结果

表 1 ANT任务中各实验条件的反应时和错误率结果

Table 1 The results of reaction time and accuracy in the ANT task

试次一致性	反应时(ms)/错误率(%)	线索类型			
		无线索	中央线索	双侧线索	空间线索
一致	反应时	565(99)	527(98)	515(88)	486(92)
	错误率	0.6(0.08)	0.98(0.10)	0.98(0.10)	0.45(0.07)
不一致	反应时	624(103)	603(104)	592(106)	544(102)
	错误率	0.33(0.2)	8.25(0.26)	6.88(0.23)	3.14(0.17)
中性	反应时	559(93)	527(87)	522(95)	483(88)
	错误率	0.83(0.09)	0.98(0.10)	1.13(0.10)	0.93(0.09)

表 2 Flanker任务中反应时和错误率结果

Table 2 The results of reaction time and accuracy in the Flanker task

	总平均	一致	不一致	正确后	错误后
反应时(ms)	422(57)	390(52)	449(68)	419(54)	433(57)
正确率(%)	93(5.7)	97.57(4.6)	88.31(9.31)	93(5.8)	95(4.9)

表明, PES ($P<0.001$)和PIA ($P=0.009$)都显著大于0, 但PERI与0没有显著差异($P=0.37$). 这些结果表明, 当前研究获得了显著的PES和PIA效应, 但没有显著的PERI效应. 值得注意的是, 对PES和PIA的相关分析表明, 二者之间无明显的相关性($r=0.17$, $P>0.21$).

我们进一步将显著出现的错误后适应效应(PES和PIA)与注意网络的3个功能分数做相关分析(见图3), 发现警觉分数与PES有显著的负相关 $r=-0.27$, $P<0.05$, 与PIA有边缘显著的负相关 $r=-0.25$, $P=0.064$. 但朝向和执行功能与错误后适应指标相关都不显著($P_s>0.12$). 这些结果说明警觉水平影响错误后行为

的调整.

2.2 个体差异

那么, 警觉是如何影响错误后适应的呢? 为了回答该问题, 我们对不同警觉水平的被试在错误后适应上的差异进行了分析. 根据警觉水平(均值为30.39 ms, 标准差为16.10, 取值范围在-2.30~73.43 ms之间)的高低, 我们把被试分为高警觉组、中警觉组和低警觉组. 高警觉组被试选取前32%被试(18人; 警觉分数高于36 ms), 中警觉组被试选取中间36%被试(20人; 警觉分数位于25和36 ms之间), 低警觉组

图 3 (网络版彩色)警觉与错误后适应相关图. (a) 警觉水平与PES效应的相关图; (b) 警觉水平与PIA效应的相关图. *, $P<0.05$; #, $P=0.06$

Figure 3 (Color online) The correlation results between the alerting level and post-error adjustments (post-error slowing and post-error improvement in accuracy). (a) The correlation between alerting level and PES effect; (b) the correlation between alerting level and PIA effect. *, $P<0.05$; #, $P=0.06$

被试选取后32%被试(18人; 警觉分数低于25 ms). 为了更好地考察警觉水平对错误后适应的影响, 我们只选取高警觉组和低警觉组被试进行个体差异分析. 高警觉组和低警觉组的先前试次平均正确率分别为 $93\% \pm 4.6\%$ 和 $94\% \pm 5\%$, 且二者之间无显著差异($t(34) = 0.59, P = 0.56$). 然后我们对正确率和反应时分别以分组(高警觉组和低警觉组)为被试间因素和先前试次正确性(先前错误和先前正确)为被试内因素做混合二因素方差分析, 以检查两组被试在错误后适应上的个体差异(见图4).

在正确率上, 方差分析表明, 先前正确性主效应差异边缘显著, $F(1, 34) = 3.49, P = 0.07, \eta^2 = 0.09$. 分组的主效应差异不显著, $F(1, 34) = 0.33, P = 0.57, \eta^2 = 0.01$, 二者交互效应差异不显著, $F(1, 34) = 1.87, P = 0.18, \eta^2 = 0.05$. 该结果说明, 警觉对PIA的出现没有显著影响, 高警觉组和低警觉组被试都表现出了PIA效应.

在反应时上, 方差分析结果表明, 先前正确性主效应差异显著, $F(1, 34) = 26.76, P < 0.001, \eta^2 = 0.44$. 分组的主效应差异不显著, $F(1, 34) < 0.5, P > 0.9, \eta^2 = 0.01$. 但是二者交互效应差异显著, $F(1, 34) = 7.60, P < 0.01, \eta^2 = 0.18$. 进一步的简单效应检验表明, 对于低警觉组被试, 错误后正确反应时((440 ± 12) ms)显著慢于正确后正确反应时((418 ± 11) ms), $F(1, 34) = 31.45, P < 0.001, \eta^2 = 0.48$. 对于高警觉组被试, 错误后反应时((432 ± 12) ms)慢于正确后反应时((425 ± 11) ms), 但是两者没有达到显著差异水平, $F(1, 34) = 2.92, P = 0.97, \eta^2 = 0.08$. 这些结果说明, 警觉对PES有显著影响, 低警觉组被试产生显著的PES效应而高警觉组被试的PES效应消失.

为检查两组被试在基线反应上是否存在差异, 我们对两组被试在Flanker任务上的反应时($t(34) = 0.95, P = 0.59$)、正确率($t(34) = 0.71, P = 0.43$)和冲突效应($t(34) = 0.07, P = 0.78$)的差异做了分析, 也对两组被试在正确后试次上的反应时($t(34) = 1.63, P = 0.21$)和正确率($t(34) = 0.01, P = 0.97$)的差异进行了检查. 结果显示, 两组被试在这些指标上均没有显著差异.

3 讨论

ANT结果显示警觉、朝向和执行控制在这些被试中都是显著存在的, 并且三个功能是相互独立的. 错误后适应效应分析表明, 全体被试均获得了显著的PES和PIA效应, 但没有产生显著的PERI效应. 3个注意网络分数与错误后适应效应的相关分析表明, 只有警觉分数与PES和PIA呈显著负相关, 其他效应均无显著相关发现. 说明警觉水平影响被试进行错误后适应. 为进一步分析警觉水平如何影响错误后适应, 我们基于警觉网络测试分数将被试划分为高中低三组, 然后选取低警觉组和高警觉组直接比较两组被试在PES和PIA上的表现, 发现高低警觉组被试在错误后适应上存在个体差异效应. 低警觉组被试获得了显著的PES效应而高警觉组被试PES效应消失. 但是, 高低警觉组被试在PIA效应上差异不显著. 错误后适应的主要目标是避免或减少重复犯错, 因此PIA被认为是错误后适应的关键指标^[22]. 当前研究中两组被试都获得了PIA效应, 说明无论警觉水平高低, 被试在监测到错误反应后均做出了适应性调整以改善行为表现(提高正确率). 而高低警觉组被试在PES上的差异表明低警觉被试为提高正确率付出了

图4 (网络版彩色)警觉水平对错误后适应影响的结果图. (a) 高警觉组和低警觉组被试在反应时的差异, 显示低警觉组被试产生显著的PES效应, 而高警觉组被试PES效应消失; (b) 在PIA上两组被试表现并无差异. **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$

Figure 4 (Color online) The results of individual differences in the reaction time and accuracy. (a) The result of individual differences in the reaction time, showing that significant PES effect is observed in the low alerting level group, but this is not the case for the high alerting level group; (b) there is no difference between two alerting level groups in the PIA effect. **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$

更多时间上的代价。这可能是因为警觉更多地影响错误后调节速度,而并不影响调整效果所致。研究发现PES和PIA并不总是同时出现,二者可能存在不同的加工机制^[23-26]。例如Dudschig和Jentzsch在2009年调查反应刺激间隔(response-stimulus interval, RSI)对错误后试次的反应时和正确率的影响发现随着RSI减小,错误后减慢效应量增加但是错误后正确率却下降。该研究说明错误后行为在反应时和正确率的调整上依从不同的时间进程。换言之,PES和PIA可能是独立的错误后行为调整加工^[24]。另外,警觉水平的提升只是一种弥散的唤醒水平提高,不能调节具体的认知过程^[27],因此,我们认为警觉只影响错误后调整速度(PES),而并不能改善行为效果(PIA)。尽管本研究同时观察到PES和PIA效应,但二者之间并没有显著的相关。这进一步说明,PES和PIA是独立加工的,警觉对PES的调节并不必然提高错误后正确率,PIA可能涉及其他更加复杂的加工过程,这一点有待相关研究进一步讨论。值得指出的是,两组被试在全部试次的反应时、正确率,以及正确后试次的反应时和正确率上都没有差异。因此他们在PES上的不同表现既不能归结于整体反应速度的差异,也不能归结为错误出现概率的不同。此外,两组被试都表现出显著的错误后正确率的提高,说明两组被试都在觉察到错误后进行了有效的行为调整。因此,两组被试在PES上的差异也不能归结为错误觉察能力上的差异。从当前结果来看,高警觉组较之低警觉组,在错误发生之后能够执行更快的适应性调整,但这种适应性调整的加快并不必然导致调整效果的提升。

为什么高警觉个体在错误出现后具有更快的适应速度呢?认知控制的双模型^[28,29]认为高警觉个体倾向于采用主动性控制的反应策略,而低警觉个体倾向于采用被动性的反应策略。主动性控制是一种目标导向性的控制,在认知需求事件发生前注意控制一直持续发生。而反应性控制则是以认知需求事件驱动的方式调用注意控制。因此,处于高警觉水平的被试在错误事件后能够很快地完成调节,导致PES效应消失。

关于注意功能在调节错误后行为的适应加工中的作用,当前研究发现显著的PIA效应,与认知控制理论的观点一致(该理论认为错误导致认知控制的增强以优化任务执行,表现为错误后正确率较正确后正确率有显著的提高)。并且在注意网络(警觉、朝向

和执行功能)与错误后适应指标(PES,PIA和PERI)的相关分析中发现只有警觉分数与PES和PIA呈显著的负相关,说明了注意网络中的警觉功能在错误后适应中起关键作用,进一步深化了认知控制理论解释。

另外,在认知神经的研究中,有研究认为前扣带回(anterior cingulate cortex, ACC)有检测错误发生的功能^[30-33]。Verguts和Notebaert^[34]在2009年的研究中提出ACC检测到错误后所进行的调节是间接通过蓝斑-肾上腺素(locus coeruleus-noradrenergic; LC-NE)唤醒系统起作用的。LC-NE通常是由小概率事件或者凸显刺激诱发,所释放出的神经递质有利于促进目标相关维度的加工^[35,36]。并且,ACC和LC-NE唤醒系统均与警觉水平调节有关^[29,37]。鉴于高低警觉组被试均有显著的错误后正确率提高且并无差异,我们推测两组被试在错误后适应上的差异可能在于LC-NE系统激活上的差异。我们认为高警觉水平的被试由于自身处于较高警觉水平,因此他们的LC-NE系统在错误出现之前就处于相对较高的激活状态。但是,低警觉水平的被试则在错误检测到后仍需耗时进行LC-NE系统的激活,进而调节个体的警觉水平。因此,高警觉组被试在牺牲较少反应时的情况下完成错误后的调整,低警觉组被试则产生了较大的错误后减慢效应。该推论仍需神经学上的进一步数据支持。Murphy等人^[38]在2011年研究中指出P3脑电成分和瞳孔直径的变化是观察LC-NE唤醒系统的有效指标,为我们进一步的研究提供了方法学上的依据。

此外,警觉水平提升是一种弥散的唤醒水平提高^[27],不能调节具体认知过程。这一点在与冲突后适应的比较中显得尤其明显。冲突后适应是任务特定的,因为冲突的产生有明确原因(如,在Flanker任务中是由于侧部不一致刺激干扰造成的)。在冲突后适应中,被试需要采用明确的认知操作进行调节,即收缩注意范围,使注意集中于中心靶刺激,以更好的忽略侧部刺激,从而在后续试次中降低来自侧部分心刺激的干扰。但如果后续冲突是Stroop类型,收缩注意范围将无益于解决Stroop类型冲突,这种调整就不能使被试在后续任务的执行中获益。相反,错误后适应是任务一般性的,即错误后的调整可以在不同错误类型间传递^[9,10]。King等人^[39]2010年采用人脸版本的Simon任务发现错误后冲突干扰的解决主要依赖任务相关的脑区,如梭状区(fusiform face area)和

额上回(superior frontal sulcus),而错误后减慢效应主要和调节运动阈限的脑区相关,如额下联合区(inferior frontal junction)^[39]。因为PERI反映的是冲突控制效率的提升,而提升冲突控制效率需要有针对性的认知调整,因此在现有的研究中发现PERI效应具有不稳定性,只有在特定的条件下PERI效应才能被观察到^[2,39]。当前研究也没有发现显著的PERI效应,与上述观点一致。错误通过调节个体的警觉水平实现其调整作用,但大脑并没有因为警觉水平提升而做出针对具体认知操作的调整。

虽然已有理论解释已关注到注意功能在错误后适应中的作用,但本研究结果有力地表明警觉调节对于错误后适应的产生具有关键作用,补充和扩展了前人发现。相比于抑制解释的反应抑制假设^[4],注意朝向的注意转移假设^[14],警觉调节机制可能是更基础的:警觉调节发生在错误适应的较早阶段,而反应抑制和注意转移可能是警觉唤醒前脑后的表现。整合当前结果与已有研究,我们认为冲突控制解释^[3]可能不适合错误后适应,因为该解释认为错误会引起明确的认知操作(增强靶通道、抑制分心通道),但这与警觉解释和错误后适应在任务间传递的结果都

不一致。而强化学习理论的解释^[5]与警觉调节机制是吻合的,虽然警觉提升不会引起明确的认知操作,但受到唤醒的前脑可能会加强刺激-反应连接的规则。这可能是警觉提升能影响到的认知操作,但也只能影响正确率和反应速度,因为不是选择性注意的调节故对干扰效应没有影响。

4 结论

本研究结果说明,警觉水平能显著地影响错误后适应,具体表现为警觉水平能有效地调节PES效应,高警觉组被试在牺牲较少反应时的情况下完成错误后调整而低警觉组被试耗时较长产生了较大的错误后减慢效应。但是警觉水平对PIA效应并没有影响,高低警觉组没有差异。因此,错误后适应除了错误监测和认知调整两个过程之外,警觉水平提升也需要加以重视。由于警觉是非目标特异的,在错误监测与认知调整之间增加警觉水平提升这一过程,能更好地解释错误后适应在不同类型任务之间传递的结果,也突显出错误和冲突两种信号在性质上的差异。今后的研究应将关注点从PES转向PIA,并深入地研究警觉在错误后适应中所起的具体作用。

参考文献

- 1 Rabbitt P. Errors and error correction in choice-response tasks. *J Exp Psychol*, 1966, 71: 264
- 2 Danielmeier C, Ullsperger M. Post-error adjustments. *Front Psychol*, 2011, 2: 233
- 3 Botvinick M M, Braver T S, Barch D M, et al. Conflict monitoring and cognitive control. *Psychol Rev*, 2001, 108: 624
- 4 Ridderinkhof R K. Micro-and macro-adjustments of task set: Activation and suppression in conflict tasks. *Psychol Res*, 2002, 66: 312-323
- 5 Holroyd C B, Coles M G. The neural basis of human error processing: Reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychol Rev*, 2002, 109: 679
- 6 Wang L J, Xu L, Wu S S, et al. Critical review on the theories of post-error slowing (in Chinese). *Adv Psychol Sci*, 2013, 21: 418-428 [王丽君, 徐雷, 伍姗姗, 等. 错误后减慢理论模型述评. *心理科学进展*, 2013, 21: 418-428]
- 7 Liu P D, Yang W J, Li C, et al. The conflict adaptation effect is based on specific-domain (in Chinese). *J Psychol Sci*, 2013, 3: 31 [刘培朵, 杨文静, 李畅, 等. 基于特定领域的冲突适应效应. *心理科学*, 2013, 3: 31]
- 8 Egner T, Delano M, Hirsch J. Separate conflict-specific cognitive control mechanisms in the human brain. *NeuroImage*, 2007, 35: 940-948
- 9 Notebaert W, Verguts T. Conflict and error adaptation in the simon task. *Acta Psychol*, 2011, 136: 212-216
- 10 Forster S E, Cho R Y. Context specificity of post-error and post-conflict cognitive control adjustments. *PLoS One*, 2014, 9: e90281
- 11 Zhang L, Ding C, Li H, et al. The influence of attentional control on stimulus processing is category specific in stroop tasks. *Psychol Res*, 2013, 77: 599-610
- 12 Polk T A, Drake R M, Jonides J J, et al. Attention enhances the neural processing of relevant features and suppresses the processing of irrelevant features in humans: A functional magnetic resonance imaging study of the stroop task. *J Neurosci*, 2008, 28: 13786-13792
- 13 Carp J, Compton R J. Alpha power is influenced by performance errors. *Psychophysiology*, 2009, 46: 336-343
- 14 Notebaert W, Houtman F, Van Opstal F, et al. Post-error slowing: An orienting account. *Cognition*, 2009, 111: 275-279

- 15 Houtman F, Notebaert W. Blinded by an error. *Cognition*, 2013, 128: 228–236
- 16 Klimesch W, Doppelmayr M, Russegger H, et al. Induced alpha band power changes in the human EEG and attention. *Neurosci Lett*, 1998, 244: 73–76
- 17 Fan J, McCandliss B D, Sommer T, et al. Testing the efficiency and independence of attentional networks. *J Cogn Neurosci*, 2002, 14: 340–347
- 18 Eriksen B A, Eriksen C W. Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Atten Percept Psychol*, 1974, 16: 143–149
- 19 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
- 20 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
- 21 Fan J, McCandliss B D, Fossella J, et al. The activation of attentional networks. *NeuroImage*, 2005, 26: 471–479
- 22 Ullsperger M, Danielmeier C, Jocham G. Neurophysiology of performance monitoring and adaptive behavior. *Physiol Rev*, 2014, 94: 35–79
- 23 Danielmeier C, Eichele T, Forstmann B U, et al. Posterior medial frontal cortex activity predicts post-error adaptations in task-related visual and motor areas. *J Neurosci*, 2011, 31: 1780–1789
- 24 Wang L, Pan W, Tan J, et al. Slowing after observed error transfers across tasks. *PLoS One*, 2016, 11: e0149836
- 25 Ullsperger M, Fischer A G, Nigbur R, et al. Neural mechanisms and temporal dynamics of performance monitoring. *Trends Cogn Sci*, 2014, 18: 259–267
- 26 Dudschig C, Jentzsch I. Speeding before and slowing after errors: Is it all just strategy? *Brain Res*, 2009, 1296: 56–62
- 27 Jiang J, Scolaro A J, Bailey K, et al. The effect of music-induced mood on attentional networks. *Int J Psychol*, 2011, 46: 214–222
- 28 Aston-Jones G, Cohen J D. An integrative theory of locus coeruleus-norepinephrine function: Adaptive gain and optimal performance. *Annu Rev Neurosci*, 2005, 28: 403–450
- 29 Liu P, Yang W, Chen J, et al. Alertness modulates conflict adaptation and feature integration in an opposite way. *PLoS One*, 2013, 8: e79146
- 30 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
- 31 Klein T A, Endrass T, Kathmann N, et al. Neural correlates of error awareness. *NeuroImage*, 2007, 34: 1774–1781
- 32 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
- 33 Debener S, Ullsperger M, Siegel M, et al. Trial-by-trial coupling of concurrent electroencephalogram and functional magnetic resonance imaging identifies the dynamics of performance monitoring. *J Neurosci*, 2005, 25: 11730–11737
- 34 Verguts T, Notebaert W. Adaptation by binding: A learning account of cognitive control. *Trends Cogn Sci*, 2009, 13: 252–257
- 35 Clayton E C, Rajkowski J, Cohen J D, et al. Phasic activation of monkey locus ceruleus neurons by simple decisions in a forced-choice task. *J Neurosci*, 2004, 24: 9914–9920
- 36 Rajkowski J, Majczynski H, Clayton E, et al. Activation of monkey locus coeruleus neurons varies with difficulty and performance in a target detection task. *J Neurophysiol*, 2004, 92: 361–371
- 37 Braver T S, Gray J R, Burgess G C. Explaining the many varieties of working memory variation: Dual mechanisms of cognitive control. In: Conway A, Jarrold C, Kane M, et al, eds. *Variation in Working Memory*. New York: Oxford University Press, 2007. 76–106
- 38 Murphy P R, Robertson I H, Balsters J H, et al. Pupillometry and p3 index the locus coeruleus–noradrenergic arousal function in humans. *Psychophysiology*, 2011, 48: 1532–1543
- 39 King J A, Korb F M, von Cramon D Y, et al. Post-error behavioral adjustments are facilitated by activation and suppression of task-relevant and task-irrelevant information processing. *J Neurosci*, 2010, 30: 12759–12769

The alertness level influences post-error adjustments

WANG LiJun, LIU ChangPing, HU XuePing & CHEN AnTao

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

Post-error adjustment indicates that individuals execute a chain of adjustments after committing errors to reduce the likelihood of repeating an error, which is important for our survival and evolution. It includes post-error slowing (PES), post-error improvement in accuracy (PIA), and post-error reduction of interference (PERI) three types. However, there are still intensive disputes about the generation mechanisms of the post-error adjustment.

The cognitive control account suggests that errors are associated with the error monitoring and a subsequent intensification of top-down control. After committing an error, the error signal will initiate cognitive control mechanisms to improve subsequent performance by activating the anterior cingulate cortex. In this case, increased cognitive control enables flexible recruitment of attentional resources to the goal-related dimension in the subsequent task. However, the orienting account assumes that the infrequent events can easily capture the attentional resources, and thus participants need to take more time to reorient the subsequent task. The remaining resources will be insufficient to perform effectively the subsequent task, behaving as decreased post-error accuracy. Therefore, how the attention influences the post-error adjustment remains unclear.

To address the above issue, we first employed an attention network test (ANT) to evaluate the attention function of each participant. The ANT task was developed to measure the efficiency of the attentional networks including alerting, orienting and executive control through a simple cue (asterisk) and arrow Flanker task. There were four cue conditions: no cue, center cue, double cue, and spatial cue. In the no cue condition, only the fixation cross was presented in the center of the screen. In the center cue condition, an asterisk was presented in the center of the screen. In the double cue and spatial cue conditions, the fixation cross was always presented in the center of the screen. However, for the double cue condition, two asterisks were presented simultaneously at two possible target positions; for the spatial cue condition, an asterisk was presented at the target position. Additionally, the efficiency of alerting was defined as $RT_{no\ cue} - RT_{double\ cue}$, the efficiency of orienting was defined as $RT_{center\ cue} - RT_{spatial\ cue}$, and the efficiency of executive control was defined as $RT_{incongruent} - RT_{congruent}$. Then, we employed a letter Flanker task to examine the participants' performance in the post-error trials. PES was calculated by the RT of correct trials following errors minus the RT of correct trials following correct responses. PIA was calculated by the accuracy following errors minus the accuracy following correct response. And PERI was calculated by the interference magnitude ($RT_{incongruent} - RT_{congruent}$) following correct responses minus the interference magnitude following errors. To investigate which function of the attentional network influences the post-error adjustment, we correlated the scores of alerting, orienting and executive control with PES, PIA, and PERI, respectively. Finally, based on the correlation result, we grouped the participants as high alerting level group (32% participants) and low alerting level group (32% participants) to further examine the individual difference in the post-error adjustment.

As a result, we found that only the alerting score was negatively correlated with PES and PIA. Moreover, in the individual difference analysis, we found that the PES was only observed in the low alerting level group, but this effect was absent in the high alerting level group. For the PIA, there was no significant difference between two groups. These results may suggest that the alerting function plays an important role in the post-error adjustments, especially for the PES. High alerting level group has an advantage on enhanced alertness; they accordingly complete post-error adjustment with high efficiency.

post-error adjustments, attentional network test (ANT), alerting, individual difference

doi: 10.1360/N972015-01459