

# 返回抑制训练效应的认知神经机制 ——来自 ERP 研究的证据\*

徐 菊<sup>1</sup> 胡媛艳<sup>2</sup> 王 双<sup>1</sup> 李艾苏<sup>1</sup> 张 明<sup>1</sup> 张 阳<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 苏州大学教育学院心理学系, 苏州 215000)

(<sup>2</sup> 重庆文理学院认知神经科学与心理健康重点实验室, 重庆 402160)

**摘 要** 返回抑制是指个体对呈现在先前(约 250 ms 前)线索化或注视过位置的刺激反应更慢的现象。尽管有研究表明 IOR 在长时训练下存在稳定的训练效应, 但其相应的认知神经机制, 即训练究竟是如何影响 IOR 的迄今为止尚不明确。本研究采用对信息加工过程高敏感的事件相关电位技术结合长时训练和线索-靶子范式来对该问题进行考察。结果发现: 在行为上同前人研究结果相一致, 返回抑制效应在长时训练下表现出稳定的下降趋势; 更重要的是在脑电上同 IOR 行为效应量在训练后变小的结果相一致, 标识早期知觉加工的成分如 N1 等在有效和无效线索条件间的差异也表现出在训练后的降低。结果表明早期的知觉加工阶段是训练影响 IOR 的一个重要阶段, 为探明 IOR 训练效应的认知神经机制提供了来自电生理学的重要证据。

**关键词** 返回抑制; 长时训练; 事件相关电位; P1; N1; Nd250

**分类号** B842

## 1 前言

在复杂的生活环境中高效地搜索特定目标, 是人类赖以生存的一项重要认知技能(MacInnes, Hunt, Hilchey, & Klein, 2014)。维持或提高搜索效率的一种可能机制是减少返回先前注意过的位置或客体的概率(Gilchrist & Harvey, 2000; Klein, 2000)。大量研究表明一种被称为返回抑制(Inhibition of return, IOR)的效应可能在其中起着重要的作用(Klein, 2009; MacInnes & Klein, 2003; Shariat, Yazdi, Mirpour, & Bisley, 2012; 对此问题不同的观点参见 Hooze, Over, van Wezel, & Frens, 2005; Smith & Henderson, 2011a, 2011b)。

Posner 和 Cohen (1984)在考察注意定向问题时首次观测到了 IOR 效应。他们发现, 当线索和靶子呈现的时间间隔(Cue-Target onset asynchrony, CTOA)小于约 250 ms 时, 被试对出现在有效线索

位置的靶子相较于出现在无效线索位置的靶子而言有更快的反应, 即线索对靶子加工存在一个促进效应, 但当 CTOA 大于约 250 ms 时, 这一促进效应就转变为了一种抑制效应, 即对出现在有效线索位置的靶子有着更慢的反应。研究者把这种晚期的抑制效应称为 IOR (Dukewich & Klein, 2015; Klein, 2000; Lupiáñez, Klein, & Bartolomeo, 2006; 张阳, 彭春花, 孙洋, 张明, 2013)并针对其展开了大量的研究, 涉及到了成分(Sumner, 2006; Zhang & Zhang, 2011)、可塑性(Bao et al., 2011; Lupiáñez, Weaver, Tipper, & Madrid, 2001; 徐菊, 马方圆, 张明, 张阳, 2015; Pratt & McAuliffe, 1999; Weaver, Lupiáñez, & Watson, 1998)以及加工机制(Dukewich & Klein, 2015; Prime & Jolicoeur, 2009a, 2009b; Satel, Hilchey, Wang, Reiss, & Klein, 2014)等诸多方面。

IOR 的研究中一个重要的亦存在争论的问题是 IOR 是否具有可塑性, 即 IOR 是否受到练习的影

收稿日期: 2015-08-25

\* 国家自然科学基金项目资助(NSFC: 31300833/31371025)。

徐菊和胡媛艳同为第一作者。

通讯作者: 张阳, E-mail: yzhangpsy@suda.edu.cn; 张明, E-mail: psyzm@suda.edu.cn

响(Bao et al., 2011; Lupiáñez et al., 2001; 徐菊等, 2015; Pratt & McAuliffe, 1999; Weaver et al., 1998)。尽管早年 Weaver 等(1998)发现了显著的 IOR 训练效应, 随后的研究却指出该效应可能仅仅反映了反应时的天花板效应, 即随着练习的增加, 被试的反应时也在快速减小, 因而这种反应时的减小可能掩盖了 IOR 效应, 从而表现出了传统指标上( $RT_{\text{线索}} - RT_{\text{非线索}}$ )的训练效应(Bao et al., 2011; Pratt & McAuliffe, 1999)。当他们采用比例指标( $[RT_{\text{线索}} - RT_{\text{非线索}}] / RT_{\text{非线索}}$ )时并未观测到显著的 IOR 训练效应。新近徐菊等(2015)指出上述研究之所以未能观测到一致的稳定的 IOR 训练效应可能源于练习强度的不足, 当她们采用连续 8 天(约 3,000 试次)的长时训练任务时, 发现无论是在传统差异量指标上还是比例指标上, IOR 均随练习的增加表现出了显著的降低。

值得指出的是虽然徐菊等(2015)的研究发现了稳定的 IOR 训练效应, 但受限于行为技术本身的缺点, 她们的研究未能进一步探讨该效应的认知神经机制。大量研究表明, 对靶刺激的加工反应需要经历从感知觉加工到反应决策以及反应执行等一系列的认知过程(Clark, Appelbaum, van den Berg, Mitroff, & Woldorff, 2015; Hillyard & Anllo-Vento, 1998)。行为反应时更多地反映了这一系列加工过程的总和, 任何一个过程的变化都有可能导导致行为指标的变化(Luck, Woodman, & Vogel, 2000; Taylor & Klein, 2000), 因而, 单纯使用行为技术很难探讨 IOR 训练效应的认知神经机制, 即长时训练究竟是通过影响哪些加工过程来影响 IOR 的。相较而言, 事件相关电位技术(Event related potentials, ERPs)具有毫秒级的时间精度, 在研究认知加工的时间过程上有着天然的优势(Bacigalupo & Luck, 2015; Luck, 2014; Zhang & Luck, 2009), 因而常常被研究者们用来考察认知加工的时间过程(Luck, Vogel, & Shapiro, 1996; Zhang & Zhang, 2007)。本研究正是拟采用 ERPs 技术, 结合长时训练和经典的线索-靶子范式对 IOR 训练效应的认知神经机制进行考察。

研究中, 被试需要在连续 9 天的训练中完成一个经典的线索-靶子范式的作业。在第一天(训练前)和最后一天(训练后)训练的同时采集被试的脑电数据。这样, 本研究不仅可以在行为水平上扩展并重复验证徐菊等(2015)的研究结果, 更重要的是还可以通过对比训练前、后 ERPs 数据的变化模式来探讨 IOR 训练效应发生的时间阶段和进程: 若, 训练

是经由影响早期的感、知觉加工过程来影响 IOR 的, 则预期一些标识早期的 ERPs 成分如 P1、N1 等(Luck & Kappenman, 2011)在有效 vs 无效线索化条件间的差异会随着训练天数的增加而变化; 相反, 若训练是经由影响晚期其它加工过程如反应决策等来影响 IOR 的, 则预期早期成分如 P1、N1 等在有效 vs. 无效线索化条件间的差异并不会随着训练强度的变化而变化。

本研究的设计不但可以考察 IOR 训练效应的认知神经机制, 而且有助于考察另一 IOR 研究领域的热点问题, 即“IOR 效应的 ERPs 指标问题”。对该问题的研究上, 当前研究大多通过操控某一变量来改变 IOR 量, 同时考察 ERPs 成分在有效和无效线索化条件间的差异是否会随 IOR 量的变化而变化来确定同 IOR 相关的 ERPs 成分或指标。如, Prime 和 Jolicoeur (2009a)以及 Martín-Arévalo, Chica 和 Lupiáñez (2014)对有无中央线索刺激的操控, 以及 Wascher, Schneider 和 Hoffmann (2015)对 CTOA 的操控。然而, 这些研究存在的一个共性问题是引入的操控变量不仅改变了 IOR, 同时也改变了任务的刺激和程序。这有可能带来额外的混淆变量, 如中央线索本身的诱发电位对靶子诱发电位的混叠等。相较而言, 本研究的设计可以较好地避免上述问题, 训练虽然影响了 IOR 却没有改变刺激和程序, 训练前、后的 ERPs 实验采用了完全一样的刺激和程序。因而结果中任何随训练这一变量发生的变化都无法归因于刺激或程序上的差异。若某 ERPs 成分是 IOR 效应的稳定指标, 则预期该成分不仅在有效和无效线索化条件间存在显著的差异, 且这一差异会随着 IOR 行为效应量的变化而变化。

另外, 本研究还操纵了有、无中央线索化这一因素。这样的设计使得本研究除开可以探讨上述的主要目的外, 还在一定程度上对理清“中央线索化刺激是否对在辨别任务中观测到 IOR 有决定性作用”这一存在争论的问题有帮助。尽管自 Lupiáñez, Milan, Tornay, Madrid 和 Tudela (1997)的研究以来, 研究者们已经在大量的辨别任务中观测到了 IOR 效应(Gabay, Chica, Charras, Funes, & Henik, 2012; Gabay, Pertzov, & Henik, 2011; Lupiáñez, Ruz, Funes, & Milliken, 2007; Tian, Klein, Satel, Xu, & Yao, 2011; Zhang & Zhang, 2007; 张明, 张阳, 付佳, 2007), 新近 Martín-Arévalo 等(2014)的研究却指出有、无中央线索化对于能否在辨别任务中观测到 IOR 有着决定性的作用。他们发现, 尽管检测任务

中的 IOR 并不受到该因素的影响, 在辨别任务中却只有在中央线索化条件下观测到了 IOR, 无中央线索化条件不仅未观测到 IOR 还观测到了显著的易化效应。然而同该结果不相一致, 几项采用无中央线索化辨别任务的研究也发现了显著的 IOR 效应 (Gabay et al., 2012; Lupiáñez et al., 2007; Tian et al., 2011)。受限于不同的研究目的, Martín-Arévalo 等直接操控了“有、无中央线索化”这一因素, 而上述研究则只选取了无中央线索化作为实验的参数, 因而很难对这些研究进行直接地对比。本研究直接操控“有、无中央线索化”的设计有助于直接同 Martín-Arévalo 等的研究结果进行对比。若, “有、无中央线索化”对辨别任务中的 IOR 起着决定性的作用, 则预期在同 Martín-Arévalo 等任务更接近的本研究中观测到线索化效应在这一因素上的分离 (有中央线索化条件下观测到 IOR, 无中央线索化条件下观测到易化)。相反, 若中央线索化刺激并不是辨别任务中观测到 IOR 的必要因素, 则预期有、无中央线索化条件均能观测到显著的 IOR。

## 2 方法

### 2.1 被试

24 名 (男性 6 名, 女性 18 名,  $20.6 \pm 2.4$  岁) 随机招募的获得报酬的大学生志愿者。所有被试视力或矫正视力正常, 过去未参加过类似实验。

### 2.2 设备、刺激和流程

实验在安静、微暗的实验室里进行。程序采用 E-prime 2.0 编制, 运行于带独立显卡的微型计算机上 (ThinkCentre M4300T)。实验刺激呈现在 22 英寸的 CRT 显示器上 (分辨率:  $1024 \times 768$ , 刷新频率: 100 Hz)。实验过程中被试距显示器约 80 cm。反应设备为一个 7 键的 SideWinder 游戏手柄 (X04-97602)。

正式实验中一次测试的流程如图 1 所示: (1) 每次测试开始时, 在灰色背景的屏幕中央呈现 3 个黑色方框作为注视点 ( $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ ) 和地标 ( $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ )。要求被试一直盯着注视点直至测试结束。(2) 800 ms 后, 某一随机选定的外侧方框由黑变白变粗 150 ms 作为外周提示线索。(3) 外周线索消失 150 ms 后, 注视点变白变粗 150 ms, 起到迫使注意回到中央注视点的作用 (无中央线索化条件下则保持注视点不变 150 ms)。(4) 注视点恢复到初始状态 300 ms ~ 800 ms 后 [随机的目的在于消除外周线索诱发的 ERPs 信号对随后出现的靶子诱发信号的混叠 (Woldorff, 1993)], 以均等概率随机的在外侧某一方框中呈现一个英

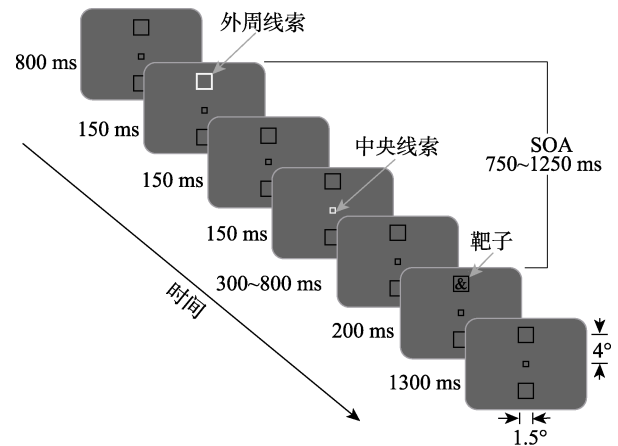


图 1 正式实验中, 有中央线索化条件下, 一次测试的流程

文靶子字符 (“@”或“&”, 宋体 31 号, 约  $1.48^\circ \times 1.48^\circ$ ) 200 ms。(5) 1300 ms 后, 外周地标方框消失, 标志着一次测试的结束。被试需要在这之前, 根据字符的类型既快又准地按相应的键做出反应。实验过程中靶子刺激和反应键之间的匹配在被试间进行平衡, 即一半的被试被要求对 “@” 和 “&” 分别按手柄上的 “左” 和 “右” 键进行反应, 另一半的被试则按相反的键进行反应。在实验前明确告知被试, 外周线索同靶子刺激出现的位置间无任何联系。

实验由 9 天连续的训练构成, 包含一次 ERPs 前测、7 次行为训练和一次 ERPs 的后测。每天的训练由 12 组 64 次的测试构成: 一半试次中外周线索和靶子出现在相同的位置, 另一半试次中外周线索和靶子出现在不同的位置。同样, 一半试次中有中央线索化刺激, 另一半试次没有中央线索化刺激。每组测试中, 所有实验试次以完全随机的方式呈现。因此, 在每天训练中, 每个实验条件下有 192 次测试。每个被试在每天训练前, 完成一个包含约 20 次测试的练习。练习与正式训练程序唯一不同在于练习测试会对被试的反应按正确与否做出反馈。

### 2.3 实验设计

采用  $9(\text{训练天数}) \times 2(\text{线索有效性}) \times 2(\text{有无中央线索化})$  的三因素被试内设计。训练天数有 9 个水平; 线索有效性有两个水平: 在有效线索化条件下, 外周线索和靶子出现在相同的位置; 在无效线索化条件下, 外周线索和靶子出现在不同的位置。有无中央线索化包含两个水平: 即有中央线索化条件和无中央线索化条件。在第一天和最后一天被试完成任务的同时记录脑电数据。

### 2.4 脑电数据采集和预处理

采用 Neuroscan 公司的 ERPs 记录和分析系统

(Scan 4.3), 利用 10-20 系统扩展的 64 导的 Quick-cap 电极帽采集脑电(Electroencephalogram, EEG)和眼电(Electrooculographic, EOG)数据。连续的 EEG 和 EOG 由 Synamps 2 放大器放大并经 0.05 ~ 100 Hz 的模拟滤波器滤波后, 以 1000 Hz 的采样率采集并保存到计算机硬盘上。采集时, 前额叶接地, 以左侧耳后乳突为参考。除 64 导 EEG 通道外, 另采用了 2 导双极导联来监测眼电: 其中 1 导的两极分别置于左眼上下约 1.5 cm 处, 用于记录垂直眼电(VEO), 另外 1 导的两极则分别置于左右两眼眼角外侧约 1.5 cm 处, 用于记录水平眼电(HEO)。实验过程中所有电极阻抗保持在 5 k $\Omega$  以下。

脑电数据经手动伪迹去除和 40 Hz 的低通滤波后(FIR, 24 dB/octave), 以独立成分分析法去除眨眼、心电、肌电等伪迹(Delorme, Palmer, Onton, Oostenveld, & Makeig, 2012; Leutheuser et al., 2013)。随后, 以靶子刺激出现时刻为零点进行分段(-200 ~ 400ms)和基线校正(-200 ~ 0 ms)。这之后以移动窗口技术识别并去除存在眼动和眨眼的分段数据(Lopez-Calderon & Luck, 2014)。随后, 以自适应平均法去除数据中残留的包含伪迹的分段数据, 该方法以每个分段数据对平均 ERPs 的贡献为指标来识别出负贡献(即带来的噪音大于信号)的分段, 较传统固定阈值(如 $\pm 75$   $\mu$ V)法而言效果更优(Talsma, 2008)。随后, 将分段数据转化为以双侧乳突平均参考后进一步转化为包含双侧乳突电极在内的所有 EEG 电极的平均参考。最后对不含伪迹、行为反应正确的分段数据, 按照 2(训练前、后) $\times$ 2(线索有效性) $\times$ 2(有无中央线索化)的分类进行叠加。整体剔除了约 18.9%的数据, 平均每个实验条件下剩余的有有效分段数据数为  $156 \pm 2$ 。未经 ICA 处理的 HEO 和 VEO 总平均波形的幅度最大值分别为 0.5  $\mu$ V 和 2.17  $\mu$ V, 即水平和垂直方向的平均眼动幅度分别

小于 0.03 和 0.13 $^\circ$ 视角(Lins, Picton, Berg, & Scherg, 1993)。

### 3 数据分析与结果

#### 3.1 行为数据分析与结果

对每个被试、每个实验条件下的数据, 以非递归移动标准法(van Selst & Jolicoeur, 1994)剔除极端值。对正确率和正确试次的平均反应时进行 9 (训练天数) $\times$ 2 (线索有效性) $\times$ 2 (有无中央线索化)的重复测量的方差分析。对所有不满足球形检验假设的利用 Greenhouse-Geisser 法对  $p$  值进行校正, 并将之记为  $p_c$ 。

##### 3.1.1 正确率结果

图 2A 呈现了 4 种条件下的正确率随训练天数变化的趋势图。方差分析结果发现, 有无中央线索化的主效应显著,  $F(1, 23) = 5.19, p = 0.032, \eta_p^2 = 0.18$ , 被试在有中央线索条件下的正确率(0.95)要显著低于无中央线索条件的正确率(0.953)。线索有效性 $\times$ 有无中央线索化的交互作用显著,  $F(1, 23) = 9.99, p = 0.004, \eta_p^2 = 0.30$ , 进一步的简单效应分析表明, 有无中央线索条件间的差异仅在有效线索化条件下达到了显著,  $F(1, 23) = 9.82, p = 0.005, \eta_p^2 = 0.33$ , 被试在有中央线索下的正确率(0.94)要显著低于无中央线索的正确率(0.95)。其余各主效应和各阶交互效应均不显著。

##### 3.1.2 反应时结果

图 2B 呈现了 4 种条件下的平均反应时随训练天数变化的趋势图。方差分析结果发现, 训练的主效应显著,  $F(8, 184) = 14.98, p_c < 0.001, \eta_p^2 = 0.39$ , 随训练天数的增加, 被试的反应显著变快[线性趋势对比检验显著,  $F(1, 23) = 41.15, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.64$ , 平均反应时从第 1 天的 587 ms 逐渐减少到第 9 天的 507 ms]。线索有效性的主效应显著,  $F(1, 23) =$

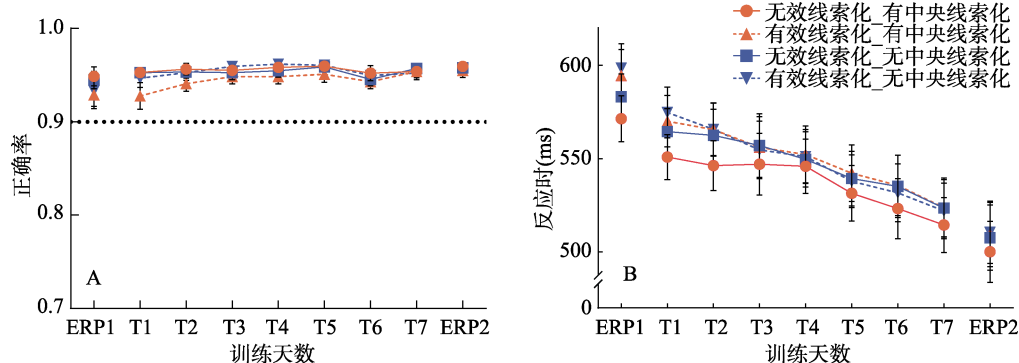


图 2 四种条件下的平均正确率(A)和平均反应时(B)随训练天数变化的趋势图, 误差项为 $\pm 1$  倍标准误。



5.82,  $p = 0.024$ ,  $\eta_p^2 = 0.20$ , 被试在有效线索化条件下的反应时(550 ms)显著地大于无效线索化条件下的反应时(542 ms), 即出现了返回抑制效应。有无中央线索化的主效应显著,  $F(1, 23) = 33.67$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta_p^2 = 0.59$ , 被试在有中央线索化条件下的反应时(543 ms)显著地小于无中央线索化条件下的反应时(548 ms)。训练 $\times$ 有无中央线索化的交互作用显著,  $F(8, 184) = 2.93$ ,  $p = 0.004$ ,  $\eta_p^2 = 0.11$ , 进一步的简单效应分析表明, 有、无中央线索化条件下反应时差异在 5, 6 两天中并未达到显著( $F < 1.12$ )。线索有效性 $\times$ 有无中央线索化的交互作用显著,  $F(1, 23) = 19.34$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta_p^2 = 0.46$ , 进一步简单效应分析表明, 有中央线索化条件下存在更大的 IOR 效应[有中央线索化: 13 ms; 无中央线索化: 3 ms] (图 3)。更重要的是结果发现了显著的训练 $\times$ 线索有效性的交互效应,  $F(8, 184) = 4.53$ ,  $p_c = 0.005$ ,  $\eta_p^2 = 0.16$ 。为进一步考察该交互效应的趋势, 针对 IOR 效应量进行了单因素(训练天数)的重复测量的方差分析。结果发现 IOR 表现出了显著的训练效应,  $F(8, 184) = 4.53$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta_p^2 = 0.17$ , 从训练前的 19 ms 降低到了训练后的 6 ms (图 4A)。训练 $\times$ 线索有效性 $\times$ 有无中央线索化三因素的交互作用不显著,  $F(8, 184) = 1.49$ ,  $p = 0.16$ , IOR 的训练效应并未在有、无中央线索化条件间表现出显著的差异。

### 3.2 脑电数据分析与结果

P1 和 N1 成分: 选择 PO7、PO5、PO3、POz、PO4、PO6 以及 PO8 电极对 P1 和 N1 成分进行参数分析, 所有条件总平均波形图中峰值前后各 15 ms 的区间作为其分析时间窗(P1: 110~140 ms, N1: 170~200 ms)。随后, 对 P1 和 N1 以时窗内的平均幅值进行 2(线索有效性)  $\times$  2(训练天数: 第 1 天和第 9 天)  $\times$  2(有无中央线索化: 有中央线索化条件和

无中央线索化条件)  $\times$  7 (电极)的重复测量的方差分析。

P2 成分: 选择电极 CP1、CPz、CP2、P1、Pz、P2 对 P2 成分做参数分析。选择 240~280 ms 时间窗内信号平均值作为 P2 的幅值。随后, 对 P2 的幅值做 2 (线索有效性)  $\times$  2 (训练天数: 第 1 天和第 9 天)  $\times$  2 (有无中央线索化)  $\times$  6 (电极)的重复测量的方差分析。

最后为进一步探讨上述 3 种成分的线索化效应量的训练效应同行为 IOR 训练效应间的关系, 对上述 3 种成分的线索化效应量的训练效应量[即, (训练前\_无效线索化 - 训练前\_有效线索化) - (训练后\_无效线索化 - 训练后\_有效线索化)]同行为 IOR 训练效应量(即, 训练前 IOR 量 - 训练后 IOR 量)进行了逐步回归分析。

对所有统计分析中不满足球形检验假设的利用 Greenhouse-Geisser 法对  $p$  值进行校正, 并将之记为  $p_c$ 。

#### 3.2.1 P1 成分

图 5 呈现了 PO7、PO5 和 PO8 电极上-200~400 ms 的波形图(A)以及 P1 成分(B)的差异波地形图。对 P1 成分的重复测量方差分析发现, 有无中央线索化的主效应显著,  $F(1, 23) = 8.61$ ,  $p = 0.007$ ,  $\eta_p^2 = 0.27$ , P1 在无中央线索化条件下(0.76  $\mu V$ )相对有中央线索化条件(0.55  $\mu V$ )而言有更大的幅值。有无中央线索化 $\times$ 电极的交互效应边缘显著,  $F(6, 138) = 2.75$ ,  $p_c = 0.07$ ,  $\eta_p^2 = 0.11$ 。训练的主效应显著,  $F(1, 23) = 8.56$ ,  $p = 0.008$ ,  $\eta_p^2 = 0.27$ , 同前人关于训练的 ERP 研究结果相一致(Zhang, Cong, Song, & Yu, 2013), P1 的幅值随训练表现出了显著的下降(0.88 vs. 0.42  $\mu V$ )。尽管训练 $\times$ 线索有效性的交互作用达到了边缘显著,  $F(1, 23) = 3.17$ ,  $p = 0.09$ ,  $\eta_p^2 = 0.12$ , 进一

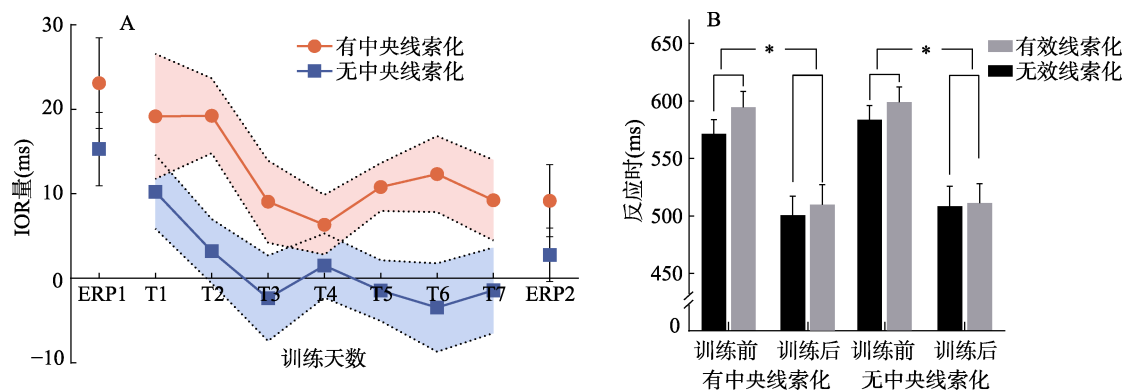


图 3 A、有、无中央线索化条件下 IOR 效应量( $RT_{有效线索化} - RT_{无效线索化}$ )随训练天数变化的趋势图。B、训练前后的 ERPs 实验中, 有、无中央线索化条件下各实验条件的平均反应时。图中误差线为 $\pm 1$  倍标准误。\*  $p < 0.05$

步的简单效应分析却发现, P1 的线索化效应无论是在训练前还是训练后均未达到显著( $p > 0.22$ ) (图 4B)。有无中央线索化 $\times$ 训练的交互作用边缘显著,  $F(1, 23) = 3.18, p = 0.09, \eta_p^2 = 0.12$ , 进一步的简单效应分析表明, P1 的有无中央线索化差异只在训练后达到显著[训练前:  $F < 1$ ; 训练后:  $F(1, 23) = 15.87, p = 0.001, \eta_p^2 = 0.41$ ]。除此外, 其余各主效应和各阶交互效应均不显著。

### 3.2.2 N1

图 5 呈现了 PO7, PO5 和 PO8 电极上 $-200 \sim 400$  ms

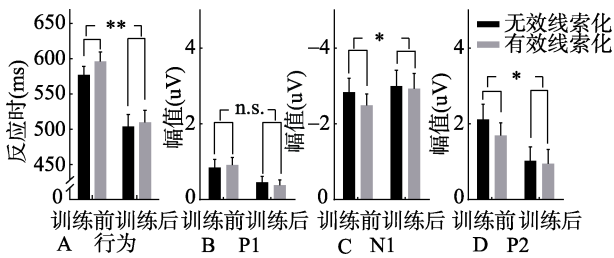


图 4 训练前、后的有、无效线索化条件下的平均行为反应时和 P1, N1, P2 成分的幅值。图中误差线为 $\pm 1$ 倍标准误。\*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; n.s. 不显著

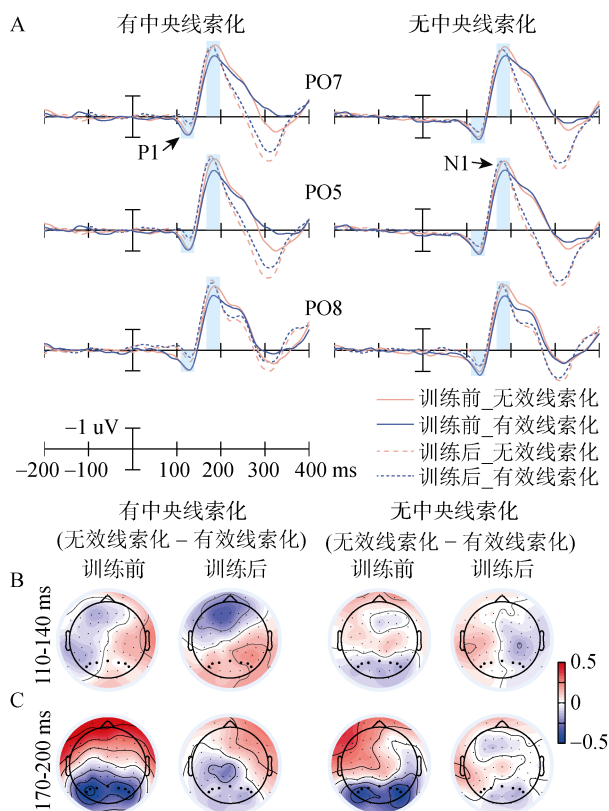


图 5 PO7, PO5 和 PO8 电极上 $-200$  ms  $\sim$   $400$  ms 的波形图(A)以及 P1(B)和 N1(C)差异波的地形图。地形图中黑色点表示进入统计分析的电极。

注: 彩图见电子版, 下同

的波形图(A)以及 N1 差异波的地形图(C)。对 N1 成分的重复测量方差分析发现, 线索有效性的主效应显著,  $F(1, 23) = 6.65, p = 0.017, \eta_p^2 = 0.22$ , N1 在无效线索化条件下有更负的偏向(无效线索化:  $-2.92 \mu V$ , 有效线索化:  $-2.68 \mu V$ )。有无中央线索化的主效应边缘显著,  $F(1, 23) = 3.82, p = 0.063, \eta_p^2 = 0.14$ , 相对无中央线索化条件( $-2.73 \mu V$ )而言, 有中央线索化条件下 N1 的幅值更大( $-2.87 \mu V$ )。训练 $\times$ 线索有效性的交互作用显著,  $F(1, 23) = 5.68, p = 0.026, \eta_p^2 = 0.20$ , 进一步的简单效应分析表明, 有效、无效线索化条件的 N1 幅值只在训练前存在显著差异[训练前:  $F(1, 23) = 10.19, p = 0.004, \eta_p^2 = 0.31$ ; 训练后:  $F < 1$ ] (图 4C)。除此外, 其余各主效应及各阶交互效应均不显著。

### 3.2.3 P2

图 6 呈现了 CPz 和 Pz 电极上各条件下的波形图(A)以及 P2 差异波(无效线索化 - 有效线索化, 因其约出现在  $200 \sim 300$  ms 间, 且有效线索化条件相较而言更负的偏向, 研究者们常将这一差异称为 Nd250<sup>1</sup>)的地形图(B)。重复测量方差分析发现, 训练的主效应显著,  $F(1, 23) = 10.20, p = 0.004, \eta_p^2 = 0.31$ , P2 的平均幅值由训练前的  $1.91 \mu V$  降低到了训练后的  $0.99 \mu V$ 。线索有效性的主效应显著,  $F(1, 23) = 9.91, p = 0.005, \eta_p^2 = 0.30$ , 相较无效线索化条件( $1.57 \mu V$ )而言, 有效线索化条件( $1.32 \mu V$ )有更低的 P2 幅值, 也即观测到了显著的 Nd250。训练 $\times$ 线索有效性的交互效应显著,  $F(1, 23) = 4.41, p = 0.047, \eta_p^2 = 0.16$ , 进一步的简单效应分析发现, P2 的线索化效应, 即 Nd250 只在训练前达到了显著[训练前:  $F(1, 23) = 7.99, p = 0.010, \eta_p^2 = 0.26$ ; 训练后:  $F(1, 23) = 1.62, p = 0.216$ , Nd250 由训练前的  $0.42 \mu V$  降低到了训练后的  $0.08 \mu V$ ] (图 4D)。线索有效性 $\times$ 电极的交互作用显著,  $F(5, 115) = 4.21, p_c = 0.014, \eta_p^2 = 0.16$ 。有无中央线索化 $\times$ 电极的交互作用边缘显著,  $F(5, 115) = 2.71, p_c = 0.063, \eta_p^2 = 0.11$ 。训练 $\times$ 有无中央线索化 $\times$ 电极的三因素交互作用显著,  $F(5, 115) = 3.86, p_c = 0.023, \eta_p^2 = 0.14$ , 进一步的简单效应分析发现, 除开无中央线索化条件下训练前

<sup>1</sup> 不同的研究对该成分有不同的命名, 如 Nd, Nd2, 考虑到这些命名易同其它相关研究中的命名相混淆[如, McDonald, Ward 和 Kiehl (1999)研究中的 Nd 实际上反映了 N1 成分的差异, 而 P2 的差异才是真正的 250 ms 左右的 Nd], 同时 Nd250 这一称谓更容易明确成分的时间窗, 在本研究中将之命名为 Nd250。

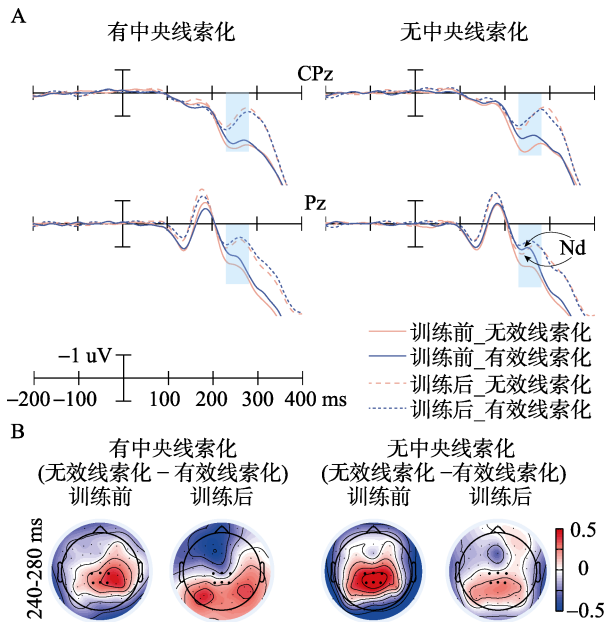


图6 呈现了CPz和Pz电极中的-200 ms~400 ms的波形图(A)以及差异波Nd250的地形图(B)。地形图中黑色点表示进入统计分析的电极。

后的平均幅值在电极P1上未达到显著外 $[F(1, 23) = 3.24, p = 0.085, \eta_p^2 = 0.12]$ , 各条件下训练前后的平均幅值在其余电极上均达到了显著( $p < 0.05$ )。除此外, 其余各主效应及各阶交互效应均不显著。

### 3.2.4 训练效应的回归分析

逐步回归分析发现, 只有N1和Nd250成分进入了回归方程并达到了显著水平,  $\beta_{N1} = -0.57, t = -3.65, p < 0.001$ ;  $\beta_{Nd250} = 0.42, t = 2.68, p < 0.014$ , 整体模型决定系数 $R^2 = 0.49$  (调节后的 $R^2 = 0.44$ )。

## 4 讨论

### 4.1 IOR训练效应的认知神经机制

尽管Weaver等(1998)发现IOR效应具有很大的可塑性——随着练习显著减小, 并用此来解释一些重要的相互矛盾的研究结果, 随后的研究却未观测到显著的IOR训练效应(Bao et al., 2011; Pratt & McAuliffe, 1999)。新近, 徐菊等(2015)指出这些不一致的结果可能源于训练强度的不足, 为此她们利用多达3072次试次的练习, 结果发现在长时训练下, IOR存在稳定的训练效应。受限于行为技术对信息加工阶段的不敏感性(Luck, 2014; Luck & Kappenman, 2011), 她们的研究并未探讨这一稳定训练效应背后的认知神经机制。

本研究正是试图利用对信息加工过程高度敏感的ERPs技术来考察这一稳定训练效应的加工机制, 即长时训练是如何减弱IOR效应的。行为结果

上, 同大量关于训练的研究相一致, 被试的平均反应时随着训练的增加呈现出了稳定下降的趋势(图2B)。更重要的是, 与徐菊等(2015)的研究结果相一致, IOR也表现出了显著的训练效应, 效应量从第1天的19 ms降低到了第9天的6ms(图4A)。ERPs结果上, 在训练前的ERPs实验中发现相较无效线索化条件, 有效线索化条件下的靶子刺激诱发了更小N1(图5)成分, 同时亦在P2的时间窗内表现出了更负的偏向, 即观察到了显著Nd250效应。更重要的是同行为上表现出的IOR随训练增加而显著降低相一致, N1成分的线索化效应( $N1_{\text{无效线索化}} - N1_{\text{有效线索化}}$ )和Nd250成分均在训练后相较训练前而言表现出了更低的幅度(图4)。大量ERP研究表明, N1的线索化效应同知觉加工有着密切的联系(Prime & Jolicoeur, 2009a; Prime & Ward, 2006; Luck, 2014; Luck & Kappenman, 2011), 因而本研究的结果提示早期知觉加工阶段很有可能是训练对IOR发挥影响的一个重要阶段。

同N1效应相比, Nd250的意义以及它是否是一个标识IOR的有效ERPs指标当前并非十分明确(关于Nd250同IOR关系的探讨详见4.2)。一些研究者认为Nd250可能和IOR无关(Eimer, 1994; Wascher & Tipper, 2004), 而是反映了一种对有效线索化位置信息加工的偏好; 另一些研究者则认为Nd250与IOR密切相关, 是一个标识IOR的有效指标(Satell et al., 2014)。因而, 当前很难确切地解释Nd250在本研究所表现出的幅度随训练天数的增加而降低的含义。尽管如此, 单从时程上看该成分晚于N1成分, 很有可能反映了知觉辨别之后的某一加工过程, 因而有可能训练不仅仅经由早期知觉加工阶段来影响IOR, 也经由一些知觉辨别过程之后的其它的加工过程来影响IOR。当然这仅仅是一个推测, 还需要新的研究来探明。

另外, 需要指出的是尽管本研究结果表明, 知觉辨别加工阶段是训练调控IOR的重要加工阶段, 但这并不意味着知觉加工阶段是训练对IOR发生影响的唯一阶段: 一方面, 若, 如Satell等(2014)所指出, Nd250是标识IOR效应的有效指标, 则训练很有可能经由知觉加工后的由Nd250标识的加工过程来影响IOR; 另一方面, 受限于当前研究所采用的任务, 本研究并不能很好地考察一些晚期加工过程, 如反应决策过程等在IOR训练效应中的贡献。对该问题的回答还亟待新的研究来探明。一种可能是利用ERPs技术结合长时训练和不同的适合



评估晚期加工过程(如语义加工、反应决策等)的任务,如线索-靶子范式同 Go-Nogo 或 Stroop 范式结合的任务等。

#### 4.2 IOR 的有效 ERPs 指标

本研究的结果对“IOR 的有效 ERPs 指标”这一热点问题也有重要的意义。尽管研究者们利用 ERPs 技术对 IOR 展开了大量的研究(McDonald, Hickey, Green, & Whitman, 2009; Prime & Ward, 2004; Satel, Hilchey, Wang, Story, & Klein, 2013; Satel, Wang, Hilchey, & Klein, 2012),但迄今为止,究竟哪些 ERPs 成分的变化能很好地标识 IOR 的变化,仍未有一致的结论,甚至有一些相互矛盾的结果。如,尽管 Prime 和 Jolicoeur (2009a)通过操纵有无中央线索化来调节 IOR 效应的研究发现,枕叶 P1, N1 同 IOR 的变化有着密切的关系,本研究和一些其它的研究却发现显著的 IOR 行为效应并非总是伴随着显著的 P1 效应(Hopfinger & Mangun, 2001; Prime & Ward, 2006, 实验 2)。又如,虽然 Satel 等(2014)的研究提示 Nd250 可能是一个更好、更稳定的标识 IOR 的指标,Prime 和 Jolicoeur (2009a)以及 Wascher 和 Tipper (2004)却在没有或较小 IOR 的实验条件中观察到了更大幅度的 Nd250。

上述考察 IOR 相关 ERPs 指标的研究多采用操纵某一变量来改变 IOR 的量,同时考察哪些成分的线索化效应会随 IOR 量的改变而改变,从而来确定同 IOR 有密切关联的 ERPs 成分,如 Prime 和 Jolicoeur (2009a)对有、无中央线索化的操纵, Satel 等(2014)对线索刺激类型的操纵, Wascher 和 Tipper (2004)对线索消失与否的操纵及 Wascher 等(2015)对 CTOA 的操纵。这些研究的一个共性问题是在改变 IOR 的同时也引入了新的可能的混淆变量,如

有、无中央线索化可能导致有中央线索化条件下存在 ERPs 混叠等问题。当前研究由于在训练前后采用的是完全相同的任务、刺激和程序,相较而言更好地匹配了实验条件间的这些差异,排除了这些混淆变量的可能干扰。结果发现, N1 和 P2 而非 P1 不仅表现出了在有效线索化条件下更小的幅度,其各自的线索化效应量更是表现出了随训练天数增加(以及 IOR 行为效应量的降低)而显著减小的趋势。进一步的量化回归分析也发现 N1 线索效应量和 Nd250 线索效应量的训练效应能显著地预测行为 IOR 的训练效应( $R^2 = 0.49$ )。因而,这些结果表明 N1 和 Nd250 可能才是 IOR 的有效电生理指标。

尽管上述结论也得到了部分过往研究的支持,如 Satel 等(2014)关于 Nd250 能更好地标识 IOR 的结果以及 Prime 和 Ward (2006)和 Gutiérrez-Domínguez 等(2014)发现了显著的 N1 和 Nd 效应却未发现显著的 P1 效应,但却仍然同部分过往研究在以下两个方面存在着看似不一致(甚至相互矛盾)的结果需要进一步理清。一方面,本研究结果提示 P1 可能并不是 IOR 效应的一个有效指标,但同该推论不相吻合, Satel 等(2013)对 9 项研究结果的元分析却发现 IOR 效应量同 P1 效应量存在显著的相关。尽管如此,需要指出的是 Satel 等的的数据包含了两项存在行为易化效应而非 IOR 的数据(图 7A),可能影响了她们的计算结果。我们对其数据的重分析发现,当去除了行为易化效应的数据后, IOR 效应同 P1 线索化效应的相关并未达到显著水平( $r = 0.184, p = 0.496$ )。为进一步验证该结果,我们又以有 IOR 效应为标准对 18 篇 IOR 的 ERPs 文献(Chica & Lupiáñez, 2009; Gutiérrez-Domínguez et al., 2014; Hopfinger & Mangun, 1998, 2001; Martín-

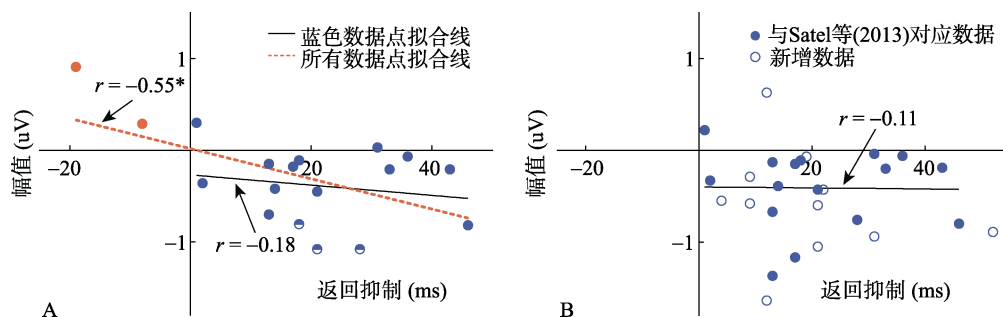


图 7 过往文献中 IOR 效应量同 P1 线索效应量的关系。A) Satel 等(2013)的数据(我们只在她们的图中找到了 18 个数据点,因而计算得到的相关系数同原文略有出入),图中半填充圆点表示未能在相关文献中找到对应数据。B)在 satel 等基础上新增(空心点)数据(共 27 对数据)后 IOR 量同 P1 线索效应量的相关。数据提取时,原文若有相关数值则直接使用,原文没有提供数值则由 GetData 软件从波形图中获得(峰值差异,多个电极情况取效应量最大的电极)。



Arévalo et al., 2014; McDonald, Ward, & Kiehl, 1999; Prime & Ward, 2004, 2006; Prime & Jolicoeur, 2009a, 2009b; Satel et al., 2012; Satel et al., 2013; Satel et al., 2014; Tian et al., 2011; Tian & Yao, 2008; van der Lubbe, Vogel, & Postma, 2005; Wascher & Tipper, 2004; Zhang, Zhou, & Zhang, 2012)以 Satel 等类似的方法进行了分析(图 7B), 结果同样未观测到 P1 线索化效应量同 IOR 的显著相关( $r = 0.109$ ,  $p = 0.589$ )。这同本研究结果所提示的 P1 并非 IOR 的有效指标是相吻合的。

另一方面, 同本研究结果所提示的 N1 是 IOR 的一个有效指标不相一致, 有许多存在显著 IOR 效应的 ERPs 研究并未观测到显著的(有的甚至是发现了相反的)N1 线索化效应, 如 McDonald 等(1999), Hopfinger 和 Mangun (2001)以及 Wascher 和 Tipper (2004)的研究。初看这些研究的结果同本研究结果并不一致, 但仔细阅读上述研究不难发现, 这些研究均采用同当前研究完全不同的检测任务, 考虑到有研究表明, N1 的线索化效应更多的是对辨别加工过程敏感(Hillyard & Anllo-Vento, 1998; Luck, 2014; Luck & Ford, 1998; Luck & Kappenman, 2011), 因而本研究同这些研究结果的不一致有可能是源于任务类型的不一致: IOR 辨别任务涉及更多的辨别加工过程, 因而在 N1 上表现出了线索化效应, 而 IOR 的检测任务不涉及辨别加工过程, 因而无法在 N1 上表现出线索化效应。当然, 这仅仅是一个推测, 无疑需要新的研究系统地比较不同任务中的 IOR 的 ERPs 表现来对该问题进行考察。

值得注意的是尽管研究结果和先前一些研究的结论相一致(Hopfinger & Mangun, 2001), 并未观测到 P1 同 IOR 相关的证据, 但当前研究亦未有在与先前部分研究相接近的训练前的 ERP 结果(Prime & Jolicoeur, 2009a, Hopfinger & Mangun, 1998)下观测到显著的 P1 线索化效应。一种可能是, 任务难度影响了早期的信息加工进而导致了上述差异(Wang, Song, Qu & Ding, 2010; Qu et al., 2014)<sup>2</sup>, 毕竟当前研究训练前的正确率高达约 95%, 而 Hopfinger 和 Mangun (1998)则只有 90%。但对这些研究的仔细比较并不支持这一可能性, 一方面 Prime 和 Jolicoeur (2009a)在与当前研究正确率相当的情况下观测到了显著的 P1 线索化效应; 另一方面, 尽管 Hopfinger 和 Mangun (1998)在正确率稍低的情况有观测到显

著的 P1 线索化效应, 该效应却未伴随着显著的 IOR 效应(约 2 ms)。相较而言, 另一种更有可能的原因则是当前研究在线索-靶子间采用较宽的随机区间(500 ms), 这远比先前研究所采用的随机区间宽(Prime & Jolicoeur, 2009a: 200 ms, Hopfinger & Mangun, 1998: 300 ms), 因而可以更有效的去除了外周线索本身诱发的 ERP 对靶子诱发 ERP 的混叠。当然, 这仅仅是一种可能性, 无疑还亟待新的研究来探明。

#### 4.3 中央线索化对辨别任务中 IOR 效应的影响

当前研究的结果对“中央线索化对辨别任务中 IOR 的影响”这一问题的探讨也有着一定的意义。尽管 IOR 已为大量采用辨别任务的研究所观测到, 新近 Martín-Arévalo 等(2014)的研究却指出有、无中央线索化可能对辨别任务中能否观测到 IOR 有着决定性的作用。他们发现, 尽管检测任务中有、无中央线索化并不影响 IOR, 在辨别任务中却只有存在中央线索化时才能观测到 IOR, 无中央线索化条件下, 不仅未观测到 IOR 还观测到了显著的易化效应。Martín-Arévalo 等利用 Lupiáñez 等(2007), Lupiáñez (2010)提出的分离-整合理论来解释上述发现。该理论认为, 外周线索会诱发两种不同加工过程, 即定向/空间选择收益和检测损失, 前者有利于辨别加工过程, 而后者不利于检测加工过程。行为反应时是两种加工过程作用的总和。Martín-Arévalo 等指出中央线索化中断了对有效线索化位置的定向/空间选择收益, 凸显出了检测损失从而表现出了 IOR, 而无中央线索化时, 则是由于辨别任务本身偏向于辨别加工从而更多地表现出了空间选择收益的过程, 从而最终在行为上表现出了易化效应。与辨别任务不同, 检测任务的加工过程并不涉及辨别加工, 主要表现出来的是检测损失, 因而无论有、无中央线索化均不会影响 IOR 的出现。同该假设相一致, van Der Lubbe 等(2005)也在没有中央线索化的辨别任务中发现了显著的易化而非 IOR 效应。

然而, 并非所有的研究都符合 Martín-Arévalo 等(2014)的预期, 如 Tian 等(2011), Lupiáñez 等(2007)以及 Gabay 等(2012)均在没有中央线索化的辨别任务中发现了显著的 IOR 效应, 而非易化效应。遗憾的是这些研究都仅是选择了无中央线索化作为实验的设置, 未直接操纵“有、无中央线索化”这一因素, 因而很难将这些研究结果同 Martín-Arévalo 等的研究进行直接地对比。相较而言, 本研

<sup>2</sup> 感谢匿名审稿人提出这一可能性。

究直接对“有无中央线索化”这个因素进行了操纵,因而可以直接对这两种条件下的线索化效应进行对比。实验结果发现无论是有还是没有中央线索化条件都观测到了显著的 IOR, 尽管后者相较而言有更低的 IOR 量(图 3A), 这一结果同 Martín-Arévalo 等研究并不一致。尽管 Martín-Arévalo 等的理论可以通过假设无中央线索化的辨别任务中, 检测损失机制仅仅是被弱化而非消失就来解释上述结果: 弱化而非消失的检测损失导致了相较有中央线索化条件而言 IOR 量的降低而非消失, 但这样的修改也面临着怎样合理地解释这种权重的变化是如何导致上述研究间截然不同的结果的(IOR 效应 vs. 显著易化), 即为何 Martín-Arévalo 等任务中的量变数量远远大于当前研究以及上述研究。

另外, 本研究结果所发现的有、无中央线索化条件下 IOR 训练效应的变化模式也并不支持 Martín-Arévalo 等(2014)的假设。根据他们的观点, 有、无中央线索化条件下的 IOR 不是质的区别而是检测损失权重的区别, 进而预期这两种条件下的 IOR 在本研究中表现出等比例的下降, 即有中央线索化条件减少得更多。从图 3A 不难看出, 尽管有、无中央线索化条件下的 IOR 都随训练天数的增加表现出了显著的下降, 两者的下降幅度却未表现出显著的差异( $p = 0.16$ )。因而当前结果提示, 这两种条件下 IOR 的差异可能并非量上的不同, 而是质上的不同, 即似乎有中央线索化条件下存在一个不同来源的线索化效应, 这部分效应并不受训练的影响。尽管受限于当前研究的主要目的(IOR 的训练效应), 本研究并未采用同 Martín-Arévalo 等完全一致的设计, 因而很难对这种不一致的结果做出明确地解释, 但无疑这是今后新研究需要探明的方向, 也是任何一个关于 IOR 的理论需要重点考虑的因素。一种可能是通过系统地变化这些研究间的不同参数, 找出这些参数发挥影响的边界条件来确定这些研究间差异出现的关键变量。

## 5 结论

(1) 同知觉加工有着密切关系的 N1 的线索化效应量表现出了随训练的增加(IOR 效应量降低)而显著的减小, 表明知觉辨别加工是长时训练对 IOR 发挥影响的重要阶段。

(2) N1 和 Nd250 表现出了随 IOR 量的变化而变化, 提示 N1 和 Nd250 (至少在当前任务所采用的范式中)可能是标识 IOR 的有效 ERPs 指标。

## 参 考 文 献

- Bacigalupo, F., & Luck, S. J. (2015). The allocation of attention and working memory in visual crowding. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 27(6), 1180–1193.
- Bao, Y., Sander, T., Trahms, L., Pöppel, E., Lei, Q., & Zhou, B. (2011). The eccentricity effect of inhibition of return is resistant to practice. *Neuroscience Letters*, 500(1), 47–51.
- Chica, A. B., & Lupiáñez, J. (2009). Effects of endogenous and exogenous attention on visual processing: An Inhibition of Return study. *Brain Research*, 1278, 75–85.
- Clark, K., Appelbaum, L. G., van den Berg, B., Mitroff, S. R., & Woldorff, M. G. (2015). Improvement in visual search with practice: Mapping learning-related changes in neurocognitive stages of processing. *The Journal of Neuroscience*, 35(13), 5351–5359.
- Delorme, A., Palmer, J., Onton, J., Oostenveld, R., & Makeig, S. (2012). Independent EEG sources are dipolar. *PLoS One*, 7(2), e30135.
- Dukewich, K. R., & Klein, R. M. (2015). Inhibition of return: A phenomenon in search of a definition and a theoretical framework. *Attention, Perception, & Psychophys*, 77(5), 1647–1658.
- Eimer, M. (1994). An ERP study on visual spatial priming with peripheral onsets. *Psychophysiology*, 31(2), 154–163.
- Gabay, S., Chica, A. B., Charras, P., Funes, M. J., & Henik, A. (2012). Cue and target processing modulate the onset of inhibition of return. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 38(1), 42–52.
- Gabay, S., Pertzov, Y., & Henik, A. (2011). Orienting of attention, pupil size, and the norepinephrine system. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 73(1), 123–129.
- Gilchrist, I., & Harvey, M. (2000). Refixation frequency and memory mechanisms in visual search. *Current Biology*, 10(19), 1209–1212.
- Gutiérrez-Domínguez, F. J., Pazo-Álvarez, P., Doallo, S., Fuentes, L. J., Lorenzo-López, L., & Amenedo, E. (2014). Vertical asymmetries and inhibition of return: Effects of spatial and non-spatial cueing on behavior and visual ERPs. *International Journal of Psychophysiology*, 91(2), 121–131.
- Hillyard, S. A., & Anllo-Vento, L. (1998). Event-related brain potentials in the study of visual selective attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95(3), 781–787.
- Hooge, I. T. C., Over, E. A. B., van Wezel, R. J. A., & Frens, M. A. (2005). Inhibition of return is not a foraging facilitator in saccadic search and free viewing. *Vision Research*, 45(14), 1901–1908.
- Hopfinger, J. B., & Mangun, G. R. (1998). Reflexive attention modulates processing of visual stimuli in human extrastriate cortex. *Psychological Science*, 9(6), 441–447.
- Hopfinger, J. B., & Mangun, G. R. (2001). Tracking the influence of reflexive attention on sensory and cognitive processing. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 1(1), 56–65.
- Klein, R. (2000). Inhibition of return. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(4), 138–147.
- Klein, R. (2009). On the control of attention. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 63(3), 240–252.
- Leutheuser, H., Gabsteiger, F., Hebenstreit, F., Reis, P., Lochmann, M., & Eskofier, B. (2013). Comparison of the AMICA and the InfoMax algorithm for the reduction of electromyogenic artifacts in EEG data. In *Proceeding of the 2013 35th Annual International Conference of the IEEE*

- Engineering in Medicine and Biology Society*. Osaka: IEEE, 6804–6807.
- Lins, O. G., Picton, T. W., Berg, P., & Scherg, M. (1993). Ocular artifacts in EEG and event-related potentials. I: Scalp topography. *Brain Topography*, 6(1), 51–63.
- Lopez-Calderon, J., & Luck, S. J. (2014). ERPLAB: An open-source toolbox for the analysis of event-related potentials. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 213.
- Luck, S. J. (2014). *An introduction to the event-related potential technique* (2nd ed.). Cambridge, MA: MIT Press.
- Luck, S. J., & Ford, M. A. (1998). On the role of selective attention in visual perception. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95(3), 825–830.
- Luck, S. J., & Kappenman, E. S. (2011). *The Oxford handbook of event-related potential components*. New York: Oxford University Press.
- Luck, S. J., Vogel, E. K., & Shapiro, K. L. (1996). Word meanings can be accessed but not reported during the attentional blink. *Nature*, 383(6601), 616–618.
- Luck, S. J., Woodman, G. F., & Vogel, E. K. (2000). Event-related potential studies of attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 432–440.
- Lupiáñez, J. (2010). Inhibition of return. In K. Nobre & J. Coull (Eds.), *Attention and time* (pp. 17–33). New York: Oxford University Press.
- Lupiáñez, J., Klein, R. M., & Bartolomeo, P. (2006). Inhibition of return: Twenty years after. *Cognitive Neuropsychology*, 23(7), 1003–1014.
- Lupiáñez, J., Milan, E. G., Tornay, F. J., Madrid, E., & Tudela, P. (1997). Does IOR occur in discrimination tasks? Yes, it does, but later. *Perception & Psychophysics*, 59(8), 1241–1254.
- Lupiáñez, J., Ruz, M., Funes, M. J., & Milliken, B. (2007). The manifestation of attentional capture: Facilitation or IOR depending on task demands. *Psychological Research*, 71(1), 77–91.
- Lupiáñez, J., Weaver, B., Tipper, S. P., & Madrid, E. (2001). The effects of practice on cueing in detection and discrimination tasks. *Psicológica*, 22(1), 1–23.
- MacInnes, W. J., & Klein, R. M. (2003). Inhibition of return biases orienting during the search of complex scenes. *The Scientific World Journal*, 3, 75–86.
- MacInnes, W. J., Hunt, A. R., Hilchey, M. D., & Klein, R. M. (2014). Driving forces in free visual search: An ethology. *Attention, Perception, & Psychophys*, 76(2), 280–295.
- Martín-Arévalo, E., Chica, A. B., & Lupiáñez, J. (2014). Electrophysiological modulations of exogenous attention by intervening events. *Brain and Cognition*, 85, 239–250.
- McDonald, J. J., Ward, L. M., & Kiehl, K. A. (1999). An event-related brain potential study of inhibition of return. *Perception & Psychophysics*, 61(7), 1411–1423.
- McDonald, J. J., Hickey, C., Green, J. J., & Whitman, J. C. (2009). Inhibition of return in the covert deployment of attention: Evidence from human electrophysiology. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21(4), 725–733.
- Posner, M., & Cohen, Y. (1984). Components of visual orienting. In H. Bouma & D. G. Bouwhuis (Eds.), *Attention and performance X: Control of language processes* (pp. 531–556). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Pratt, J., & McAuliffe, J. (1999). Examining the effect of practice on inhibition of return in static displays. *Perception & Psychophysics*, 61(4), 756–765.
- Prime, D. J., & Jolicoeur, P. (2009a). On the relationship between occipital cortex activity and inhibition of return. *Psychophysiology*, 46(6), 1278–1287.
- Prime, D. J., & Jolicoeur, P. (2009b). Response-selection conflict contributes to inhibition of return. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21(5), 991–999.
- Prime, D. J., & Ward, L. M. (2004). Inhibition of return from stimulus to response. *Psychological Science*, 15(4), 272–276.
- Prime, D. J., & Ward, L. M. (2006). Cortical expressions of inhibition of return. *Brain Research*, 1072(1), 161–174.
- Qu, Z., Wang, Y., Zhen, Y. F., Hu, L. P., Song, Y., & Ding, Y. L. (2014). Brain mechanisms underlying behavioral specificity and generalization of short-term texture discrimination learning. *Vision Research*, 105, 166–176.
- Satel, J., Hilchey, M. D., Wang, Z. G., Reiss, C. S., & Klein, R. M. (2014). In search of a reliable electrophysiological marker of oculomotor inhibition of return. *Psychophysiology*, 51(10), 1037–1045.
- Satel, J., Hilchey, M. D., Wang, Z. G., Story, R., & Klein, R. M. (2013). The effects of ignored versus foveated cues upon inhibition of return: An event-related potential study. *Attention, Perception, & Psychophys*, 75(1), 29–40.
- Satel, J., Wang, Z. G., Hilchey, M. D., & Klein, R. M. (2012). Examining the dissociation of retinotopic and spatiotopic inhibition of return with event-related potentials. *Neuroscience Letters*, 524(1), 40–44.
- Shariat T. S., Yazdi, D., Mirpour, K., & Bisley, J. W. (2012). Inhibition of return in a visual foraging task in non-human subjects. *Vision Research*, 74, 2–9.
- Smith, T. J., & Henderson, J. M. (2011a). Does oculomotor inhibition of return influence fixation probability during scene search? *Attention, Perception, & Psychophys*, 73(8), 2384–2398.
- Smith, T. J., & Henderson, J. M. (2011b). Looking back at Waldo: Oculomotor inhibition of return does not prevent return fixations. *Journal of Vision*, 11(1), 3.
- Sumner, P. (2006). Inhibition versus attentional momentum in cortical and collicular mechanisms of IOR. *Cognitive Neuroscience*, 23(7), 1035–1048.
- Talsma, D. (2008). Auto-adaptive averaging: Detecting artifacts in event-related potential data using a fully automated procedure. *Psychophysiology*, 45(2), 216–228.
- Taylor, T. L., & Klein, R. M. (2000). Visual and motor effects in inhibition of return. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26(5), 1639–1656.
- Tian, Y., Klein, R. M., Satel, J., Xu, P., & Yao, D. Z. (2011). Electrophysiological explorations of the cause and effect of inhibition of return in a cue-target paradigm. *Brain Topography*, 24(2), 164–182.
- Tian, Y., & Yao, D. Z. (2008). A study on the neural mechanism of inhibition of return by the event-related potential in the Go/Nogo task. *Biological Psychology*, 79(2), 171–178.
- van der Lubbe, R. H. J., Vogel, R. O., & Postma, A. (2005). Different effects of exogenous cues in a visual detection and discrimination task: Delayed attention withdrawal and/or speeded motor inhibition? *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(12), 1829–1840.
- van Selst, M., & Jolicoeur, P. (1994). A solution to the effect of sample size on outlier elimination. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 47(3), 631–650.
- Wang, Y., Song, Y., Qu, Z., & Ding, Y. L. (2010). Task difficulty modulates electrophysiological correlates of perceptual learning. *International Journal of Psychophysiology*, 75(3), 234–240.

- Wascher, E., Schneider, D., & Hoffmann, S. (2015). Does response selection contribute to inhibition of return? *Psychophysiology*, 52(7), 942–950.
- Wascher, E., & Tipper, S. P. (2004). Revealing effects of noninformative spatial cues: An EEG study of inhibition of return. *Psychophysiology*, 41(5), 716–728.
- Weaver, B., Lupiáñez, J., & Watson, F. L. (1998). The effects of practice on object-based, location-based, and static-display inhibition of return. *Perception & Psychophysics*, 60(6), 993–1003.
- Woldorff, M. G. (1993). Distortion of ERP averages due to overlap from temporally adjacent ERPs: Analysis and correction. *Psychophysiology*, 30(1), 98–119.
- Xu, J., Ma, F. Y., Zhang, M., & Zhang, Y. (2015). Dissociation of inhibitory tagging from inhibition of return by long-term training. *Acta Psychologica Sinica*, 47(8), 981–991.
- [徐菊, 马方圆, 张明, 张阳. (2015). 返回抑制和抑制标签在长时训练下的分离. *心理学报*, 47(8), 981–991.]
- Zhang, G. L., Cong, L. J., Song, Y., & Yu, C. (2013). ERP P1-N1 changes associated with Vernier perceptual learning and its location specificity and transfer. *Journal of Vision*, 13(4), 19.
- Zhang, M., & Zhang, Y. (2007). Semantic processing is affected in inhibition of return: Evidence from an event-related potentials study. *Neuroreport*, 18(3), 267–271.
- Zhang, M., Zhang, Y., & Fu, J. (2007). The influence of the working memory on object-based inhibition of return in dynamic displays. *Acta Psychologica Sinica*, 39(1), 35–42.
- [张明, 张阳, 付佳. (2007). 工作记忆对动态范式中基于客体的返回抑制的影响. *心理学报*, 39(1), 35–42.]
- Zhang, W. W., & Luck, S. J. (2009). Feature-based attention modulates feedforward visual processing. *Nature Neuroscience*, 12(1), 24–25.
- Zhang, Y., & Zhang, M. (2011). Spatial working memory load impairs manual but not saccadic inhibition of return. *Vision Research*, 51(1), 147–153.
- Zhang, Y., Peng, C. H., Sun, Y., & Zhang, M. (2013). Cognitive mechanism of visual inhibition of return. *Advances in Psychological Science*, 21(11), 1913–1926.
- [张阳, 彭春花, 孙洋, 张明. (2013). 视觉返回抑制的认知机制. *心理科学进展*, 21(11), 1913–1926.]
- Zhang, Y., Zhou, X. L., & Zhang, M. (2012). Temporary inhibitory tagging at previously attended locations: Evidence from event-related potentials. *Psychophysiology*, 49(9), 1191–1199.

## Cognitive neural mechanism of training effect on inhibition of return: Evidence from an ERP study

XU Ju<sup>1</sup>; HU Yuanan<sup>2</sup>; WANG Shuang<sup>1</sup>; LI Aisu<sup>1</sup>; ZHANG Ming<sup>1</sup>; ZHANG Yang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Department of Psychology, School of Education, Soochow University, Suzhou 215000, China)

(<sup>2</sup> Key Laboratory of Cognitive Neuroscience and Mental Health, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China)

### Abstract

Inhibition of return (IOR) refers to slower responses to targets presented at the previously cued location than to those at uncued locations when the cue-target onset asynchrony is more than about 250 ms. Although much has been debated about whether training could influence IOR, a recent behavioral study (Xu, Ma, Zhang, & Zhang, 2015) provided strong evidence for the existing of the IOR training effect. The study observed a reliable and significant decrease in IOR effect under a 8-day sustained training. However, as behavior reflects the combined influence of multiple processing stages, the behavioral measures are unable to determine definitely at which stage the IOR training effect takes place. Thereby, how the training shapes IOR is still an opening question. The current study is aimed to tackle this question by using the Event-Related Potentials that are superior in time-resolution and hence are sensitivity in tracking the distinct information processing stages.

24 paid participants recruited from the campus of Soochow University (6 males, 18 females, mean age of  $20.6 \pm 2.4$ , normal or corrected to normal vision) were asked to discriminate target stimuli (“@” or “&”) presented at either the previously cued (valid condition) or uncued locations (invalid condition) in 9 successive days. During the first and the last training day, the electroencephalogram (EEG) data were acquired while the participants performed the task.

The results showed that: 1) Behaviorally, consistent with the results of XU et al.(2015), the IOR effect ( $RT_{valid} - RT_{invalid}$ ) decreased steadily and significantly as the training days increased (19 and 6 ms for the first and last training day respectively); 2) Electro-physiologically, compatible with previous ERPs studies of IOR (e.g., Prime & Jolicoeur, 2009; Prime & Ward, 2006), the target stimuli occurred at valid locations elicited smaller N1 (170–200 ms) as well as the P2 than that at invalid locations; 3) And more interestingly, while N1 cueing effect (invalid - valid) and P2 cueing effect (the Nd250) decreased significantly from the first to the last training day, the P1 cueing effect kept constant across the training days.



Taken together, 1) as the visual N1 cueing effect has been well demonstrated to reflect the perceptual processing (e.g., discrimination process), the current results suggested that perceptual processing is a critical stage during which the training effect of IOR occurs, providing, as far as we known, the first electrophysiological evidence for the cognitive neural mechanism of the training effect of IOR. And 2) the significant regression of the behavioral IOR effect on the N1 and the P2 cueing effect (Nd250) instead of the P1 cueing effect suggested that the N1 and Nd250 may be the more robust and reliable electrophysiological indexes of IOR.

**Key words** inhibition of return; long-term training; ERPs; P1; N1; Nd250