

# The Electrophysiological Correlates of Forgetting

Mengying Wang, Xu Lei\*

School of Psychology, Southwest University, Chongqing  
Email: \*xlei@swu.edu.cn

Received: Mar. 4<sup>th</sup>, 2017; accepted: Mar. 19<sup>th</sup>, 2017; published: Mar. 23<sup>rd</sup>, 2017

---

## Abstract

Not all memories are equally welcome in awareness. It is inevitably that human memory would store some disgusting or unwanted information; the information may have negative effects on people's social adaptability and psychological states. People usually limit the time they spend on thinking about unwanted experiences, a process that begins during encoding, but continues when later reminded by some cues. This study summarizes the electrophysiological components and rhythmic characteristics during the process of motivated forgetting, aiming to reveal the specific electrophysiological indicators of forgetting. And we find that the process of forgetting mainly embodied some changes such as the increase of N2 amplitude, the enhanced power of alpha band, the reduction of theta power and its synchronicity, and the decline of synchronicity between alpha and beta band. While those changes can further successfully predict the occurrence of motivated forgetting. Therefore, the forgetting can be reflected by specific electrophysiological mechanism. And the following researchers may speculate the corresponding cognitive process through the electrophysiological phenomenon.

## Keywords

Memory, Forgetting, Electrophysiological Mechanism, EEG, ERP

---

# 记忆遗忘的电生理机制

王孟颖, 雷旭\*

西南大学心理学部, 重庆  
Email: \*xlei@swu.edu.cn

收稿日期: 2017年3月4日; 录用日期: 2017年3月19日; 发布日期: 2017年3月23日

---

\*通讯作者。

## 摘要

记忆中不可避免的会存储一些令人厌恶或不愉快的信息, 这些信息会对人们的社会适应和心理状态产生诸多消极影响。因此, 人们通常会被动或主动的对不想要的记忆进行限制, 这种限制可能体现在编码阶段, 也可能体现在线索诱发提取阶段。本研究对遗忘过程中的脑电成分和节律活动特征进行概括, 旨在找到遗忘的特异性电生理标志。我们发现, 遗忘过程主要体现在N2振幅的增加, alpha能量的增强, 晚正成分(LPC)减少, theta能量和同步性下降, 以及alpha/beta频带间同步性下降, 并且以上变化可以预测后续遗忘的成功发生。因此, 遗忘可以通过特定的电生理机制来反映, 进一步也可能从电生理现象反推遗忘对应的认知过程。

## 关键词

记忆, 遗忘, 电生理机制, EEG, ERP

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

### 1.1. 遗忘的定义和研究对象

#### 1.1.1. 遗忘的定义

在人类的记忆中, 并非所有内容都会受到意识的欢迎, 其中总会存储一些令人不愉快的信息, 因此遗忘成为人类记忆研究中不可或缺的一个重要课题。弗洛伊德最早对遗忘展开研究, 并提出了动机抑制理论, 他主张人们会通过将不愉快经历压抑到潜意识中的方式, 来避免负面记忆的干扰(Freyd, 1994)。其实, 遗忘的发生可能是有意的, 也可能在无意状态下发生。本文中的遗忘包含了这两种情况, 并结合各自适用的范式进行讨论。一方面, 对于线索相关的竞争性记忆的提取可以降低未提取记忆的回忆成绩, 对应提取遗忘范式(Retrieval-induced forgetting, RIF), 产生提取诱发遗忘效应。另一方面, 出于适应和进化的需求, 以及忘记不愉快经历的强烈动机, 人们通常会有一种受意识支配的记忆损伤, 又称主动遗忘(Anderson & Hanslmayr, 2014)。主动遗忘主要发生在记忆编码或记忆提取两个阶段, 分别对应定向遗忘范式(directed-forgetting, DF)和想/不想范式(Think/No-Think, TNT)。此外, 最近的研究还提出一种整合记忆材料、go/no-go 线索以及按键反应的抑制诱发遗忘范式(Inhibition-Induced forgetting, IIF), 为记忆的遗忘研究注入了新的活力, 丰富了研究的范式和体系。总之, 遗忘的主要目的是帮助个体维持情绪或认知状态的平衡(Anderson & Hanslmayr, 2014), 进而提高其生活质量。

#### 1.1.2. 遗忘的研究对象

遗忘研究的主要内容是陈述性记忆(declarative memory), 与程序性记忆相区别, 陈述性记忆不会通过练习达到自动化的、无意识的程度。因此, 陈述性记忆的一个首要分类特征就是有意识参与(Squire & Zola, 1996)。具体而言, 陈述性记忆是指, 对事件、事实、情景以及它们之间的相互联系用语言来描述的记忆, 与颞叶皮层的海马有关(Eichenbaum, 2001)。陈述性记忆又可被进一步细分为: 情境记忆和语义记忆。通常来讲, 语义记忆是指人们对一般知识和规律的记忆, 与特殊的地点、时间无关。而情景记忆, 强调刺

激发生的时空环境和刺激加工时个体的内部状态,它的基本特征有两点:(1)对上下文环境的表征;(2)对环境与刺激之间关系的表征(Anderson & Hanslmayr, 2014)。遗忘研究主要针对以上两种记忆类型展开,具体表现为在不同材料中均能发现遗忘效应。例如,RIF 范式多采用词语材料(e.g. Anderson, Bjork, & Bjork, 1994; Hanslmayr, Staudigl, Aslan, & Bäuml, 2010); DF 范式主要采用词语(e.g. Geiselman & Bagheri, 1985; Paz-Caballero & Menor, 1999; Fawcett & Taylor, 2008)或图片(e.g. Hauswald & Kissler, 2008; Yang et al., 2012)进行; TNT 范式下的主动遗忘可以发生在词语-词语(e.g. Anderson & Green, 2001; Anderson et al., 2004; Bergstrom, Velmans, de Fockert, & Richardson-Klavehn, 2007)、词语-面孔(e.g. Depue, Banich, & Curran, 2006; Hanslmayr et al., 2009; Hanslmayr, Leipold, & Bäuml, 2010)、面孔-场景(e.g. Chen et al., 2012)以及物体-场景(e.g. Kupper, Benoit, Dalgleish, & Anderson, 2014)配对材料中; IIF 范式目前主要采用不同性别的面孔材料(Chiu & Egner, 2015a; Chiu & Egner, 2015b),以上研究均发现遗忘效应的成功产生。

## 1.2. 遗忘的常用范式及其理论解释

如前所述,遗忘研究的常用范式包含以下四种:提取遗忘范式(RIF)、定向遗忘范式(DF)、想/不想范式(TNT)以及抑制诱发遗忘范式(IIF)。而从遗忘的理论角度来讲,普通心理学认为遗忘可以通过四种理论进行解释:衰退、干扰、压抑和提取失败。基于不同遗忘范式所产生的遗忘效应,可能对应了不同的解释理论。

首先,按照四种范式出现的时间顺序,RIF 范式最早提出并用于遗忘研究。RIF 是指重复提取练习与某个线索相联系的部分记忆内容,会使与该线索相联系的其他记忆内容发生遗忘的记忆现象(Anderson et al., 1994; 刘旭, 2013)。该范式中遗忘产生的关键在于记忆的选择性提取(Anderson et al., 1994; Norman, Newman, & Detre, 2007)。根据 RIF 范式的条件设置,RIF 的试次通常会被分为两类:一类要求进行提取练习(retrieval practice, RP),另一类则不进行提取练习(no retrieval practice, NRP)。目前提取诱发遗忘效应主要通过两种理论进行解释:抑制和联想干扰。其中抑制理论较为常见,认为选择性提取会导致未被提取项目受限,即记忆的减少来源于抑制。

其次,DF 是指人们有意的按照指令去忘记一些信息。在 DF 范式中,遗忘主要发生于记忆的编码阶段,是通过给予被试记住或遗忘的记忆线索来实现的。DF 范式又可以分为基于项目(item-based)或基于列表(list-based)两种形式,区别在于线索呈现的时间。基于项目的 DF,线索紧随每个项目之后出现;而基于列表的 DF,线索会在一个完整列表之后呈现。该范式常用的两种指令为“要求记住(to-be-remember, TBR)”和“要求遗忘(to-be-forget, TBF)”,在后续记忆测验中,通常 TBF 项目相比 TBR 项目会引发显著的记忆内容受损,即定向遗忘效应,体现了遗忘产生的有意性和指向性(杨文静, 杨金华, 肖宵, 张庆林, 2012)。此外,基于线索和行为结果,DF 范式中的项目可以分为四类:要求遗忘并成功遗忘(to-be-forgotten and forgotten, TBF\_F),要求遗忘但最终记住(to-be-forgotten but remembered, TBF\_R),要求记住并成功记住(to-be-remembered and remembered, TBR\_R)和正确拒斥(correct rejections, CR)。对于 DF 的解释可以根据遗忘发生的时间段进行划分:(1)编码阶段的定向遗忘;(2)提取阶段的定向遗忘。一方面,在编码阶段,人们通常用选择性复述(the selective rehearsal)对定向遗忘进行解释,认为被试会选择性地对 TBR 项目进行较大程度的复述,而中止对 TBF 项目的复述,从而导致 TBF 项目的记忆痕迹随时间推移发生衰退,与此同时,TBR 项目的记忆优势也就显现出来了。但选择性复述观点认为定向遗忘是被动发生的,近年来许多研究者倾向于将其视为一种主动的过程(Cheng, Liu, Lee, Hung, & Tzeng, 2012; Fawcett & Taylor, 2008),认为认知控制机制可以主动抑制 TBF 项目的记忆表征(Anderson & Hanslmayr, 2014)。另一方面,有研究认为定向遗忘不是发生在编码阶段,而是发生在记忆的提取阶段(Geiselman & Bagheri, 1985; 慕德芳, 宋耀武, 陈英和, 2009; 沈汪兵, 刘昌, 王永娟, 2009),即在线索未出现之前,

被试对所有项目都会进行完全的深加工, 只是提取阶段存在差异。目前的行为和认知神经研究证据支持针对 TBF 项目的抑制机制和针对 TBR 项目的选择性复述机制相结合, 共同作用于定向遗忘的产生(Gallant & Dyson, 2016)。

再次, Anderson 等人(2001)在运动抑制范式 go/no-go 的启发下, 创立了想/不想范式(TNT), 该范式一经提出引发了众多研究者的关注, 开创了遗忘研究的新纪元。经典 TNT 范式的流程为: 被试事先通过学习建立提示项-目标项之间的连接记忆, 然后仅呈现提示项, 要求被试口头报告目标项, 借以测试学习效果; 在 TNT 阶段, 提示项伴随不同的颜色框呈现, 要求被试对目标项进行相应的提取(绿色)或抑制(红色)操作; 后测则通过同等探测和独立探测对遗忘的效果进行测查(Anderson & Green, 2001)。TNT 范式的条件一般有三种, 即想(Think, T), 不想(No-Think, NT)和基线(Baseline, B)。目前该范式中的遗忘较为主流的解释是自上而下的抑制控制(Anderson et al., 2004), 涉及前额叶和海马等核心脑区。

最后, IIF 是近两年才出现的一种遗忘研究范式, 主要流程为, 在练习阶段, 要求被试在观看面孔图片之后判断性别并做出相应的按键反应, 其中一组被试仅要求对男性面孔反应(go trials), 而对女性面孔不反应(no-go trials), 另一组被试则相反, 只要求对女性面孔反应。在后续的记忆识别测验中, 通常发现 no-go 线索对应项目的记忆比 go 线索更加贫乏, 即出现了抑制诱发遗忘效应(Chiu & Egner, 2015a; Chiu & Egner, 2015b)。目前, 抑制诱发遗忘的解释通常以认知资源限制理论为基础, 认为认知资源总体有限, 假如反应抑制需要花费较多的资源, 那么对视觉刺激的编码就会相应地减少, 从而导致 no-go 项目记忆表征的相对贫乏, 最终产生遗忘(Chiu & Egner, 2015a)。

综上, 对于遗忘而言, 抑制是比较普遍适用的解释, 有助于我们更好的理解遗忘产生的认知机制。目前, EEG、ERP 与遗忘范式相结合的研究主要集中在 RIF、DF 和 TNT 范式, 因此接下来的综述也主要针对前三种进行。

### 1.3. EEG 和 ERP 方法

除了损伤研究, 认知神经科学领域采用的主要方法和工具是功能性神经成像。现存的几种方法各有优劣, 鉴于正电子发射断层扫描(positron-emission tomography, PET)和功能性磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)方法对脑血流变化的检测缓慢, 缺乏较高时间分辨率的特点, 脑电图(electroencephalography, EEG)和事件相关电位(event-related potential, ERP)与之形成了鲜明对比。虽然后两种方法的空间分辨率较差, 但在探测神经活动的时间波动方面性能优良, 可以为大脑提供时间进程和神经动力学上的深入洞察, 有助于建立遗忘相关的有效神经指标。

首先, ERP 是基于事件的电位活动测量, 可以反映刺激前、后神经活动的变化情况。基于 ERP 数据的时间连续性特征, ERP 成分合理的应该称之为一个“复合体”或者一个成分的“家族”, 尤其是在总结不同领域来源的研究结果时非常适用。其次, EEG 是对大脑神经活动产生的电压波动进行测量, 在人类研究中较常见的是记录皮层脑电(Buzsaki, 2006; Handy, 2005; Luck, McBurney, Shehory, & Willmott, 2005; Nunez & Srinivasan, 2006)。大多数研究选取 0.05 到 100Hz 的频谱进行分析, 其中常被提及的有 5 个频带: delta (0.05~5 Hz), theta (5~8 Hz), alpha (8~12 Hz), beta (12~30 Hz), 和 gamma (>30 Hz), 其中 alpha、beta 和 theta 频带均与抑制控制或遗忘过程存在重要关联。此外, 已有研究不仅关注单一振荡的功能特异性, 还关注频带间的耦合情况, 有助于我们对脑网络间相互配合形成比较完整的认识。

综上, 本文在搜集和回顾与遗忘相关的 ERP 和 EEG 研究范式及其发现的基础上, 试图从神经和生理学的角度厘清遗忘潜在的电生理机制, 对遗忘有一个更清晰的、系统化的认识。接下来, 我们将详细介绍遗忘相关的电生理表现。

## 2. 遗忘相关的 ERP 成分

### 2.1. N2

一类 ERP 成分已经频繁的在与执行控制机制相关的遗忘研究中被报告出来,即 N2 成分家族(Folstein & Van Petten, 2008)。这些成分通常在刺激呈现后的 250~450 ms 达到峰值。Folstein 和 Van Petten (2008) 的综述指出, N2 并非特指一个成分,而是存在几个不同类型的成分,表现在拓扑学分布的不同或能对任务/刺激的不同特征作出反应。接下来,我们将对 N2 家族子成分的功能性意义进行详细介绍。

首先, N2 成分可以反映出抑制的大小,与遗忘正相关。例如, Bergström, De Fockert 和 Richardson-Klavehn (2009)采用 TNT 范式进行研究,发现在刺激呈现后约 200ms, NT 项目中出现了一个早期 N2 成分,并且 NT 相比 T 条件的 N2 振幅更大,表现更负(Bergström, de Fockert, & Richardson-Klavehn, 2009; Mecklinger, Parra, & Waldhauser, 2009; Chen et al., 2012)。Bergström 等人(2009)也在 TNT 范式中发现了类似的早期负性成分,且与后续回忆成绩的衰减相关。来自 Hanslmayr 等人(2009)的研究也给出了 N2 在记忆抑制中起作用的证据:与 T 条件相比, NT 条件在 300ms 左右的时间窗表现出显著更大的负性 ERP 幅度,并且与随后记忆识别测验中的记忆损伤相关。Waldhauser, Lindgren 和 Johansson (2012)也发现这一效应出现在前额区域的 300ms 时间窗, NT 项目具有比 T 项目显著更大的 N2 波幅。

其次,从提取到遗忘,再到成功遗忘, N2 是依次增强的。前人研究发现,在成功抑制试次与不成功抑制试次相比较时, N2 表现为增强(Schmajuk, Liotti, Busse, & Woldorff, 2006)。Mecklinger 等人(2009)和 Waldhauser 等人(2012)的研究也表明, NT 条件相比 T 条件存在更大的 N2 波,并且研究者们注意到独立探测中被成功遗忘的 NT 项目对应的 N2 波幅更大。进一步地,在 DF 范式的研究中可以对这种 N2 的层级性变化进行更加细致的观察。研究表明,在线索呈现后的 200-300ms 时间窗, F 线索比 R 线索产生了一个更大的 N2 幅度,并且 TBF\_F 与 TBR\_F 项目在前额叶区域表现出更多的负性活动(Yang et al., 2012),表明成功的遗忘需要占用更强的抑制控制才能完成。

最后,有关情绪性材料的研究表明,相比中性图片,在负性图片之后出现的 F 线索在前额叶引发了更强的 N2 反应,表明负性图片的遗忘需要更强的抑制努力或更多的抑制机制占用,暗示负性刺激的遗忘更加艰难(Yang et al., 2012)。

源定位分析发现, N2 的产生源包括前扣带皮层和外侧前额叶皮层(Lavric, Pizzagalli, & Forstmeier, 2004),显然后者更加符合记忆提取抑制的脑成像研究发现(Anderson et al., 2004)。一方面,一些研究源定位的结果表明 N2 是由前扣带(anterior cingulate cortex, ACC)产生,认为该成分反映的是一种冲突监测而不是抑制控制本身(Nieuwenhuis, Yeung, Van Den Wildenberg, & Ridderinkhof, 2003)。另一方面,也有研究发现 N2 定位于右侧背外侧前额叶(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)和腹侧 PFC,并将其看作直接抑制的指标(Swainson et al., 2003)。Chen 等人(2012)的研究支持 N2 源位于前额叶皮层的观点,具体包括右侧额上回(superior frontal gyrus, SFG)、右内侧前额叶(medial prefrontal cortex, MFG)以及额下回皮层区域(inferior frontal gyrus, IFG)。

综上,目前 N2 的产生源还没有一致的定论,笔者认为,记忆的遗忘和抑制控制是一个系统的、连续的过程,而 N2 也可以细分为不同的子成分,因此,不同阶段的 N2 子成分可能对应着抑制的不同阶段。第一,发生在 150~300 ms 左右的 N2 成分研究结果较为一致,该早期成分可能定位于 ACC,承担抑制初期的冲突探测功能,并且相关于后续的遗忘效果。第二,发生于 300~500 ms 的 N2 晚期子成分,定位于额叶-中央皮层,是实际抑制的电生理指标,与后续的遗忘效果之间正相关。此外,在负性情绪材料的遗忘过程中, N2 还可能仅反映一种抑制努力,与后续遗忘是否成功无关。

## 2.2. 早期正成分 EPC

介绍与遗忘具有直接关系的 N2 成分, 接下来我们将对与遗忘间接相关的, 表现为活动下降的成分进行详细阐述。首先, 基于 DF 范式, Paz-Caballero 等人(1999)发现 TBF\_R 比 TBR\_R 项目诱发了更大、更早的前额正电位(200~300 ms, early positive component, EPC), 又称额叶新/旧效应。Ullsperger, Mecklinger, & Müller (2000)也发现在类似的时间窗, TBF 项目会诱发较早的前额叶新/旧效应, 而这种效应在 TBR 项目中不存在。类似的, 陈雨, 周曙(2011)发现 TBF 项目存在左额颞区(300~450 ms)新/旧效应。这种特异性出现于 TBF 项目中的前额 EPC, 表明对于要求遗忘的项目而言, 不仅存在早期的冲突监测, 更重要的是, 前额叶的控制作用已经启动, 可以为后续的成功抑制奠定良好的电生理基础。

## 2.3. 晚期正成分 LPC

其次, LPC (late positive component)是发生于晚期(500~750 ms)的一项记忆提取相关的正成分。最初, DF 研究认为较晚期的 LPC 主要反映了选择性复述机制, 表现为与 TBR 项目相比, TBF 项目的顶叶新/旧效应较小或者不存在(Paz-Caballero & Menor, 1999; Ullsperger, Mecklinger, & Müller, 2000)。陈雨, 周曙(2011)也发现 R 线索与 F 线索相比具有更大的 LPC。而后, Van Hooff, Whitaker 和 Ford (2009)也发现 TBF\_R 项目减弱的新/旧效应在 500~750ms 最明显。此外, 在 DF 范式进行四种条件划分的情况下, TBF\_F 与 CR 的新词相比, 引发了较少的顶叶活动, 即发生了顶叶新/旧效应的反转(the reversed old/new effect; Nowicka, Jednorog, Wypych, & Marchewka, 2009), 表明成功遗忘的项目具有更低的记忆提取水平。TNT 的研究也支持 DF 中的发现, 具体表现为 NT 项目与 T 项目相比, 在 500-800 ms 的顶叶效应减少(Depue et al., 2013)。TNT 范式下的前人研究已经证实左侧顶叶正活动是有意提取的指标(Bergstrom, Velmans, de Fockert, & Richardson-Klavehn, 2007; Bergstrom, de Fockert, & Richardson-Klavehn, 2009; Mecklinger et al., 2009), 因此该成分的活动在遗忘过程中必然会受到抑制。并且, 只有直接抑制策略可以降低项目呈现后 300~600ms 期间的、与回忆相关的中央 - 顶叶正活动(Mecklinger et al., 2009; Bergstrom et al., 2009)。其他测查 TNT 相关的 ERP 损伤研究也表明(Bergstrom et al., 2007; Mecklinger et al., 2009; Hanslmayr et al., 2009), NT 试次中的左侧顶叶正活动(LPC)减少, 反映了 NT 试次中被试对自动回忆进行的有意回避和阻止。Waldhauser 等人(2012)在顶叶区域观察到 NT 项目的正电位比 T 项目弱, 说明 NT 项目得到较少的回忆加工(Waldhauser, Lindgren, & Johansson, 2012)。

关注刺激情绪特征的研究表明, 负性与正性和中性相比具有显著更多的正性 LPC (Gallant & Dyson, 2016)。回顾前人文献可知, LPC 被认为反映了对情绪性信息的选择性注意朝向和加工(Brown et al., 2012)。因此, 负性材料会受到更多的注意和记忆加工, 这种更显著的 LPC 可以预测后续负性项目遗忘的减少。

综上, 新/旧效应可以存在于前额叶和顶叶两个区域, 并且早期前额叶的新/旧效应(代表成分 EPC)主要是基于熟悉性的加工, 能够再认的 TBF 项目主要是依赖熟悉性而不是回想(朱永泽, 毛伟宾, 赵浩远, 李玉婷, 2015), 该效应有助于 TBF 项目的抑制和成功遗忘。而晚期顶叶新/旧效应(LPC)主要是基于回想的加工(Hauswald & Kissler, 2008), 在 TBR 项目中增强, 而在 TBF 项目中减弱甚或消失。四种条件间的顶叶新/旧效应大小关系为 TBR\_R > TBR\_F > CR > TBF\_F, 表明 TBF\_F 项目受到主动抑制的调节作用, 记忆提取最少。源定位分析指出, LPC 的神经基质是由皮层脑网络和皮层子结构组成的, 例如视觉皮层、前额叶皮层、顶叶皮层和深部情绪加工结构(例如脑岛、杏仁核; Liu et al., 2012)。

## 3. 遗忘相关的 EEG 振荡

### 3.1. Theta

除了 ERP 成分, 遗忘相关的 EEG 振荡分析也逐渐受到重视。首先, RIF 范式下的遗忘研究表明, theta

能量的降低相关于记忆的减少。例如, Spitzer et al. (2009)采用 RIF 范式测量了后续记忆识别测验中的电生理相关机制,发现与控制材料相比,对未练习材料的识别可以在早期(200~400 ms)观察到 theta (4~7 Hz)能量的降低,表明未练习材料记忆信号的减少(Spitzer & Bäuml, 2009)。另一项研究发现,与无干扰的基线相比,theta 频带的活动增加反映了选择性记忆提取期间的干扰,并且 theta 振幅从提取的第一到第二阶段发生了下降,可以预测提取诱发遗忘的数量,这种在提取阶段之间 theta 振幅的下降源定位于前扣带皮层(Staudigl, Hanslmayr, & Bäuml, 2010)。因此,我们认为较多的 theta 频带活动可以标志着记忆经受较高水平的干扰,并且成功的冲突解决/干扰抑制可以通过 theta 振幅的下降来显示,theta 频带的活动可以为选择性提取中的干扰提供一个动力学的神经标志(Staudigl et al., 2010)。

其次,有研究者进一步对不同脑区的 theta 耦合进行测查,发现单一脑区的 theta 活动可能不足以预测遗忘,但区域间的耦合可以反映抑制和遗忘过程。Hanslmayr et al. (2010)研究发现 RIF 引发的 theta 效应主要分布于额中和顶叶拓扑结构,而且仅顶叶与额中位置的 theta 相位锁时能够预测后续的 RIF(Hanslmayr et al., 2010)。其次,前额-海马 theta 频带的相互作用可以反映编码和提取期间的控制过程(Hanslmayr et al., 2010; Klimesch, Freunberger, & Sauseng, 2010; Klimesch, Freunberger, Sauseng, & Gruber, 2008)。Khader 和 Rösler (2011)观察到更高的额叶 theta 活动与更多的刺激冲突相伴随。

最后, TNT 范式下的研究发现,NT 与 T 项目相比,在顶叶电极位置表现为 theta (3~8 Hz)振荡的增加,表明用于监控提取事件的认知控制有所增加或延长(Depue et al., 2013)。随后, Waldhauser 等人(2014)通过对实验设计的巧妙改编,将线索前置 1s 呈现,试图将初步控制与真实记忆抑制两种过程区分开来。研究发现,在仅呈现线索而提示项未呈现时,控制效应反映在内侧前额叶以及背外侧前额叶 theta (5~9 Hz)能量的增加(Waldhauser, Bäuml, & Hanslmayr, 2014),表明被试在仅接受前置线索情况下产生了初步控制。然而,在提示项呈现之后,对目标记忆的成功抑制反映在内侧额叶 theta 振荡能量以及长时程相位同步性的减少(Waldhauser et al., 2014)。然而,有研究主张 theta 能量更多的相关于对干扰的控制,而不是提取的抑制控制(Ketz, O'Reilly, & Curran, 2014)。

综上,theta 振荡与遗忘紧密相关,早期的额叶 theta 能量增加代表了初期冲突探测和抑制准备,而记忆提取相关脑区 theta 能量及其相位同步性的降低相关于成功的记忆抑制。

### 3.2. Alpha

记忆研究中,alpha 振荡(8~13 Hz)一般被认为与无关信息的过滤有关,反映的是皮层抑制能力(Klimesch, Sauseng, & Hanslmayr, 2007)。结合生理学的观点,alpha 振荡的抑制作用支持脉冲抑制(pulsed inhibition)观点,即 alpha 活动会产生一种每 100ms 重复一次的脉冲信号,对应产生抑制作用(Jensen & Mazaheri, 2010)。近年来,在遗忘的研究中,alpha 振荡已经被频繁的报告与自上而下的抑制控制机制相联系(Jensen & Mazaheri, 2010; Klimesch et al., 2007)。例如, Depue 等人(2013)在 TNT 范式中发现,相比 T 项目,NT 项目在顶叶电极的 alpha 振荡能量更强,表明 alpha 振荡的增强有助于降低提取尝试或者减少成功的提取(Depue et al., 2013)。Waldhauser 等人(2014)采用前置线索的 TNT 范式,发现控制效应可以通过内侧和背外侧前额叶更高的 alpha(10~14 Hz)长时程相位同步来反映。通常,更高的 alpha 能量被认为是由 GABA 中间神经元的活动造成的(Jensen & Mazaheri, 2010; Klimesch et al., 2007),可以使记忆绑定相关的 gamma 频带活动降低(Osipova, Hermes, & Jensen, 2008),并且负相关于 fMRI 方法中测得的血氧水平依赖响应(Scheeringa et al., 2011)。因此,头皮记录到的更高的 alpha 活动可以被视为是抑制增强的一种电生理标志,稳健相关于记忆的遗忘过程。

### 3.3. Beta

Ketz 等人(2014)采用修订的 TNT 范式对促进或抑制记忆提取相关的控制过程进行研究。该研究将“提

取控制”和“抑制控制”看作两类不同的加工过程,并且观察到了这种分类加工在时频信号上的差异,主要体现在抑制控制的时频信号更具选择性(Ketz et al., 2014)。该研究发现, Beta 振荡(12~30 Hz)可以同时包含于高水平的提取控制和高水平的抑制控制,表明 beta 可能具有一般化的控制相关作用。此外,他们还发现在高水平控制与低水平控制相比较时, beta 能量的去同步化水平减弱,且更广泛的相关于控制过程(Ketz et al., 2014)。有研究称, Beta 振荡(12~30 Hz)会参与高阶的抑制控制。Hanslmayr 等人(2011)的研究表明,记忆形成与 beta 频带活动的减少相关。

### 3.4. 频带间耦合关系

最后,除以上介绍的三种主要振荡成分的单独作用之外,频带间的耦合与遗忘之间也存在重要关联。DF 相关的 EEG 研究发现, F 线索与 alpha/beta 频带远程同步的减少相关(Anderson & Hanslmayr, 2014)。具体当提示人们忘记之前学会的项目或列表时,能够降低广泛皮层网络在 alpha/beta 频带范围的大规模同步化,这种同步化的降低可能导致对提高记忆的神经过程的损害(Hanslmayr et al., 2012)。Gamma 频带的作用主要集中在情景记忆提取(Düzel et al., 2003; Sederberg et al., 2007)、特征捆绑(Jensen, Kaiser, & Lachaux, 2007; Osipova et al., 2006)和记忆重激活(Nyhus & Curran, 2010)等方面,甚至后部电极位置的 gamma 活动还可以对后续回忆进行预测(Osipova et al., 2006; Sederberg, Kahana, Howard, Donner, & Madsen, 2003)。一些研究也报道了 gamma 振荡在早期时间窗口对基于熟悉度的识别的选择性作用。

综上, alpha、beta、theta 和 gamma 四种频带在记忆的遗忘过程中承担不同的作用。且遗忘在时程上可以分为三个阶段——“控制启动-控制发生-控制执行”。首先,额叶 theta 振荡能量的增加被认为反映了额叶控制皮层活动的启动,与 N2 的冲突监测作用相配合;其次,抑制过程持续发生,表现为广泛皮层网络 alpha/beta 同步性的降低;最后,海马等与记忆存储相关的脑区 theta 振荡能量和相位同步性降低,反映其活动受到抑制,标志着真正的抑制执行,与顶叶 LPC 活动的下降相对应。频带间的相关关系可以概括为: alpha 与 beta 正相关, theta 和 gamma 正相关, alpha、beta 和 N2 是遗忘的直接指标,而 theta、gamma 和 LPC 为遗忘的间接指标。

## 4. 总结与展望

### 4.1. 应开展同步 EEG-fMRI 研究

鉴于 PET 和 fMRI 方法高空间分辨率、低时间分辨率,以及 EEG 和 ERP 方法低空间分辨率、高时间分辨率的特点,技术的融合势在必行。以上提及的一些 ERP 成分,特别是 N2 成分,其功能性意义还有一些不清楚的地方。因此,融合脑电源定位和来自 fMRI 的证据,将为该成分究竟是相关于由 ACC 主导的冲突监测,还是相关于由外侧前额叶产生的自上而下的抑制控制提供关键信息(Nieuwenhuis et al., 2003; Swinson et al., 2003)。未来研究可以借助同步 EEG-fMRI 技术对遗忘的神经机制作进一步澄清(Lei et al., 2011)。目前,同步采集 EEG-fMRI 数据已经付诸实践,但后续的融合分析技术仍存在一定的难题,有待进一步创新和探索。

### 4.2. 应注重记忆抑制和其他领域抑制之间的差异研究

Mecklinger 等人(2009)的研究发现被试进行 stop-signal 任务所产生的 N2 幅度与被试在记忆抑制过程中产生的 N2 幅度显著正相关,这意味着运动和记忆的抑制过程可能有着同样的神经生理机制,这种抑制的共区域化还需要更全面和更深入地探讨。此外,遗忘中的记忆抑制与生活中常见的抑制控制,如反应抑制、注意抑制、情绪抑制等是否存在同样的神经机制还不得而知。假如存在一个普遍的抑制控制机制,那么该机制对应的产生源又会有哪些不同。



### 4.3. 应关注临床应用研究

前人研究发现, 有创伤经历的个体更容易忘记与创伤经历有关的情绪性记忆(Depue et al., 2006), 也有研究发现他们更难遗忘(Nørby, Lange, & Larsen, 2010)。现有的遗忘理论很难对该现象给出解释, 经历创伤究竟会给个体的遗忘带来怎样的影响, 是会发展出一种高效的遗忘机制, 还是在重大的精神压力下遗忘能力降低? 此外, 临床上抑郁症、强迫症和精神分裂症等, 都会严重影响个体的心理和精神状态, 那么他们在遗忘的内容和程度上与健康个体又存在哪些不同? 以上问题的解决与临床疾病的干预和治疗密切相关, 希望引起研究者们的关注和重视。

### 4.4. 总结

ERP 和 EEG 振荡为不同的认知加工过程提供了时间和动力学进程上的洞察。首先, 在 ERP 成分中, N2 是抑制的主要电生理指标, N2 幅度的增强一般对应了更大的抑制控制, 正相关于遗忘的量级。但在情绪相关的研究中, 更大的 N2 幅度可能仅对应了较强的冲突监测和抑制努力, 与后续遗忘不存在必然联系。其次, 更大的额叶新/旧效应对应更好的遗忘效果, 而顶叶新/旧效应相关于成功的记忆提取, 可以被策略性的上调或下调。最后, 在 EEG 振荡中, alpha、beta 和 theta 是与抑制相关的主要频带, 其中 alpha 更多表征的是一种抑制控制的强度, 与抑制的大小正相关。值得注意的是, theta 频带在抑制初期能量增加, 而后能量和同步性均下降, 后者代表了真正的抑制。

### 基金项目

本研究得到国家自然科学基金面上项目(NSFC31571111)和博士学科点专项科研基金项目(20120182120001)的资助。

### 参考文献 (References)

- 陈雨, 周曙. 硕士研究生定向遗忘的事件相关电位研究[J]. *中华行为医学与脑科学杂志*, 2011, 20(6), 528-530.
- 刘旭(2013). *提取诱发遗忘的发展及其机制研究*. 博士论文, 天津: 天津师范大学.
- 慕德芳, 宋耀武, 陈英和(2009). 定向遗忘中提取抑制的机制: 成功提取引起抑制. *心理学报*, 41(1), 26-34.
- 沈汪兵, 刘昌, 王永娟(2009). 提取抑制: 来自听觉定向遗忘的证据. *心理与行为研究*, 7(4), 269-273.
- 杨文静, 杨金华, 肖宵, 张庆林(2012). 负性情绪材料的定向遗忘及心理机制. *心理科学*, 35(1), 50-55.
- 朱永泽, 毛伟宾, 赵浩远, 李玉婷(2015). 有意遗忘的脑机制. *心理科学*, 38(3), 580-585.
- Anderson, M. C., & Green, C. (2001). Suppressing Unwanted Memories by Executive Control. *Nature*, 410, 366-369. <https://doi.org/10.1038/35066572>
- Anderson, M. C., & Hanslmayr, S. (2014). Neural Mechanisms of Motivated Forgetting. *Trends in Cognitive Sciences*, 18, 279-292. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.03.002>
- Anderson, M. C., Bjork, R. A., & Bjork, E. L. (1994). Remembering Can Cause Forgetting: Retrieval Dynamics in Long-Term Memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 20, 1063. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.20.5.1063>
- Anderson, M. C., Ochsner, K. N., Kuhl, B., Cooper, J., Robertson, E., Gabrieli, S. W., Gabrieli, J. D. et al. (2004). Neural Systems Underlying the Suppression of Unwanted Memories. *Science*, 303, 232-235. <https://doi.org/10.1126/science.1089504>
- Bergstrom, Z. M., de Fockert, J. W., & Richardson-Klavehn, A. (2009). ERP and Behavioural Evidence for Direct Suppression of Unwanted Memories. *Neuroimage*, 48, 726-737. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.06.051>
- Bergström, Z. M., de Fockert, J., & Richardson-Klavehn, A. (2009). Event-Related Potential Evidence That Automatic Recollection Can Be Voluntarily Avoided. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21, 1280-1301. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21075>
- Bergstrom, Z. M., Velmans, M., de Fockert, J., & Richardson-Klavehn, A. (2007). ERP Evidence for Successful Voluntary

- Avoidance of Conscious Recollection. *Brain Research*, 1151, 119-133. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2007.03.014>
- Brown, A. D., Kramer, M. E., Romano, T. A., & Hirst, W. (2012). Forgetting Trauma: Socially Shared Retrieval-Induced Forgetting and Post-Traumatic Stress Disorder. *Applied Cognitive Psychology*, 26, 24-34. <https://doi.org/10.1002/acp.1791>
- Buzsaki, G. (2006). *Rhythms of the Brain*. Oxford: Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195301069.001.0001>
- Chen, C., Liu, C., Huang, R., Cheng, D., Wu, H., Xu, P., Luo, Y.-J. et al. (2012). Suppression of Aversive Memories Associates with Changes in Early and Late Stages of Neurocognitive Processing. *Neuropsychologia*, 50, 2839-2848. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.08.004>
- Cheng, S.-K., Liu, I. C., Lee, J. R., Hung, D. L., & Tzeng, O. J. L. (2012). Intentional Forgetting Might Be More Effortful Than Remembering: An ERP Study of Item-Method Directed Forgetting. *Biological Psychology*, 89, 283-292. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2011.10.019>
- Chiu, Y. C., & Egner, T. (2015a). Inhibition-Induced Forgetting Results from Resource Competition between Response Inhibition and Memory Encoding Processes. *Journal of Neuroscience*, 35, 11936-11945. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0519-15.2015>
- Chiu, Y. C., & Egner, T. (2015b). Inhibition-Induced Forgetting: When More Control Leads to Less Memory. *Psychological Science*, 26, 27-38. <https://doi.org/10.1177/0956797614553945>
- Depue, B. E., Banich, M. T., & Curran, T. (2006). Suppression of Emotional and Nonemotional Content in Memory Effects of Repetition on Cognitive Control. *Psychological Science*, 17, 441-447. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01725.x>
- Depue, B. E., Ketz, N., Mollison, M. V., Nyhus, E., Banich, M. T., & Curran, T. (2013). ERPs and Neural Oscillations during Volitional Suppression of Memory Retrieval. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 25, 1624-1633. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_00418](https://doi.org/10.1162/jocn_a_00418)
- Düzel, E., Habib, R., Rotte, M., Guderian, S., Tulving, E., & Heinze, H.-J. (2003). Human Hippocampal and Parahippocampal Activity during Visual Associative Recognition Memory for Spatial and Nonspatial Stimulus Configurations. *The Journal of Neuroscience*, 23, 9439-9444.
- Eichenbaum, H. (2001). The Hippocampus and Declarative Memory: Cognitive Mechanisms and Neural Codes. *Behavioural Brain Research*, 127, 199-207. [https://doi.org/10.1016/S0166-4328\(01\)00365-5](https://doi.org/10.1016/S0166-4328(01)00365-5)
- Fawcett, J. M., & Taylor, T. L. (2008). Forgetting is Effortful: Evidence from Reaction Time Probes in an Item-Method Directed Forgetting Task. *Memory & Cognition*, 36, 1168-1181. <https://doi.org/10.3758/MC.36.6.1168>
- Folstein, J. R., & Van Petten, C. (2008). Influence of Cognitive Control and Mismatch on the N2 Component of the ERP: A Review. *Psychophysiology*, 45, 152-170.
- Freyd, J. J. (1994). Betrayal Trauma: Traumatic Amnesia as an Adaptive Response to Childhood Abuse. *Ethics & Behavior*, 4, 307-329. [https://doi.org/10.1207/s15327019eb0404\\_1](https://doi.org/10.1207/s15327019eb0404_1)
- Gallant, S. N., & Dyson, B. J. (2016). Neural Modulation of Directed Forgetting by Valence and Arousal: An Event-Related Potential Study. *Brain Research*, 1648, 306-316. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2016.08.009>
- Geiselman, R. E., & Bagheri, B. (1985). Repetition Effects in Directed Forgetting: Evidence for Retrieval Inhibition. *Memory & Cognition*, 13, 57-62. <https://doi.org/10.3758/BF03198444>
- Handy, T. C. (2005). *Event-Related Potentials: A Methods Handbook*. Cambridge: MIT Press.
- Hanslmayr, S., Leipold, P., & Bäuml, K.-H. (2010). Anticipation Boosts Forgetting of Voluntarily Suppressed Memories. *Memory*, 18, 252-257. <https://doi.org/10.1080/09658210903476548>
- Hanslmayr, S., Leipold, P., Pastötter, B., & Bäuml, K.-H. (2009). Anticipatory Signatures of Voluntary Memory Suppression. *The Journal of Neuroscience*, 29, 2742-2747. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4703-08.2009>
- Hanslmayr, S., Spitzer, B., & Bäuml, K.-H. (2009). Brain Oscillations Dissociate between Semantic and Nonsemantic Encoding of Episodic Memories. *Cerebral Cortex*, 19, 1631-1640. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhn197>
- Hanslmayr, S., Volberg, G., Wimber, M., Oehler, N., Staudigl, T., Hartmann, T., Bäuml, K. H. et al (2012). Prefrontally Driven Downregulation of Neural Synchrony Mediates Goal-Directed Forgetting. *Journal of Neuroscience*, 32, 14742-14751. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1777-12.2012>
- Hanslmayr, S., Volberg, G., Wimber, M., Raabe, M., Greenlee, M. W., & Bäuml, K. H. (2011). The Relationship between Brain Oscillations and BOLD Signal during Memory Formation: A Combined EEG-fMRI Study. *Journal of Neuroscience*, 31, 15674-15680. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3140-11.2011>
- Hauswald, A., & Kissler, J. (2008). Directed Forgetting of Complex Pictures in an Item Method Paradigm. *Memory*, 16,

- 797-809. <https://doi.org/10.1080/09658210802169087>
- Jensen, O., & Mazaheri, A. (2010). Shaping Functional Architecture by Oscillatory Alpha Activity: Gating by Inhibition. *Frontiers in Human Neuroscience*, 4, 186. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00186>
- Jensen, O., Kaiser, J., & Lachaux, J.-P. (2007). Human Gamma-Frequency Oscillations Associated with Attention and Memory. *Trends in neurosciences*, 30, 317-324. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2007.05.001>
- Ketz, N., O'Reilly, R. C., & Curran, T. (2014). Classification Aided Analysis of Oscillatory Signatures in Controlled Retrieval. *Neuroimage*, 85, 749-760. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.06.077>
- Khader, P. H., & Rösler, F. (2011). EEG Power Changes Reflect Distinct Mechanisms during Long-Term Memory Retrieval. *Psychophysiology*, 48, 362-369. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2010.01063.x>
- Klimesch, W., Freunberger, R., & Sauseng, P. (2010). Oscillatory Mechanisms of Process Binding in Memory. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 34, 1002-1014. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.10.004>
- Klimesch, W., Freunberger, R., Sauseng, P., & Gruber, W. (2008). A Short Review of Slow Phase Synchronization and Memory: Evidence for Control Processes in Different Memory Systems? *Brain Research*, 1235, 31-44. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.06.049>
- Klimesch, W., Sauseng, P., & Hanslmayr, S. (2007). EEG Alpha Oscillations: The Inhibition-Timing Hypothesis. *Brain Research Reviews*, 53, 63-88. <https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2006.06.003>
- Kupper, C. S., Benoit, R. G., Dalgleish, T., & Anderson, M. C. (2014). Direct Suppression as a Mechanism for Controlling Unpleasant Memories in Daily Life. *Journal of Experimental Psychology: General*, 143, 1443-1449. <https://doi.org/10.1037/a0036518>
- Lavric, A., Pizzagalli, D. A., & Forstmeier, S. (2004). When "Go" and "Nogo" Are Equally Frequent: ERP Components and Cortical Tomography. *European Journal of Neuroscience*, 20, 2483-2488. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2004.03683.x>
- Lei, X., Ostwald, D., Hu, J., Qiu, C., Porcaro, C., Bagshaw, A. P., & Yao, D. (2011). Multimodal Functional Network Connectivity: An EEG-fMRI Fusion in Network Space. *PLoS ONE*, 6, e24642. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0024642>
- Luck, M., McBurney, P., Shehory, O., & Willmott, S. (2005). *Agent Technology: Computing as Interaction (a Roadmap for Agent Based Computing)*.
- Mecklinger, A., Parra, M., & Waldhauser, G. T. (2009). ERP Correlates of Intentional Forgetting. *Brain Research*, 1255, 132-147. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.11.073>
- Nieuwenhuis, S., Yeung, N., Van Den Wildenberg, W., & Ridderinkhof, K. R. (2003). Electrophysiological Correlates of Anterior Cingulate Function in a Go/No-Go Task: Effects of Response Conflict and Trial Type Frequency. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 3, 17-26. <https://doi.org/10.3758/CABN.3.1.17>
- Nørby, S., Lange, M., & Larsen, A. (2010). Forgetting to Forget: On the Duration of Voluntary Suppression of Neutral and Emotional Memories. *Acta Psychologica*, 133, 73-80. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2009.10.002>
- Norman, K. A., Newman, E. L., & Detre, G. (2007). A Neural Network Model of Retrieval-Induced Forgetting. *Psychological Review*, 114, 887. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.114.4.887>
- Nowicka, A., Jednorog, K., Wypych, M., & Marchewka, A. (2009). Reversed Old/New Effect for Intentionally Forgotten Words: An ERP Study of Directed Forgetting. *International Journal of Psychophysiology*, 71, 97-102. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2008.06.009>
- Nunez, P. L., & Srinivasan, R. (2006). *Electric Fields of the Brain: The Neurophysics of EEG*. Oxford: Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195050387.001.0001>
- Nyhus, E., & Curran, T. (2010). Functional Role of Gamma and Theta Oscillations in Episodic Memory. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 34, 1023-1035. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.12.014>
- Osipova, D., Hermes, D., & Jensen, O. (2008). Gamma Power Is Phase-Locked to Posterior Alpha Activity. *PLoS ONE*, 3, e3990. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003990>
- Osipova, D., Takashima, A., Oostenveld, R., Fernández, G., Maris, E., & Jensen, O. (2006). Theta and Gamma Oscillations Predict Encoding and Retrieval of Declarative Memory. *The Journal of Neuroscience*, 26, 7523-7531. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1948-06.2006>
- Paz-Caballero, M. D., & Menor, J. (1999). ERP Correlates of Directed Forgetting Effects in Direct and Indirect Memory Tests. *European Journal of Cognitive Psychology*, 11, 239-260. <https://doi.org/10.1080/713752308>
- Scheeringa, R., Fries, P., Petersson, K.-M., Oostenveld, R., Grothe, I., Norris, D. G., Bastiaansen, M. C. et al. (2011). Neuronal Dynamics Underlying High- and Low-Frequency EEG Oscillations Contribute Independently to the Human BOLD Signal. *Neuron*, 69, 572-583. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.11.044>

- Schmajuk, M., Liotti, M., Busse, L., & Woldorff, M. G. (2006). Electrophysiological Activity Underlying Inhibitory Control Processes in Normal Adults. *Neuropsychologia*, *44*, 384-395.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.06.005>
- Sederberg, P. B., Kahana, M. J., Howard, M. W., Donner, E. J., & Madsen, J. R. (2003). Theta and Gamma Oscillations during Encoding Predict Subsequent Recall. *The Journal of Neuroscience*, *23*, 10809-10814.
- Sederberg, P. B., Schulze-Bonhage, A., Madsen, J. R., Bromfield, E. B., McCarthy, D. C., Brandt, A., Kahana, M. J. et al. (2007). Hippocampal and Neocortical Gamma Oscillations Predict Memory Formation in Humans. *Cerebral Cortex*, *17*, 1190-1196. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhl030>
- Spitzer, B., & Bäuml, K.-H. (2009). Retrieval-Induced Forgetting in a Category Recognition Task. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *35*, 286. <https://doi.org/10.1037/a0014363>
- Squire, L. R., & Zola, S. M. (1996). Structure and Function of Declarative and Nondeclarative Memory Systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *93*, 13515-13522. <https://doi.org/10.1073/pnas.93.24.13515>
- Staudigl, T., Hanslmayr, S., & Bäuml, K.-H. T. (2010). Theta Oscillations Reflect the Dynamics of Interference in Episodic Memory Retrieval. *The Journal of Neuroscience*, *30*, 11356-11362.  
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0637-10.2010>
- Swainson, R., Cunnington, R., Jackson, G. M., Rorden, C., Peters, A. M., Morris, P. G., & Jackson, S. R. (2003). Cognitive Control Mechanisms Revealed by ERP and fMRI: Evidence from Repeated Task-Switching. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *15*, 785-799. <https://doi.org/10.1162/089892903322370717>
- Ullsperger, M., Mecklinger, A., & Müller, U. (2000). An Electrophysiological Test of Directed Forgetting: The Role of Retrieval Inhibition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *12*, 924-940. <https://doi.org/10.1162/08989290051137477>
- Van Hooff, J. C., Whitaker, T. A., & Ford, R. M. (2009). Directed Forgetting in Direct and Indirect Tests of Memory: Seeking Evidence of Retrieval Inhibition Using Electrophysiological Measures. *Brain Cognition*, *71*, 153-164.  
<https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.05.001>
- Waldhauser, G. T., Bäuml, K.-H. T., & Hanslmayr, S. (2014). Brain Oscillations Mediate Successful Suppression of Unwanted Memories. *Cerebral Cortex*, *25*, 4180-4190.
- Waldhauser, G. T., Lindgren, M., & Johansson, M. (2012). Intentional Suppression Can Lead to a Reduction of Memory Strength: Behavioral and Electrophysiological Findings. *Frontiers in Psychology*, *3*, 401.  
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00401>
- Yang, W., Liu, P., Xiao, X., Li, X., Zeng, C., Qiu, J., & Zhang, Q. (2012). Different Neural Substrates Underlying Directed Forgetting for Negative and Neutral Images: An Event-Related Potential Study. *Brain Research*, *1441*, 53-63.  
<https://doi.org/10.1016/j.brainres.2011.10.042>

#### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ap@hanspub.org](mailto:ap@hanspub.org)