

人类工作记忆的事件相关电位研究*

李雪冰^{1,3} 罗跃嘉^{1,2}

(¹中国科学院心理健康重点实验室, 北京 100101) (²认知神经科学与学习国家重点实验室, 北京 100875)

(³中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 20世纪90年代以来, 采用ERP技术对人类工作记忆脑机制的研究已取得大量的成果。主要探讨了特定类型的工作记忆(词语、空间、客体工作记忆)是否存在与其贮存、复述以及中央执行功能相关的特异性ERP成分, 并从它们的时间进程及头皮分布来考察工作记忆的心理过程和神经机制。研究结果对于Baddeley的认知结构模型提供了有益的修正和补充。

关键词 工作记忆, 事件相关电位, 信息贮存, 信息复述, 执行功能。

分类号 B842

Baddeley 和 Hitch (1974) 在模拟短时记忆障碍的实验基础上提出了工作记忆的三系统概念, 用“工作记忆”(working memory, WM) 替代原来的“短时记忆”(short-term memory, STM) 概念。Baddeley 认为工作记忆是一种系统, 它为言语理解、学习和推理等复杂任务提供临时的储存空间和加工时所必需的信息, 工作记忆系统既能储存也能加工信息, 这区别于短时记忆概念仅强调储存功能。按照认知结构模型, 工作记忆分为: 语音环路(phonological loop)、视空间模板(visuospatial sketch pad) 和中央执行系统(the central executive) 3个子系统^[1]。根据信息加工的过程, 工作记忆分为: 信息贮存(storage) 过程, 信息被编码进入工作记忆; 信息保持或复述(retention/rehearsal) 过程, 通过不断复述来激活贮存

器中正在消退的信息; 执行加工(executive) 过程, 控制与协调系统的信息加工过程^[2]。根据所处理信息的类型, 工作记忆又被分成词语工作记忆(verbal WM)、空间工作记忆(spatial WM) 和客体工作记忆(object WM)。

Baddeley 的认知结构模型不但强调工作记忆的贮存与复述功能, 还指出工作记忆针对不同类型信息(词语、空间、客体) 分别进行加工的特性。研究者利用脑成像技术证明了不同类型信息的加工由不同的脑结构完成, 但由于其时间分辨率较低, 无法体现各类信息在不同加工阶段上的差异, 而事件相关电位(event-related potential, ERP) 技术恰好弥补了这一缺陷, 因此成为研究工作记忆各个加工过程的有效手段。它通过锁时性较高的实验范式, 分离工作记忆中的认知成分, 寻找特定类型工作记忆加工过程的ERP成分, 从而确定了各类工作记忆在各个加工阶段的“特征”, 为深入研究工作记忆的机制提供了更有力的实证支持。本文对近

收稿日期: 2005-03-09

* 国家杰出青年科学基金(30325026), 中科院重要方向项目(KSCX2-SW-221)。

通讯作者: 罗跃嘉, E-mail: luoyj@psych.ac.cn

年该领域所取得的重要成果进行归纳和评述, 尝试理清工作记忆 ERP 研究的发展方向。

1 工作记忆的贮存与复述

在工作记忆贮存与复述过程的ERP研究中, 研究者通常采用延迟样本匹配范式 (delayed matching-to-sample, DMS) 和 N-back 范式, 将刺激分别从视觉、听觉或视听觉双通道呈现, 发现不同感觉系统工作记忆在加工机制上的差异。DMS 是研究工作记忆中信息保持的经典实验范式, 由目标、延迟和探测3个阶段组成。在目标阶段, 给被试同时呈现一组刺激 (几个字母、物体或空间位置), 刺激消失后间隔数秒为延迟阶段, 最后出现一个探测刺激, 要求被试判断此刺激是否与目标阶段的某个刺激相匹配。此范式的特点在于3个阶段包含了不同的认知加工过程, 目标阶段信息被编码输入, 延迟阶段复述和保持信息, 探测阶段提取和选择反应。N-back 范式是让被试浏览一系列依次呈现的字母、数字或空间位置, 然后要求被试判断每一个出现的项目是否与前面刚呈现过的第n个项目相匹配。此模式的特点是可以控制n的大小来操纵工作记忆的负荷, 从而考察不同记忆负荷下工作记忆的加工机制。

1.1 视觉通道的研究

1.1.1 词语工作记忆

当前研究发现: 将词语、空间和客体信息分别从视觉通道呈现, 所诱发的 ERP 在时程、走向、以及头皮分布上都不相同。Ruchkin 等^[3]使用 DMS 范式, 对比研究词语和空间工作记忆。在词语任务的延迟阶段, 观察到左前额部的负向慢波, 波幅大小与工作记忆的负荷相关。但在空间任务的对应阶

段, 此慢波缺失。Gevins 等人的实验也得出相似的结果, 当被试对词和伪词 (真字母组成无意义的词) 进行匹配反应时左前颞叶的 N470 才被观察到; 非词语信息 (图形) 则未诱发 N470^[4]。最近, Salisbury 通过研究 N400 与语义记忆、词语工作记忆的关系, 证明了 N400 主要与词语工作记忆的保持容量有关, 而非一般意义上的语义理解加工。因此, 左前脑区的负波可以看作词语工作记忆特有的成分, 是对词语材料进行语音复述的反映^[5]。

在 ERP 的结果处理上, 除了对 ERP 的基本成分进行传统的分析, 还可以运用相减技术, 以提取更为纯粹的、只与工作记忆贮存或复述功能相关的 ERP 成分。王益文等^[6]使用词语 2-back、0-back 和复述任务, 在 ERP 结果处理时, 用 2-back 任务减复述任务在头皮后部得出差异波 N430; 2-back 任务减 0-back 任务在头皮前部得到持续负成分 (sustained negative component, SNC)。由于 2-back 任务 (被试判断每一个词语是否与它前面呈现过的第 2 个词语匹配) 体现的认知成分包括贮存、复述和中央执行功能; 0-back 任务 (判断当前词语是否与某个预先设定的词语相匹配) 体现的认知成分包括贮存与中央执行功能; 复述任务 (词语消失后立即进行无声复述直到下个词语出现) 主要体现复述功能。因此, N430 很可能反映了信息的贮存, SNC 可能是复述加工的动态指标, 两者持续时间的重叠提示大脑顶枕叶和额叶分别参与信息的短时存贮和复述, 两者的动态分离可能是工作记忆中暂时保持的神经基础。

1.1.2 空间工作记忆

在用 DMS 范式进行的研究中普遍发现,

顶枕部的负向慢波体现空间工作记忆贮存和复述功能,其波幅随空间工作记忆负荷的增加而增大,并贯穿整个延迟间期^[3,7-10]。例如, Martin-Loeches等^[7]将一个条形刺激随机出现在屏幕的上下左右4个方向,刺激间期为2秒,通过对被试提出不同要求,来考察知觉、注意和记忆条件下ERP成分的差异。结果只在记忆条件(要求对前后刺激出现的位置进行匹配)的刺激间期记录到了枕部的负向慢波。再如, Ruchkin的实验中也发现空间任务所特有的顶枕部负向慢波,说明此波可能与空间位置信息在工作记忆中的保持有关^[3]。但在N-back任务中记录到的顶枕部慢波虽与记忆负荷有关,却不能区分词语和空间任务。研究者认为^[11]这可能是由于N-back任务对注意的要求太高,不能很好的分离工作记忆的信息加工过程所造成的。

不过有人提出这种顶枕部负波不单纯地反映空间信息的保持,而是空间选择性注意加工的指标^[8]。为了阐明注意与空间工作记忆的关系, Jha在延迟阶段加入与任务无关的刺激,发现当无关刺激出现在需要记忆的位置时所诱发的注意相关的P1、N1波幅明显大于其他位置,并且无论这一刺激出现在延迟阶段的早期或晚期均可观察到此效应^[12]。可见选择性注意确实持续存在于保持空间信息的整个阶段,对空间信息在工作记忆中的保持起关键作用。Awh认为空间选择性注意与空间工作记忆是密不可分的,二者在神经机制上有着共同之处,因此晚期的负向慢波仍然可以在一定程度上反映空间工作记忆的贮存与复述功能^[13]。

1.1.3 客体工作记忆

研究发现,除了上述词语和空间两种工作记忆,还可能有一种:客体工作记忆。

所谓客体,指的是一些熟悉或不熟悉的客观物体,如几何图形、面孔等。其本质是一些不含词语信息和空间信息的视觉信息^[2]。

在空间和客体的DMS任务中皆可看到随记忆材料增加而波幅增大的负向慢波,但此种慢波的发生时程以及头皮分布在客体和空间任务中是不同的^[8,9]。如前所述,空间任务中负荷敏感的负向慢波主要发生在顶枕叶,而客体任务中,该慢波更多集中于前额中部及左前颞叶^[9],这类类似于在词语任务中发现的左前额叶负波,因此可以想像在客体任务中,被试可能使用语音复述策略,而非客体表征策略。再者,右侧颞叶对客体工作记忆的参与要大于空间工作记忆^[9,10,14]。当信息编码进入工作记忆时,形状特征编码会诱发右后颞叶的P250,位置特征编码则不会^[10]。当信息复述时,客体任务比空间任务在右前颞叶诱发了更大的负向慢波^[9]。此外,二者在时程上也存在差异:空间任务中负荷敏感的负波发生在刺激呈现后的800ms,而客体任务中发生在刺激后2300ms,这说明空间信息进入工作记忆的贮存系统比客体信息更快捷,空间记忆的复述功能也比客体记忆更早开始^[9,10]。以上这些实验结果表明:客体工作记忆与空间工作记忆虽然分享Baddeley模型中视空间模板,但他们在信息加工时程上却相互分离。

1.2 听觉通道的研究

视觉通道呈现的空间与非空间信息的加工是分离的,前面介绍的实验均支持此观点。那么,听觉通路呈现的这两类信息的加工是否也是分离的呢?

Anourova等^[15]在听觉延迟样本匹配任务中使用ERP和MEG同时(simultaneous)记录脑电位,来研究声音属性对听觉工作记

忆的影响。实验包括两种频率声音及两个空间位置,随机将一种频率的声音从一个位置发出,空间任务要求被试记忆声音出现的位置并匹配,频率任务则要求记忆声音频率并匹配。对比匹配时产生的电位,发现ERP的N1成分和MEG的N1m与任务类型相关,空间任务较频率任务诱发的N1潜伏期缩短,N1m波幅增大。Alain采用同样的范式进行研究发现:^[16]在目标刺激出现后300到500ms间的听觉诱发电位在不同类型任务间存在差异。

与视觉工作记忆相似,在听觉工作记忆中也有记忆负荷敏感的ERP成分,电流密度的源分析发现:这种与工作记忆复述相关的成分主要位于颞一顶叶^[17]。Anurova等^[18]在实验任务的延迟阶段发现,顶叶的晚期慢正波(从声音刺激出现后500ms持续到1500ms)随工作记忆负荷的增大而增大,这种晚期慢波与任务(位置和频率)无关,而在皮层分布上也无任务间差异^[19]。现有的听觉工作记忆研究成果虽然较少,但仍可初步判断:听觉信息在工作记忆的贮存阶段,空间和非空间信息是分开处理的,但在复述阶段则是由一个共同的颞一顶叶神经网络来完成^[18,19]。

1.3 跨通道的研究

跨通道工作记忆的ERP研究尚不多见。空间工作记忆的跨通道研究所得的ERP成分与单通道相似,反映空间信息贮存与复述功能的ERP成分仍以负向慢波为主。该慢波的头皮分布与感觉信息加工相一致,视觉任务中分布在右侧顶枕区,听觉任务中在前中央及左前颞区。就空间工作记忆而言,尽管不同通道刺激产生的ERP负波其头皮分布不同,但在时程上却保持一定的同步^[20]。非

空间信息(如词语)的工作记忆则不同,其在不同感觉通道的加工不同步。在视听通路的词语信息延迟样本匹配任务中,视觉和听觉诱发电位均体现出语音环路在延迟阶段的激活,不过听觉任务要比视觉任务更早启动语音环,表现为听觉工作记忆贮存与复述的自动加工^[21]。

2 工作记忆的执行功能

中央执行功能的研究要少于Baddeley模型中的其他成分,主要因为它很难与工作记忆的其他功能相分离。然而,Morris和Johns^[22]设计了一种需要工作记忆储备不断刷新的任务,在屏幕中央逐个呈现一系列字母,数字等,列的长度是从4到10随机的。每一列结束,被试要报告此列的最后4个项目。假定:在每一次列的长度超出4个项目时,被试就要更新一次他们的语音环路,那么,当列长为4时,就没有更新;当列长为10,就更新6次。实验中的一部分列被试只需认真进行记忆刷新,另一部分列被试在进行记忆刷新时还要完成无关材料的阅读以实现语音环路复述加工的干扰,结果发现列的长度和处理情况对回忆效果有明显的主效应,但两者之间没有交互作用。其结论是:由于对语音环路的干扰并没有影响到被试语音环路的更新,因此这种更新体现的是中央执行功能。这种实验范式被称作运转记忆任务(running memory task),已被普遍用来研究工作记忆的中央执行功能。

Kiss等^[23]采用此范式记录视觉ERP,试图找出与中央执行功能相关的特定成分。实验条件要求被试记住每一列的后3个数字(自动更新记忆储备),而在控制条件下被试只需记住当前的数字(为了利用统一的刺激序列和反应模式)。结果显示,在实验条

件下,广泛存在一个正走向的波(late positive component, LPC),其波幅随刷新次数的增加而增大。研究者考察在列中每个位置上,实验条件减控制条件的差异波发现:位置1和位置2差异波波幅最小,于基线上下,表明此波对序列的编码和贮存并不敏感。当位置超出3时,需要更新机制加入,差异波开始出现正向偏移(即差异正波),由此可见差异正波反映了工作记忆的更新功能而非贮存功能。然而差异正波(positive difference, Pd)的波幅随位置增长而增大则提示Pd不但与更新机制有关还与中央执行器的其他功能有关。研究者认为重复地更新不能带来Pd波幅的增大,因此Pd可能还反映了对前摄干扰的抑制,而且序列越长前摄干扰就越强,对其的抑制效应也就越强。也就是说这种实验范式反应了两种中央执行功能,分别是记忆的刷新以及对前摄干扰的抑制。之后, Kiss^[24]将数字刺激从听觉通道传入,采用运转记忆任务和经典Oddball任务对照研究,但只有前者得到了与刷新有关的差异正波,进一步证明Pd能够体现工作记忆的中央执行功能。

Kusak等^[25]认为Kiss用实验条件减控制条件得出的差异波不光包含中央执行功能,还包含对储备记忆的一些加工。因此,同样以运转记忆任务为基础, Kusak的实验与Kiss的实验最大差别在于,前者使用的是一种回忆任务(要求被试自述出最后3个项目),后者使用的是相对容易的再认任务(屏幕上给出最后3个项目被试判断正确与否);在结果处理上, Kusak用实验条件减控制条件得出差异波后,又将位置4到7的差异波做总平均,理由是它们都需要更新机制的参与,再将此总差异波与位置3的差异波相减,

因为位置3没有更新机制,最后得了特异的、与中央执行功能相关的波。此波在前额中央区最大,这一结果不但为Baddeley模型中贮存与中央执行功的分离提供了证据,还支持了以往神经影像学的研究,即大脑前额叶在工作记忆的执行功能中发挥着重要作用^[26]。

3 小结

ERP技术在人类工作记忆研究中的应用,一方面为空间、客体和词语工作记忆神经机制的区分提供了丰富的电生理指标;另一方面为工作记忆的内部过程提供了精确的时程信息,使研究者可以了解到工作记忆的贮存、复述和中央执行功能的起止时间以及在脑区的大致分布,同时,对Baddeley的认知结构模型既加以证实又促进其完善。

不过当前工作记忆的ERP研究中尚待解决的问题仍很多,这些问题大体可分为以下3类:

(1) 实验范式不够成熟,特别在提高工作记忆各认知成分的纯度方面,纯度不够意味着无法明确某些ERP成分在工作记忆中的“含义”。例如, DMS的延迟阶段虽然主要体现为信息复述过程,但也无法排除信息贮存时的编码过程,因此研究者在解释负向慢波时无法将贮存和复述功能彻底分开。甚至对此阶段所记录到的早期N1、P2成分很难给出合理的解释,初步将其看作工作记忆贮存和复述过程的起始指标^[27]。

(2) 不同研究结果之间还存在分歧。由于ERP的研究结果容易受到许多因素的影响,如刺激材料的物理因素、被试的生理因素等。研究者不但要注意研究结果的横向比较,还要对可能影响结果的各种因素采用相减技术或独立成分分析等方法加以消除与分离。

(3) 很多问题的研究还不够系统。比如, 执行功能是工作记忆的核心, 也是人类各种脑高级功能的枢纽, 但现有的研究工作与其重要性是不相匹配的。中央执行功能控制着工作记忆的整个加工过程, 也就是说今后可以从复述策略的选择和控制入手, 或者从短时向长时记忆转换的调控入手来研究执行功能。

此外, 随着高分辨率ERP记录及源定位分析技术的运用, ERP不但能敏感地反映皮层的功能活动, 还可以准确地对神经活动进行皮层定位, 如果此技术能广泛应用, 并和fMRI、PET等技术相结合, 那么相信此领域的研究将会取得突破性的进展。

参考文献

- [1] Baddeley A. Working memory. *Science*, 1992, 225: 556~592
- [2] 刘昌. 人类工作记忆的某些神经影像研究. *心理学报*, 2002, 34(6): 634~642
- [3] Ruchkin D S, Johnson R, Grafman J, Canoune H, Ritter W. Distinctions and similarities among working memory processes: an event-related potential study. *Cognitive Brain Research*, 1992, 1: 53~66
- [4] Gevins A, Cutillo B, Smith M E. Regional modulation of high resolution evoked potentials during verbal and non-verbal matching task. *Electroencephalograph and Clinical Neurophysiology*, 1995, 94: 129~147
- [5] Salisbury D F. Semantic memory and verbal working memory correlates of N400 to subordinate homographs. *Brain and Cognition*, 2004, 55: 396~399
- [6] 王益文, 林崇德, 魏景汉, 罗跃嘉. 短时存贮与复述动态分离的ERP证据. *心理学报*, 2004, 36(6): 697~703
- [7] Martin-Loeches M, Gomez-Jarabo G, Rubia F J. Human brain potentials of spatial location encoding into memory. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1994, 91(5): 363~373
- [8] Bosch V, Mecklinger A, Friederici A D. Slow cortical potentials during retention of object, spatial, and verbal information. *Cognitive Brain Research*, 2001, 10: 219~237
- [9] Mecklinger A, Pfeifer E. Event related potentials reveal topographical and temporal distinct neuronal activation patterns for spatial and object working memory. *Cognitive Brain Research*, 1996, 4: 211~224
- [10] Mecklinger A, Muller N. Dissociation in the processing of "what" and "where" information in working memory: an event-related potential analysis. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1996, 8: 453~457
- [11] McEvoy L K, Smith M E, Gevins A. Dynamic cortical networks of verbal and spatial working memory: effects of memory load and task practice. *Cerebral Cortex*, 1998, 8: 563~574
- [12] Jha A P. Tracking the time-course of attentional involvement in spatial working memory: an event-related potential investigation. *Cognitive Brain Research*, 2002, 15(1): 61~69
- [13] Awh E, Jonides J. Overlapping mechanisms of attention and spatial working memory. *TRENDS in Cognitive Sciences*, 2001, 5(3): 119~126
- [14] Mecklinger A, Meinshausen R M. Recognition memory for object form and object location: an event-related potential study. *Memory Cognition*, 1998, 26: 1068~1088
- [15] Anourova I, Nikouline V V, Ilmoniemi R J, Hotta J, Aronen H J, Carlson S. Evidence for dissociation of spatial and nonspatial auditory information processing. *NeuroImage*, 2001, 14: 1268~1277
- [16] Alain C, Arnott S R, Hevenor S, Graham S, Grady C L. "What" and "where" in the human auditory system. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2001, 98: 12301~12306
- [17] Kaiser J, Bertrand O. Dynamics of working memory for moving sounds: An event-related potential and scalp current density study. *Neuroimage*, 2003, 19(4): 1427~1438
- [18] Anourova I, Artchakov D, Korvenoja A, et al. Differences between auditory evoked responses recorded during spatial and nonspatial working memory tasks. *NeuroImage*, 2003, 20(2): 1181~1192
- [19] Rama P, Paavilainen L, Anourova I, et al. Modulation of slow brain potentials by working memory load in spatial

- and nonspatial auditory tasks. *Neuropsychologia*, 2000, 38: 913~922
- [20] Barceló F, Martín-Loeches M, Rubia F J. Event-related potentials during memorization of spatial locations in the auditory and visual modalities. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1997, 103(2): 257~167
- [21] Ruchkin D S, Berndt R S, Johnson J R, et al. Modality-specific processing streams in verbal working memory: evidence from spatio-temporal patterns of brain activity. *Cognitive Brain Research*, 1997, 6: 95~113
- [22] Mirris N, Jones D M. Memory updating in working memory: the role of the central executive. *British Journal of Psychology*, 1990, 81: 111~121
- [23] Kiss I, Pizio C, Francois A, Schopflocher D. Central executive function in working memory: event-related brain potential studies. *Cognitive Brain Research*, 1998, 6: 235~247
- [24] Kiss I, Pazderka-Robinson H, Floden D. Event-Related Brain Potentials and Central Executive Function: Further Evidence for Baddeley's Model. *Journal of Psychophysiology*, 2001, 15(1): 1~13
- [25] Kusak G, Grune K, Hagendorf H, et al. Updating of working memory in a running memory task : an event-related potential study. *International Journal of Psychophysiology*, 2000, 39: 51~65
- [26] Smith E E, Jonides J. Storage and executive processes in the frontal lobes. *Science*, 1999, 283: 1657~1661
- [27] 王益文, 林崇德, 魏景汉, 罗跃嘉, 卫星. 工作记忆中汉字与空间的分离及动态优势半球的ERP效应. *心理学报*, 2004, 36(3): 253~259

Studies of Event-related Potentials on Human Working Memory

Li Xuebing^{1,3} Luo Yuejia^{1,2}

¹ Key laboratory of Mental Health, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

² State Key Laboratory of Cognitive Neuroscience and Learning, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

³ Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Working memory as one of the most important cognition processes has been always attracting a nice bit of interest in cognitive neuroscience field. Researchers used ERP technique to examine the temporal course and scalp activity area of storage, rehearsal and central executive processing in working memory. A number of ERP studies indicated that the slow cortical potentials are specific to the kind and amount of information retained in the working memory, and the positive difference wave (Pd) is related to the updating function of the central executive. Overall these results validate and reinforce Baddeley's working memory model.

Key words: working memory, event-related potentials, storage, rehearsal, central executive.