



对侧延迟活动: 视觉工作记忆信息存储的 ERP 指标

高在峰, 郁雯璐, 徐晓甜, 尹军, 水仁德, 沈模卫*

浙江大学心理与行为科学系, 杭州 310028

* 联系人, E-mail: mwshen@zju.edu.cn

2012-05-03 收稿, 2012-08-06 接受

国家基础科学人才培养基金(J0730753)、国家自然科学基金(31170974, 31170975)、浙江省教育厅科研项目基金(Y201224811)和中央高校基本科研业务费专项资助

摘要 视觉工作记忆与人的众多基本认知能力有密切关系, 是当前认知心理学、认知神经科学等多个领域的研究焦点之一. 运用事件相关电位技术获得的对侧延迟活动(contralateral delay activity, CDA), 是目前已知唯一可实时追踪视觉工作记忆中存储的客体信息的神经指标, 能有效反映视觉工作记忆存储的客体数目. 近 10 年来, 众多研究者运用 CDA 在揭示视觉工作记忆的机制与作用的研究中取得了丰硕成果. 本文就 CDA 的来源、基本特性(幅值、时间进程、神经基础、产生机制)进行系统总结阐述, 然后就 CDA 在研究、临床中的应用予以简要总结, 最后对 CDA 研究中需进一步探明的一些关键问题进行了展望.

关键词

对侧延迟活动
视觉工作记忆
认知
应用

视觉工作记忆(visual working memory, VWM), 又称为视觉空间记事本(visual-spatial sketch pad), 是工作记忆的子系统, 用于实时存储和操纵视觉信息^[1]. 虽然 VWM 的容量有限, 一般仅能保持 3~4 个视觉客体^[2~4], 但却是人类信息加工的核心模块之一, 在个体的诸多认知过程(如推理、视觉搜索、注意控制等)中起着重要作用^[5,6]. 因此, VWM 成为近 10 年来认知心理学、认知神经科学等领域的研究焦点之一.

目前, 研究者采用行为实验、脑电图(EEG)或事件相关电位(ERP)、功能磁共振成像(fMRI)、正离子电脑断层摄影(PET)、脑磁(MEG)等多种手段^[3,7~11]对 VWM 进行了多角度、多层次的研究. 其中, ERP 由于具有高时间精度、可指示追踪 VWM 中特定的加工阶段尤为受研究者欢迎. 更重要的是, 在 VWM 的 ERP 研究中, 研究者发现了一个里程碑式的指标——对侧延迟活动(contralateral delay activity, CDA)或后部对侧持续负波(sustained posterior contralateral negativity). 当前研究者主要采用 CDA 这一名称. CDA 与 VWM 的信息编码与保持相关, 在揭示 VWM 的机制与作用中已发挥了重要作用^[12]. 本文结合以往的各项

研究成果及本实验室进行的 CDA 研究, 就该脑电成分的由来、基本特性及应用等进行详细介绍及相应的展望.

1 CDA 来源

以往的 ERP 研究发现, 当视觉信息在 VWM 中处于保持、存储状态时, 大脑头皮的后部电极会记录到一个稳定的负波 NSW (negative slow wave), 其绝对幅值(以下简称“幅值”)的高低受 VWM 负荷调节. 如记忆两张人脸时的 NSW 幅值要显著高于记忆一张人脸时的幅值, 且幅值的高低可预测个体的记忆绩效^[13], 提示 NSW 可能反映 VWM 的信息保持. 然而, NSW 幅值受任务难度、个体唤醒水平、持续注意等与记忆负荷无关的因素的影响^[12], 因此, NSW 是否的确与记忆负荷相关目前尚难以定论.

为提取完全与记忆负荷相关的脑电活动, 研究者巧妙地运用了对侧控制法. 该方法最初由 Gratton^[14]提出, Klaver 等人^[15]将之应用到 VWM 的研究中, 最终由 Vogel 实验室^[4,6,10]发扬光大. 对侧控制法利用视觉组织的对侧编码特性, 将实验刺激分左右 2 个视野

呈现,使得在一侧视野呈现的视觉刺激经视交叉而引发对侧大脑半球的强激活。该方法本质上采用构造差异波的方式将所关注的神经活动提取出来:与任务普遍相关的任务难度、唤醒水平等其他因素会同程度地激活大脑左、右2个半球,而目标刺激仅能在对侧大脑半球得到加工和存储,因此用记忆刺激所在视野的对侧脑区激活减去同侧脑区的激活,即可将与记忆负荷无关因素的影响剔除。另外,言语加工等存在半球优势加工的无关神经活动,总是发生在大脑半球一侧,通过将刺激出现在右侧时左侧加工半球减去右侧半球的差异波,和刺激出现在左侧时右侧加工半球减去左侧半球的差异波合并、平均,即可把上述神经活动的影响抵消掉。基于上述2个特点,我们可获得与VWM信息保持阶段相关的直接神经活动CDA。需指出的是,由于CDA的获得是基于视觉信息的对侧编码特性,因此CDA实验中对水平眼动的控制尤为重要。实验时被试需将眼睛盯在屏幕中央,避免在记忆项呈现后水平移动眼睛至目标侧。否则,会使记忆项信息不能被有效地编码至对侧脑区,导致无法记录或记录到幅值显著降低的CDA^[16]。因此在CDA实验的数据处理中,研究者一般会将存在明显水平眼动的实验试次剔除,而非进行传统的回归方法或者独立成分分析方法校正。

CDA实验一般采用变化觉察任务,典型的实验

流程见图1(a)。首先在屏幕中央呈现一个200 ms的注视点,其上有指示方向(一般为左、右)的箭头,要求被试眼睛盯在屏幕中央,仅记忆箭头指示一侧的刺激;300~400 ms空屏后在注视点两侧同时呈现相同数目的客体作为记忆项,呈现时间为100 ms;空屏900 ms后呈现检测项,要求被试判断箭头指向一侧的记忆项与检测项相比,记忆客体是否有变化。研究者发现,在记忆项呈现200~300 ms后,刺激呈现的对侧枕叶、颞叶、顶叶脑区会诱发比同侧脑区更负向的ERP(图1(b))。将对侧ERP从对侧ERP中减去,即可获得CDA(图1(c))^[10,17]。

2 CDA基本特性

当前,研究者通过多种实验操作已成功揭示出CDA的诸多重要基本特性。以下从CDA幅值、时间进程、神经基础、产生机制等方面进行介绍。

2.1 CDA幅值

研究者采用简单特征(如颜色)为实验材料,通过系统操纵记忆客体的数目,揭示了CDA幅值的几个重要性质:(1)CDA幅值可敏感反映VWM中可存储的视觉客体数目。行为研究与fMRI研究均发现,VWM最多可存储3~4个简单视觉客体,而来自CDA的发现与该发现完全一致:CDA幅值随着记忆客体

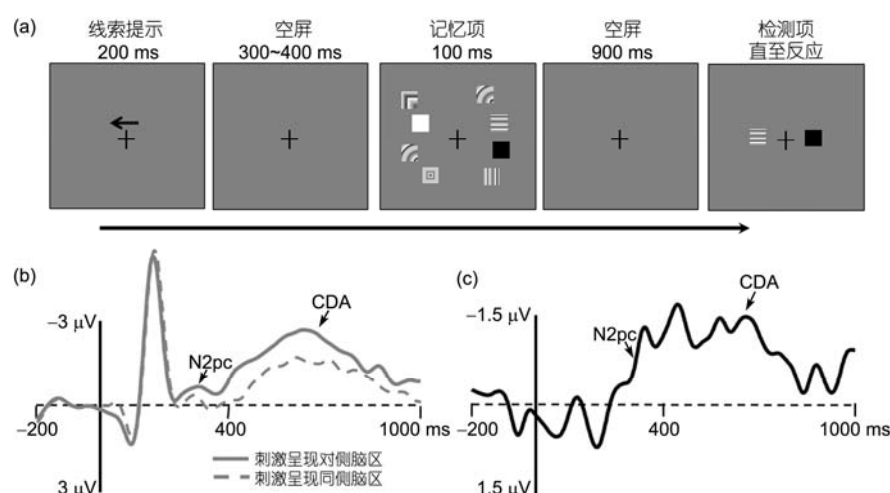


图1 实验流程与ERP波形

(a) 典型的CDA实验流程。图中方块的不同纹理表示不同的简单颜色。(b) 记忆保持阶段,枕、顶、颞叶电极上出现的典型ERP(此处为P1/2电极对)。灰色虚线表示在刺激呈现同侧脑区上相关电极的ERP波形,灰色实线表示对侧脑区相关电极上的ERP波形。N2pc首先出现(对侧与同侧脑区间波幅差异统计显著, $P<0.05$),表明被试的注意发生转移;随后CDA出现,并一直持续至检测项呈现。(c) 记忆4个不同客体条件下,对侧脑区ERP减去同侧脑区ERP所获得的差异波CDA(来自文献[19])

数目的增多而单调上升(即幅值更加负向),在记忆 3~4 个客体时达到峰值,当超过 4 个客体时 CDA 幅值不会继续提高. 4 个与 2 个客体间的个体 CDA 幅值差异与由行为结果计算所获得的 VWM 存储容量间存在显著正相关^[10,17]. (2) CDA 幅值受反应正确与否影响. 反应正确实验试次的 CDA 幅值显著高于反应错误实验试次的 CDA 幅值^[10]. (3) CDA 幅值不受注意窗口大小的影响. 随着记忆项数目的增多,在一般情况下刺激所占用的视觉空间面积会随之增大,从而导致注意的窗口尺寸增大. Vogel 等人^[17]通过呈现相同数目的视觉客体而变化注意窗口的尺寸发现, CDA 幅值在 2 种不同窗口尺寸条件下无差别. (4) 在加工颜色等简单特征情况下, CDA 幅值不受记忆刺激的知觉加工负荷影响. 随着记忆客体数目的增多,对于刺激的知觉加工负荷也随之增加,因此 CDA 幅值可能受任务本身的知觉加工负荷调节而非记忆负荷. 为此, Vogel 等人^[17]通过变化记忆材料颜色的清晰程度(清晰 vs 模糊)来调节刺激的知觉加工负荷(模糊下的知觉加工负荷高),发现 CDA 幅值不受颜色清晰程度的影响,而仅受记忆客体数目的影响^[18]. (5) 本实验室最近的一项研究表明, CDA 幅值反映了存储在 VWM 中不同身份(identity)的客体数目,而非呈现记忆客体所占的空间位置数目^[19]. 在以往的 CDA 研究中,记忆客体均被呈现在不同的空间位置处,因此 CDA 幅值可能反映了对空间位置数目的加工,而与记忆的客体本身无关. 为检验该种可能,我们在实验中要求被试记忆 1 个颜色、4 个不同颜色与 4 个相同颜色色块. 结果发现,与空间位置假设的预测相反,4 个相同颜色色块的 CDA 幅值($-0.25 \mu\text{V}$)显著低于 4 个不同颜色色块的 CDA 幅值($-0.89 \mu\text{V}$, $P < 0.004$),而与记忆 1 个色块无差别($-0.23 \mu\text{V}$, $P > 0.05$). Xu^[20]采用类似实验设计的 fMRI 研究揭示,4 个相同客体条件下的所有位置信息均会得到加工,但仅有一个身份信息可得到加工. 上述两项研究共同表明, CDA 反映存储在 VWM 中不同身份的客体数目,并得到最近一项 CDA 研究的进一步支持^[18]. (6) CDA 幅值受记忆信息性质的影响. Carlisle 等人^[21]最近发现,在一个视觉搜索任务中,若搜索的目标固定不变,在最开始的 1~2 个实验试次中,由于搜索目标还在 VWM 中,其可诱发明显的 CDA 成分,但随着时间的推移搜索目标逐渐进入长时记忆, CDA 幅值开始变小,当进行至第 6~7 个实验试次时 CDA 几乎消失. 该结果表明,

当记忆信息保持在 VWM 中时可诱发 CDA,而当信息进入长时记忆后不会再诱发 CDA.

此外,尽管 CDA 为差异波,反映了 VWM 中存储的视觉信息负荷,但包括笔者实验室在内的多个实验室最近均发现, CDA 幅值还受到记忆材料的影响^[22-24]. 如 Woodman 与 Vogel^[24]采用带颜色和朝向的矩形条为实验刺激,发现尽管记忆相同数目的 4 个客体,朝向的 CDA 幅值显著高于颜色的幅值; Luria 等人^[25]采用有颜色的复杂多边形为材料也发现,记忆 2 个复杂多边形的 CDA 幅值会显著高于记忆 2 个颜色的幅值.

采用包含细节信息的复杂客体为实验材料, Gao 等人^[23]与 Luria 等人^[25]均发现,在记忆该类客体时,2 个与 4 个客体在 CDA 幅值上无差异,为 VWM 可存储的客体数目受客体所含信息量影响的观点提供了重要实验证据. 更重要的是,该发现对 CDA 反映 VWM 中存储客体数目的观点提出了质疑,即 CDA 可能反映了存储在 VWM 中的客体信息量而非客体数目. 该观点不仅可解释几乎所有的已有 CDA 研究结果,也可为 VWM 以信息量为单位进行存储的观点提供证据. 因此,澄清 CDA 的实质对推动 VWM 的研究具有重要意义. 为此,笔者最近对该问题进行了探讨. 实验中要求被试记忆相同的刺激材料(有朝向的箭头)以控制材料物理特征对 CDA 幅值的影响. 通过操纵记忆的客体数目(2 vs 4)与客体所含的信息量(低 vs 高)发现,记忆低信息量客体时,4 个客体的 CDA 幅值显著高于 2 个客体的幅值;而在记忆高信息量客体时,2 个与 4 个客体间 CDA 幅值无差异,这些结果与以往的发现一致. 更为重要的是,2 个低信息量客体、2 个高信息量客体以及 4 个高信息量客体在 CDA 幅值上无差异,同时均显著低于 4 个低信息量客体的 CDA 幅值^[26](图 2). 该结果一方面为 CDA 幅值反映 VWM 中存储客体数目的观点提供了有力证据,另一方面也提示,研究者在比较不同记忆材料间的 CDA 幅值时需谨慎.

此外,最近有研究者对 CDA 原始波形(图 1(b))的含义进行了探索^[27]. 通过分别调节记忆客体与无关客体的数目(1, 2 或 3 个颜色色块)发现,反映目标加工的对侧脑区 NSW 仅受记忆客体数目调节;记忆目标同侧脑区的 NSW 仅在记忆 1 个客体的低记忆负荷条件下会受无关客体数目的调节,即个体无法将无关信息有效地过滤掉;而当记忆客体为 2 个或以上

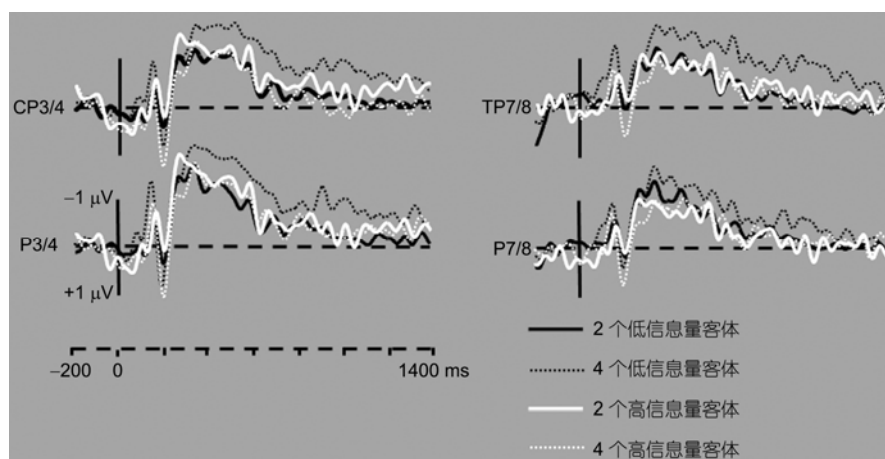


图2 客体数目与信息量对CDA幅值的调节作用(来自文献[26])

时,同侧脑区NSW不再受无关客体数目调节,提示此时个体可将无关信息有效过滤掉。因此,在记忆1个客体时,CDA幅值反映的可能不仅是对记忆客体的加工;而在记忆超过1个客体的情况下,CDA幅值才会主要反映对记忆客体的加工。

2.2 CDA的时间进程

记忆项呈现后,被试会首先根据线索(如有朝向的箭头)的指示将注意转移到相应的一侧视野,在刺激呈现后200~300 ms的后部对侧脑区可观察到反映注意焦点转移的N2pc(N2-posterior-contralateral)差异波;信息随后开始被编码存储至VWM,因此CDA从300 ms左右开始出现,并一直持续至检测项呈现前(图1(b)和(c))。在刺激呈现100 ms的情况下,CDA幅值一般在刺激呈现后约450 ms达到峰值(图1(c)),且达到峰值的潜伏期受记忆客体数目的正向调节,即在VWM容量范围之内,峰值潜伏期随着记忆数目的提高而延迟^[10]。CDA达到峰值后,其幅值开始衰减。相关研究表明,这种衰减并非源于对客体的记忆衰退,而是由记忆项所对应的同侧脑区ERP波幅随时间推移而逐步上升所致^[17,28]。

2.3 CDA的神经基础

CDA主要分布在大脑后部颞叶、顶叶与枕叶区域。对于CDA产生的神经基础,研究者采用图1(a)中的类似任务,采用fMRI^[11,29]、MEG^[7,8]和EEG^[19]3种不同的脑成像方法,对CDA的神经基础进行了探索。尽管3种方法下得到的结果不尽相同,但却一致

发现,上内顶叶沟(superior intra-parietal sulcus, sIPS;图3)在记忆保持阶段得到显著激活。该结果与Xu和Chun^[11,29,30]所揭示的VWM存储神经机制一致,即sIPS的激活强度反映存储的客体信息。

2.4 CDA的产生机制

来自频域分析的研究发现,alpha波段(9~13 Hz)同视觉工作记忆的容量有着密切关系^[31,32]。这提示alpha波段似乎与CDA慢波间存在着一定的联系,该推测得到了最近一项MEG研究的支持。van Dijk等人^[33]提出,CDA的产生与人脑神经振荡中alpha波的振幅波动非对称(amplitude fluctuation asymmetry, AFA)特性有直接关系。所谓AFA是指alpha波波幅变动时,其波峰与波谷并非同等程度的变化,而是波峰的变化要强于波谷(或相反)。由于该特性的存在,与传统观点预测相反,时域分析中的平均叠加法并不能将非相位锁定的alpha波振荡完全予以抵消;相反,叠加后会产生一个慢波电位^[34]。具体到慢波CDA, van Dijk等提出如下产生过程(亦见文献[33]中的图1):当记忆刺激呈现在某一侧视野时,与刺激同侧的脑区alpha波活动会稍稍增强,而对侧脑区alpha波受到显著抑制;由于alpha波的AFA特性,平均后在同侧脑区产生一正向慢波,对侧脑区产生一负向慢波,后者减前者得到的差异波即为CDA。van Dijk等人^[33]亦计算了通过时域分析获得的MEG CDA与MEG中alpha波AFA指标间的相关系数,发现二者存在非常显著的正相关,这同CDA与AFA有密切关系的预测相吻合。

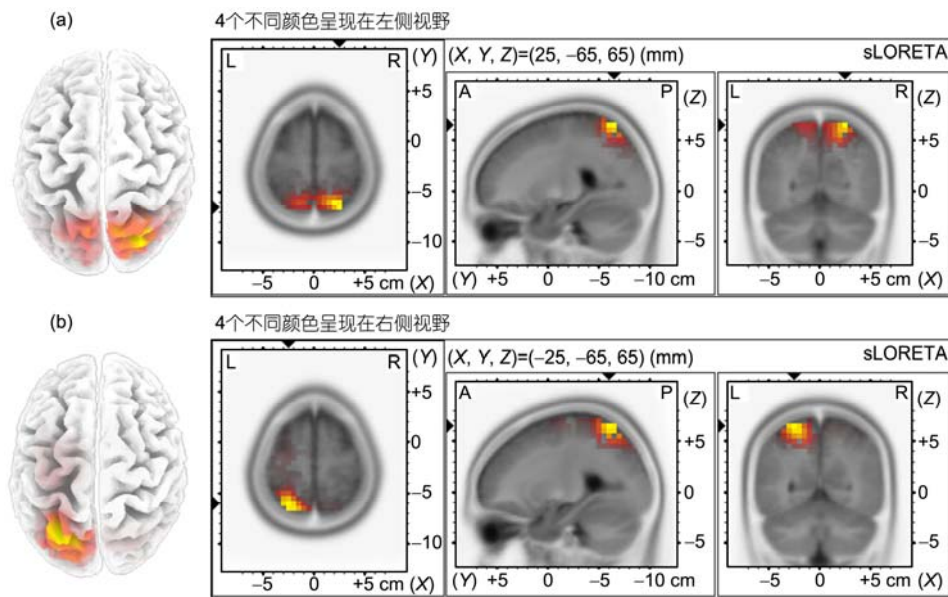


图 3 对 EEG CDA 的 sLORETA 滋阴源泉结果

用图 1(a)中的实验任务, 要求被试记忆 4 个不同颜色, 采用 sLORETA 对 CDA 进行溯源的结果, 显示激活区域均在 sIPS 附近(来自文献[19])

但需指出, van Dijk 等人^[33]的研究中要求被试记忆一个视觉客体的空间位置而非客体本身. 考虑到这两类信息在人脑中有着不同的加工区域, 故客体工作记忆下的 CDA 产生是否与 alpha 波有关, 有待进一步验证. 此外, 由于 EEG CDA 与 MEG CDA 所反映的实质可能并不相同, 故 EEG CDA 是否同样与 alpha 波的 AFA 特性有关亦需检验.

3 CDA 的应用

CDA 是当前已知唯一可实时追踪 VWM 中存储的客体信息的神经指标, 其产生、变化与消退可用来检验信息加工过程中 VWM 的参与程度或方式, 从而为探索 VWM 的运行机制、VWM 与其他高级认知活动的交互等提供一项客观依据. 笔者以下就 CDA 的应用选择 3 个重要侧面予以介绍.

3.1 通过 CDA 揭示 VWM 的存储容量

在 VWM 的存储容量研究中存在两种对立的观点: 一种观点认为 VWM 以客体为单位存储信息, 至多存储 3~4 个客体, 不受客体复杂度的影响^[35]; 另一种观点则认为 VWM 可存储的客体数目不固定, 其受复杂度影响, 客体复杂度越高, 可存储的客体数目越少^[36]. 尽管研究者采用行为实验对上述问题进行了

数项研究^[37], 但是由于变化觉察任务下获得的行为绩效是信息编码、保持、比较、决策各阶段综合作用的结果, VWM 可存储的客体数目是否受记忆复杂度影响仍难以获得定论. 为解决该问题, 笔者实验室^[26]采用 CDA 作为 VWM 中存储客体数目的指标, 以简单客体和复杂客体为实验材料, 要求被试记忆 2 个或 4 个客体. 第一种观点预测, 无论在何种实验材料条件下, 4 个客体的 CDA 幅值均要大于 2 个客体的幅值; 第二种观点则预测, 简单客体条件下 4 个客体的 CDA 幅值高于 2 个客体的幅值, 而在复杂客体条件下由于被试仅能记住约 2 个客体, 因此 2 个与 4 个客体的 CDA 幅值间无差异. 笔者的 4 个子实验均支持第二种观点, 为解决 VWM 可存储的客体数目是否受复杂度调节, 首次提供了清楚的实验证据, 随后也得到了其他研究者的验证^[22,25].

3.2 通过 CDA 揭示注意控制在 VWM 中的作用

VWM 容量的有限性要求个体选择性地加工环境信息, 因此个体 VWM 容量的不同可能与其信息选择时的注意控制密切相关. Vogel 等人^[6]以 CDA 为指标对该问题进行了开创性探讨. 研究以有颜色和朝向的矩形条为实验材料, 要求被试记忆朝向, 并设置了 3 种实验条件: A, 呈现并记忆 2 个红色矩形条; B,

呈现并记忆4个红色矩形条;C,呈现2个红色矩形条与2个蓝色矩形条,但仅要求被试记忆红色矩形条的朝向而忽略蓝色矩形条.研究假设,若被试能有效过滤干扰项(即蓝色矩形条),那么C条件下的CDA幅值应与A相同;反之,C应与B相同.在分析CDA的同时,研究者根据行为数据计算了每个被试的VWM容量,并根据该容量的中位数将所有被试分为高容量组与低容量组.结果发现,高容量组被试的CDA幅值符合前一种预测,说明个体可有效过滤干扰项;而低容量组被试则符合后一种预测,表明他们无法有效抑制无关干扰信息,而是将其一并存储至VWM.上述研究为揭示个体VWM容量存在差异的原因提供了重要线索,也开启了研究注意控制个体差异的系列研究^[38-41].

值得一提的是,研究者结合上述的CDA作用,将CDA应用到帕金森病患者群体上,揭示帕金森病患者VWM的损伤是由VWM容量下降与过滤干扰信息的能力受损所致^[42].由此可见,运用CDA不仅可解决理论问题,也可为临床诊断提供重要的参考.

3.3 通过CDA揭示VWM在视觉搜索、心理旋转中的重要角色

视觉搜索任务中是否需要VWM的参与,是一个争议性很强的重要问题^[43-46].导致争议一直存在的一个重要原因在于,研究者仅能通过最终的行为数据去推论,而不能直接监测视觉搜索过程中纯粹与VWM相关的指标.CDA为该问题提供了直接的解决方案.Emrich等人^[5]发现,在10个旋转过一定角度(0°,90°,180°,或270°)的“T”中搜索无任何旋转的“T”时,可记录到明显的CDA,表明视觉搜索过程的确需要VWM的参与.进一步的研究还发现,CDA幅值与搜索反应时呈显著负相关,表明VWM容量在搜索速率方面具有良好的预测作用^[21,47].

采用类似的逻辑,研究者考察了VWM在心理旋转任务中的作用^[48],发现当被试使用心理旋转策略时CDA出现,且其持续时间随心理旋转角度的增大而延长,而不使用心理旋转策略时该现象则消失,表明心理旋转过程中存在VWM的参与,且旋转程度越大,表征信息在VWM中维持时间越长.

4 展望

CDA作为能有效反映VWM中存储客体表征数

目的差异波,其很多重要性质已基本探明,并得到越来越多研究者的关注与应用.然而,仍有不少基本问题需进一步探明.

4.1 CDA反映工作记忆中存储的客体数目还是布尔地图数目

当前VWM领域一般认为,VWM的存储单位为客体,CDA因而反映的是VWM中存储的客体数目^[49].然而最近来自视知觉的研究对VWM的存储单位提出了新的解释.Huang与其合作者^[50-52]提出,视知觉阶段的加工分为2个阶段:选择(selection)与可得(access).前者以知觉客体为选择单位,而后的加工单位是布尔地图(Boolean map).所谓布尔地图,是一种空间结构,用布尔值(二进制代码)对一系列位置进行标记,用以区分选择和未被选择的区域.特征属性通过赋予每张布尔地图相应的标记值(label)来表征.由于当前的CDA研究中,特别是采用简单特征为实验材料时^[10,17],呈现客体于不同的空间位置,使得不同的客体数目完全可以用不同的布尔地图予以解释.因此,Huang等人提出,VWM中存储的单位可能是布尔地图.另外,VWM的信息存储阶段,类似于知觉的信息可得阶段;而笔者实验室最近的研究也表明,VWM的加工机制与视知觉加工间存在着密切的关系,如VWM以类似视知觉的方式选择加工信息^[41,53-55],这也为VWM的存储单位为布尔地图提供了进一步的间接证据.因此,有必要采用合适的实验设计,分离客体数目与布尔地图数目,来考察VWM的存储单位以及CDA所反映的实质.

4.2 CDA与神经客体文件理论模型的关系

采用fMRI技术,Xu与Chun进行了一系列VWM研究^[11,20,29,30,56],提出了神经客体文件理论模型.该模型认为,VWM中的客体存储存在个体化(individuation)与识别(identification)2个阶段.前者由大脑的下内顶叶沟(inferior intraparietal sulcus)基于空间位置对客体进行选择,3~4个客体可得到简单、粗糙的加工;后者由大脑的sIPS执行,对第一阶段得到加工的客体进行复杂、精细加工,因此客体的细节信息可被存储加工至VWM,该阶段可存储的客体数目受客体本身所含信息量的影响,所含信息量越高,可被存储的客体数目越少.由于CDA的研究揭示VWM可存储的客体数目受客体所含信息量的影响,

提示 CDA 可能反映地是识别阶段的加工. 为进一步探明 CDA 与上述两个阶段的关系, Gao 等人^[19]最近采用与 Xu 相同的实验设计, 发现 CDA 的结果模式与 sIPS 的激活模式类似, 且溯源在 sIPS 附近, 为 CDA 与识别阶段有关提供了直接证据. 但需指出, 验证 CDA 的确与识别阶段相关仍需多方面的证据, 比如 VWM 存储的识别阶段不会受到客体间组织方式的影响^[29], 而 CDA 是否受客体间组织方式的影响, 尚未有相关的实验证据. 因此, CDA 与神经客体文件理论的关系需进一步的研究.

4.3 CDA 幅值本身是否可反映细节信息的存储

Luria 等人^[25,49]发现, 在记忆相同数目的客体情况下, 包含细节信息的复杂图形 CDA 幅值显著高于仅包含高辨别信息的简单颜色. 基于该结果他们认为, CDA 的幅值本身可反映细节信息的存储. 尽管笔者实验室在相关的研究中也获得了类似的结果^[23], 但是笔者认为该结果可能受记忆客体的物理材料影响, 因此最近通过采用记忆相同实验材料而操纵是否记忆细节信息的方式, 就该问题进行了探索^[26], 发现 CDA 幅值并不能反映细节信息存储(图 2): 4 个无细节信息的客体 CDA 幅值显著高于 2 或 4 个含有细节信息的客体 CDA 幅值. 相反, 2 与 4 个客体幅值间的差异可反映细节信息存储: 在记忆细节信息情况下二者的 CDA 幅值无差异, 在无细节信息情况下前者显著高于后者. 然而, 由于笔者的研究中仅考察了在变化觉察任务下, 对某一特定类型客体(有朝向的箭头)的存储, 上述结果是否具普遍性尚待进一步探讨^[57].

4.4 EEG 与 MEG 记录下的 CDA 实质是否相同

EEG 和 MEG 均具有高时间精确度, 二者在很大程度上是互补关系: EEG 主要反映垂直于大脑皮层的神经源活动, MEG 主要反映平行于外部大脑皮层切线的神经源活动. 因此, 从 EEG 获得的结果可能同 MEG 获得的结果不尽相同, 笔者近期的 MEG 研究也为该说法提供了直接证据^[58]. 因此, 研究者除了开展来自 EEG 的 CDA 研究, 目光也开始关注来自 MEG 的 CDA 研究. 如 Jolicoeur 实验室发现, 在顶枕叶处发现一个与 CDA 模式类相似的成分 SPCM (Sustained-Posterior Contralateral Magnetic): 二者均受记忆客体数目的调节^[7,8,32,33]. 然而, 相关的 MEG CDA 研究也发现一些不同于 EEG CDA 结果, 如发现 SPCM 在左侧半球更加明显^[8], 与记忆负荷相关的 alpha 波段脑区分布亦不相同^[31,32]. 这些分歧可能同 EEG 与 MEG 所反映的源不同相关. 考虑到采用 MEG 进行的相关研究尚处于起步阶段, 故需更多的研究方能探明 SPCM 与 CDA 间的关系.

4.5 CDA 的灵敏性

当前, 研究者已对信息保持在 VWM 中时的 CDA 基本特性进行了多项研究, 但对于 CDA 的灵敏性目前几乎未见研究. 当前可得间接证据来自于无意识加工^[59]: 研究者发现进入 VWM 的信息即使未达到个体的意识水平, 仍可诱发 CDA. 上述结果暗示 CDA 的确对存储在 VWM 中的信息敏感, 但是 CDA 的灵敏性包括很多方面, 比如信息更新丢失时 CDA 会如何改变等, 均需后续研究予以探明.

参考文献

- 1 Baddeley A D, Hitch G J. Working memory. *Psychol Learn Motiv*, 1974, 8: 47–90
- 2 Cowan N. The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behav Brain Sci*, 2001, 24: 87–185
- 3 Luck S J, Vogel E K. The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*, 1997, 390: 279–281
- 4 Vogel E K, Woodman G F, Luck S J. Storage of features, conjunctions, and objects in visual workingmemory. *J Exp Psychol Human*, 2001, 27: 92–114
- 5 Emrich S M, Aidroos N A, Pratt J, et al. Visual search elicits the electrophysiological marker of visual working memory. *PLoS ONE*, 2009, 4: 8042–8050
- 6 Vogel E K, McCollough A W, Machizawa M G. Neural measures reveal individual differences in controlling access to working memory. *Nature*, 2005, 438: 500–503
- 7 Robitaille N, Grimault S, Jolicoeur P. Bilateral parietal and contralateral responses during maintenance of unilaterally encoded objects in visual short-term memory: Evidence from magnetoencephalography. *Psychophysiology*, 2009, 46: 1090–1099
- 8 Robitaille N, Marois R, Todd J, et al. Distinguishing between lateralized and nonlateralized brain activity associated with visual short-term memory: fMRI, MEG, and EEG evidence from the same observers. *NeuroImage*, 2010, 53: 1334–1345

- 9 Ventre-Dominey J, Bailly A, Lavenne F, et al. Double dissociation in neural correlates of visual working memory: A PET study. *Brain Res Cogn Brain Res*, 2005, 25: 747–759
- 10 Vogel E K, Machizawa M G. Neural activity predicts individual differences in visual working memory capacity. *Nature*, 2004, 428: 748–751
- 11 Xu Y, Chun M. Dissociable neural mechanisms supporting visual short-term memory for objects. *Nature*, 2006, 440: 91–95
- 12 Drew T W, McCollough A W, Vogel E K. Event-related potential measures of visual working memory. *Clin EEG Neurosci*, 2006, 37: 286
- 13 Ruchkin D S, Johnson Jr R, Grafman J, et al. Multiple visuospatial working memory buffers: Evidence from spatiotemporal patterns of brain activity. *Neuropsychologia*, 1996, 35: 195–209
- 14 Gratton G. The contralateral organization of visual memory: A theoretical concept and research tool. *Psychophysiology*, 1998, 35: 638–647
- 15 Klaver P, Talsma D, Wijers A A, et al. An event-related brain potential correlate of visual short-term memory. *NeuroReport*, 1999, 10: 2001–2005
- 16 Eimer M, Kiss M. An electrophysiological measure of access to representations in visual working memory. *Psychophysiology*, 2010, 47: 197–200
- 17 McCollough A W, Machizawa M G, Vogel E K. Electrophysiological measures of maintaining representations in visual working memory. *Cortex*, 2007, 43: 77–94
- 18 Ikkai A, McCollough A W, Vogel E K. Contralateral delay activity provides a neural measure of the number of representations in visual working memory. *J Neurophysiol*, 2010, 103: 1963–1968
- 19 Gao Z, Xu X, Chen Z, et al. Contralateral delay activity tracks object identity information in visual short term memory. *Brain Res*, 2011, 1406: 30–42
- 20 Xu Y. Distinctive neural mechanisms supporting visual object individuation and identification. *J Cogn Neurosci*, 2009, 21: 511–518
- 21 Carlisle N B, Arita J T, Pardo D, et al. Attentional templates in visual working memory. *J Neurosci*, 2011, 31: 9315–9322
- 22 Diamantopoulou S, Poom L, Klaver P, et al. Visual working memory capacity and stimulus categories: A behavioral and electrophysiological investigation. *Exp Brain Res*, 2011, 209: 501–513
- 23 Gao Z, Li J, Liang J, et al. Storing fine detailed information in visual working memory—Evidence from event-related potentials. *J Vision*, 2009, 9: 1–12
- 24 Woodman G F, Vogel E K. Selective storage and maintenance of an object's features in visual working memory. *Psychon B Rev*, 2008, 15: 223–229
- 25 Luria R, Sessa P, Gotler A, et al. Visual short-term memory capacity for simple and complex objects. *J Cogn Neurosci*, 2009, 22: 496–512
- 26 Gao Z, Yin J, Xu H, et al. Tracking object number or information load in visual working memory: Revisiting the cognitive implication of contralateral delay activity. *Biol Psychol*, 2011, 87: 296–302
- 27 Arend A M, Zimmer H D. What does ipsilateral delay activity reflect? Inferences from slow potentials in a lateralized visual working memory task. *J Cogn Neurosci*, 2011, 23: 4048–4056
- 28 Perez V B, Vogel E K. What ERPs can tell us about visual working memory. In: Luck S J, Kappenman E, eds. *Oxford Handbook of Event-related Potential Components*. New York: Oxford University Press, 2011
- 29 Xu Y, Chun M. Visual grouping in human parietal cortex. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, 104: 18771–18776
- 30 Xu Y, Chun M. Selecting and perceiving multiple visual objects. *Trends Cogn Sci*, 2009, 13: 167–174
- 31 Sauseng P, Klimesch W, Heise K F, et al. Brain oscillatory substrates of visual short-term memory capacity. *Curr Biol*, 2009, 19: 1846–1852
- 32 Grimault S, Robitaille N, Grova C, et al. Oscillatory activity in parietal and dorsolateral prefrontal cortex during retention in visual short-term memory: Additive effects of spatial attention and memory load. *Hum Brain Mapp*, 2009, 30: 3378–3392
- 33 van Dijk H, van der Werf J, Mazaheri A, et al. Modulations in oscillatory activity with amplitude asymmetry can produce cognitively relevant event-related responses. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 900–905
- 34 Mazaheri A, Jensen O. Asymmetric amplitude modulations of brain oscillations generate slow evoked responses. *J Neurosci*, 2008, 28: 7781–7787
- 35 Awh E, Barton B, Vogel E K. Visual working memory represents a fixed number of items regardless of complexity. *Psychol Sci*, 2007, 18: 622–628
- 36 Alvarez G A, Cavanagh P. The capacity of visual short-term memory is set both by visual information load and by number of objects. *Psychol Sci*, 2004, 15: 106–111
- 37 Jiang Y, Makovski T, Shim W M. Visual memory for features, conjunctions, objects, and locations. In: Brockmole J R, ed. *The Visual World in Memory*. Beijing: Psychology Press, 2009
- 38 Drew T, Vogel E K. Neural measures of individual differences in selecting and tracking multiple moving objects. *J Neurosci*, 2008, 28: 4183–4191
- 39 Fukuda K, Vogel E K. Human variation in overriding attentional capture. *J Neurosci*, 2009, 29: 8726–8733
- 40 Fukuda K, Vogel E K. Individual differences in recovery time from attentional capture. *Psychol Sci*, 2011, 22: 361–368

- 41 Zhou J, Yin J, Chen T, et al. Visual working memory capacity does not modulate the feature-based information filtering in visual working memory. *PLoS ONE*, 2011, 6: e23873
- 42 Lee E Y, Cowan N, Vogel E K, et al. Visual working memory deficits in patients with Parkinson's disease are due to both reduced storage capacity and impaired ability to filter out irrelevant information. *Brain*, 2010, 133: 2677–2689
- 43 Horowitz T S, Wolfe J M. Visual search has no memory. *Nature*, 1998, 394: 575–577
- 44 Hollingworth A, Luck S J. The role of visual working memory in the control of gaze during visual search. *Atten Percept Psychol*, 2009, 71: 936–949
- 45 Woodman G F, Vogel E K, Luck S J. Visual search remains efficient when visual working memory is full. *Psychol Sci*, 2001, 12: 219–224
- 46 Woodman G F, Luck S J. Do the contents of visual working memory automatically influence attentional selection during visual search? *J Exp Psychol Human*, 2007, 33: 363–377
- 47 Woodman G F, Arita J T. Direct electrophysiological measurement of attentional templates in visual working memory. *Psychol Sci*, 2011, 22: 212–215
- 48 Prime D J, Jolicoeur P. Mental rotation requires visual short-term memory: Evidence from human electric cortical activity. *J Cogn Neurosci*, 2009, 22: 2347–2446
- 49 Luria R, Vogel E K. Shape and color conjunction stimuli are represented as bound objects in visual working memory. *Neuropsychologia*, 2011, 49: 1632–1639
- 50 Huang L. What is the unit of visual attention? Object for selection, but boolean map for access. *J Exp Psychol*, 2010, 139: 162–179
- 51 Huang L, Pashler H. A Boolean map theory of visual attention. *Psychol Rev*, 2007, 114: 599–631
- 52 Huang L, Treisman A, Pashler H. Characterizing the limits of human visual awareness. *Science*, 2007, 317: 823–825
- 53 Gao Z, Li J, Yin J, et al. Dissociated mechanisms of extracting perceptual information into visual working memory. *PLoS ONE*, 2010, 5: e14273
- 54 Gao Z, Bentin S. Coarse-to-fine encoding of spatial frequency information into visual short-term memory for faces but impartial decay. *J Exp Psychol Human*, 2011, 37: 1051–1064
- 55 Gao T, Gao Z, Li J, et al. The perceptual root of object-based storage: An interactive model of perception and visual working memory. *J Exp Psychol Human*, 2011, 37: 1803–1823
- 56 Xu Y. The role of the superior intraparietal sulcus in supporting visual short-term memory for multifeature objects. *J Neurosci*, 2007, 27: 11676–11686
- 57 Machizawa M G, Goh C C, Driver J. Human visual short-term memory precision can be varied at will when the number of retained items is low. *Psychol Sci*, 2012, 23: 554–559
- 58 Gao Z, Goldstein A, Harpaz Y, et al. A magnetoencephalographic study of face processing: M170, Gamma-band oscillations and source localization. *Hum Brain Mapp*, 2011, 1406: 30–42
- 59 Astle D E, Nobre A C, Scerif G. Subliminally presented and stored objects capture spatial attention. *J Neurosci*, 2010, 30: 3567

Contralateral delay activity: An ERP index measuring information stored in visual working memory

GAO ZaiFeng, YU WenJun, XU XiaoTian, YIN Jun, SHUI RenDe & SHEN MoWei

Department of Psychology and Behavioral Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China

Visual working memory (VWM) keeps a limited set of visual objects(3–4 simple objects), yet it has close relationship with many of our foundational cognitive abilities. Therefore, in the recent decade the storage mechanism of VWM has been the interest of many research fields, such as cognitive psychology, and cognitive neuroscience, etc. So far, contralateral delay activity (CDA) has been the only ERP component which can track the number of representations in VWM on-line. Using CDA researchers have achieved fruitful results in revealing VWM mechanisms in the last decade. In the current paper we first introduced the origin of CDA, and its basic properties(e.g., amplitude, time course, cerebral source) in detail; then we briefly reviewed studies using CDA on VWM exploration as well as its clinical application. Finally, we discussed possible directions for future CDA research.

contralateral delay activity, visual working memory, cognition, applications

doi: 10.1360/972012-728