

《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：多特征刺激在视觉工作记忆中的存储模式

作者：黎翠红 何旭 郭春彦

第一轮

审稿人 1 意见：

意见 1：

作者对表征精确度操作的有效性有待进一步说明。在视觉工作记忆任务中操作表征的精细程度，一般是通过记忆项与检测项间变化的大小进行操纵。作者实验中采用了简单的颜色，无论在监测阶段变化一个颜色还是两个颜色，均属于比较大的变化。关于颜色表征精细程度操纵，作者可以引用并讨论 Ye C, Zhang L, Liu T, Li H, Liu Q (2014) Visual Working Memory Capacity for Color Is Independent of Representation Resolution. PLoS ONE 9(3): e91681. doi:10.1371/journal.pone.0091681

回应：感谢审稿专家的意见，引发了我们对实验操控的进一步思考。接下来我们将从选择该种精度操纵方式的原因、如何操纵以及操纵的有效性三个方面来解释这个问题。

在之前的研究中，研究者们使用变化觉察范式来研究精度对记忆资源分配的影响时，一般是通过记忆项与检测项间变化的大小进行操纵，也就是利用了记忆项和检测项之间的相似性。例如，审稿专家提到的 YE 等人(2014)的研究中，和我们一样，都是使用颜色(单色块)作为刺激材料，但是是通过控制颜色变化为其他颜色(相似性低，低精度)或者变化为相似颜色(相似性高，高精度)来调控表征精度的大小。而在本实验中，虽然采取了另外一种操控方式，即通过操控检测项中可能变化的项目数来改变表征的精度，但这与之前研究的中精度操纵的主体逻辑是保持一致的。

关于精度的具体操控，我们假设，当在低精度条件(双色块整体变化)下，测验阶段双色块的两个颜色都发生变化，此时记忆项和测验项间的差异较大，相似性较低，因而被试只需要形成粗略的印象就能做出正确的判断。但是，当在高精度条件(双色块部分变化)下，测验阶段的双色块只有一个颜色发生变化，此时记忆项和检测项之间发生的变化较小，两者相似性较高，被试需要对双色块的两个颜色都形成更清晰精确的表征，才能做出正确的变化觉察判断。

除此之外，从最终的行为和脑电结果上来看，关于精度表征高低的操纵是有效的。低精度条件下的正确率显著高于高精度条件，并且，低精度条件下的前额区 LPC 振幅要显著低

于高精度条件。在以往研究中前额区的 LPC 振幅被认为是对被试投入的自上而下的控制的多少的反映(Gao et al.,2011)。

关于实验中表征精度的操控问题，我们已经参考审稿专家的意见在前言和讨论中进行了讨论，详见前言最后一段和讨论中 4.2 的第二段蓝色字体部分。

意见 2:

实验一中，根据眨眼剔除四个被试的数据，但是行为数据分析似乎未进行相应的剔除。另外，大量用 CDA 作为指标探究工作记忆表征的研究发现水平眼电对 CDA(以及 LPC)影响较大，一般都在 CDA 处理中将较大的水平眼动的试次剔除，请作者报告水平眼电的处理情况。

回应:

感谢审稿专家的意见，确实水平眼电会对 CDA 的结果产生一定的影响，但是在实验数据处理过程中我们发现，大多数被试的水平眼动都比较多。如果在数据处理时将水平眼动较大的试次都剔除，那么大部分被试都会因为叠加次数不够而被剔除，最终导致数据无法分析；并且 Luria 等人(2009)的文章中也未对水平眼电进行处理(Luria, R., Sessa, P., Gotler, A., Jolicoeur, P., & Dell'Acqua, R. (2010). Visual short-term memory capacity for simple and complex objects. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(3), 496-512.)。因此，在对 CDA 处理时我们并未剔除水平眼动较大的试次。

意见 3:

实验一中，对 18 名被试脑电数据分析，“ $F(2,36)=3.31$ ”，此处误差项的自由度应该是 34。

回应:

感谢审稿专家的指正。已将原文相关处的自由度进行检查并订正：实验一中，CDA 结果， $F(2,34)=3.31$ ；LPC 结果， $F(2,34)=3.96$ 。见 2.2.2 ERP 结果中蓝色字体部分。

意见 4:

论文中的参考文献引用不当，如 P4” 利用 CDA 作为工作记忆容量的指标，可以实现将正确率和容量值相分离，在实验中观测到纯净的存储容量(单西娇，李寿欣，2010)”。此处引用单西娇，李寿欣，2010 似乎不恰当，建议引用“Luria, R., Sessa, P., Gotler, A., Jolicoeur, P., & Dell'Acqua, R. (2010). Visual short-term memory capacity for simple and complex objects.

Journal of cognitive neuroscience, 22, 496-512.; McCollough, A. W., Machizawa, M. G., & Vogel, E. K. (2007). Electrophysiological measures of maintaining representations in visual working memory. Cortex, 43, 77-94; 或高在峰, 郁雯珺, 徐晓甜, 尹军, 水仁德, 沈模卫. (2012). 对侧延迟活动: 视觉工作记忆信息存储的 ERP 指标, 科学通报, 57(30): 2806-2814.”

回应:

感谢审稿专家的建议, 已对此处的参考文献进行修改。见前言第 4 段中蓝色字体部分。

意见 5:

P11 3.11“12 名大学生 (4 男 8 女)参与了本次实验, 年龄 20-25 岁, 平均年龄 22.4 岁(沈模卫等, 2007; Woodman, Vecera, & Luck, 2003; Fournie, & Marois, 2011)”此处的参考文献应当删除。

回应:

感谢审稿专家的建议, 已对此处的参考文献进行删除。

审稿人 2 意见

意见 1:

作者的关键实验逻辑是“双色块的两个颜色都会变化(整体变化), 此时被试只需要存储大致的表征就可以做出正确的反应; 而在高精度条件中, 双色块仅有一个颜色会发生变化(部分变化), 此时变化幅度小, 需要形成更精确的表征才能做出正确的反应。”。为什么变化两个色块, 就只需要存储大致的表征, 而变化一个色块就需要形成更精确的表征? 请作者给出论证。

回应:

感谢审稿专家的意见, 在此尝试对该问题作出更清晰的解释。

之所以通过改变检测项中的双色块可能变化特征的数量来操控表征精度是因为, 在之前的研究中, 大多数研究者都是通过改变记忆项和检测项之间的相似性来实现表征精度的变化。例如, Luria 等人(2010)通过相似的颜色来增加精度需求, Machizawa 等人(2012)通过改变矩形朝向可能发生变化的幅度。而在本研究中也是延续了这一思想, 即如果记忆项和检测项之间相似性越低, 也就是反差较大, 那么被试就只需要形成大致的表征就可以做出正确的判断;

如果相似性越高，记忆项和检测项之间相差越小，那么被试就需要形成较高的表征精度以便做出正确的反应。

而具体到本实验中使用的双色块，我们则是通过控制检测项中可能变化的特征数量来实现相似性的改变，以达到被试能够形成高低两种表征精度的操控。如果在测验阶段双色块的两个色块都发生了变化，对于双色块来说整体也就发生了变化，此时，检测项和记忆项之间的反差较大，相似性较低，因此被试只需要进行大致的表征就可以作出正确的判断；但是，如果检测项中的双色块只有一个色块发生变化，此时，检测项和记忆项之间的反差较小，因此对于被试来说在保持阶段就需要提高表征精度，对项目进行更为清晰的存储，这样才能保证判断正确。

关于实验中表征精度的操控问题，我们已经讨论中补充了讨论，详见前言最后一段和讨论中 4.2 的第二段蓝色字体部分。

意见 2:

作者在文中论述的主题是，特征数量和记忆精度需求是否能够影响“记忆容量的资源分配”。对于记忆容量的资源分配这一说法存在问题，容量是能够记忆的最大项目数，“容量的资源”似乎说不通。所以作者写为“记忆资源的分配”应该更合适。同时，对于记忆资源的分配模式，作者在文中并没有具体的描述。关于记忆资源的分配问题通常离散插槽模型和灵活资源模型有不同的分配模式，希望作者能够基于已有模型假设在文中给出记忆资源如何分配的详细论述，并以此为基础提出实验假设。

回应:

审稿专家的意见非常恰当。在原文中我们已将“记忆容量的资源分配”改正为“记忆资源的分配”。

关于审稿专家提到的通过两个模型来探讨记忆资源的分配问题，我们认为也是很有必要的，因此在文章中的前言和讨论中进行了具体的描述。与之前发表的有关解决两个分配模型争议的文章不同，本研究使用特征数量明确的双色块作为多特征刺激，是因为更希望去直接探究特征数量对工作记忆资源分配的直接影响，与此同时考察表征精度是否会影响多特征刺激的工作记忆资源分配，主要想考察这两个影响因素对记忆资源分配的影响。而审稿专家提出的添加两个模型对解释我们的研究结果来说也是一个很好的补充，因此我们同样在文章相应部分增加了这部分的内容。

增加部分详见引言第二段、最后一段和总讨论中 4.1 第三、四段，4.2 第二段中红色字体部分。

意见 3:

文章前沿的第二、三段的描述逻辑让人难以理解，请重新梳理。

回应:

非常感谢审稿人提出的宝贵意见。按照您的意见，我们重新梳理了第二、三段的描述逻辑(见第二、三段红色字体部分)，并在此简要说明。

这两段主要为了说明当前研究中关于“特征数量和表征精度对记忆资源分配的影响”的研究的一般情况，并指出目前存在的争议。第二段主要说明特征数量对多特征项目容量资源分配的影响，指出不同研究者的实验得出了不同的结果，因此关于这个问题还存在一定的争议；第三段主要讨论，由对复杂刺激的容量小于简单刺激的原因(有可能不是由于复杂刺激包含的特征数量较多，而是复杂刺激需要更高的表征精度)的探讨引发对“表征精度是否会影响记忆资源分配”这一问题的思考。

意见 4:

实验一中对前额区 LPC 的分析结果则表明，双色块部分变化的 LPC 振幅显著强于双色块整体变化和单色块条件，而双色块整体变化和单色块条件间则无显著差异。作者认为，双色块两种精度条件间的差异表明，在记忆多特征物体时对记忆表征的精度需求的提高诱发了对视觉工作记忆存储的更强的自上而下的控制。从而证明当前研究对于精度需求的操控是有效的。但双色块整体变化和部分变化条件在记忆阵列出现后约 800ms 出开始分离，这个时间阶段是记忆保持的阶段，那么为什么精度需求越高，在记忆保持阶段的自上而下控制会更强？请作者能够给出更具体的理论解释。

回应:

感谢审稿专家的意见，关于这个问题可能是我们在文章中的表述不是很清晰，在此做出简要说明。

首先，之所以考察记忆保持阶段(记忆阵列出现约 800ms 之后)的 LPC 进行分析是由于已有研究表明，前额区周边 LPC 可能与工作记忆相关，反映的正是 VWM 的**保持阶段**前额叶对后部脑区的自上而下的控制(Gao et al.,2011)。

而实验一的 LPC 结果显示，双色块部分变化显著高于整体变化条件下的 LPC 的振幅。而部分变化和整体变化条件之间的差异即是高低精度之间的差异，也就是说，高低精度的差异导致了 LPC 的差异，即精度需求越高，反映自上而下控制的 LPC 也就越强。因此，我们推论，精度需求越高，在记忆保持阶段的自上而下的控制也就会越强。我们对此的解释是，在工作记忆的保持阶段，前额叶将出现持续性激活。随着工作记忆任务难度的增加，前额叶的激活程度会随之增大(Cabeza R&Nyberg L,2000; Druzgal TJ& D'Esposito M.,2003; Rypma B, Berger JS&D'Esposito M.,2002)。较高的精度需求，促使被试去更努力地在记忆中保持住一个更精确地表征，而这种“更努力地”状态就体现为前额叶对后部脑区的更强的控制。

当然，由于尚未有研究对工作记忆保持阶段的精度需求和自上而下的控制进行直接的研究，因此，关于精度需求和自上而下控制之间的关系我们只是基于 LPC 的结果尝试得出的推论。

具体详见 4.2 第三段。

意见 5:

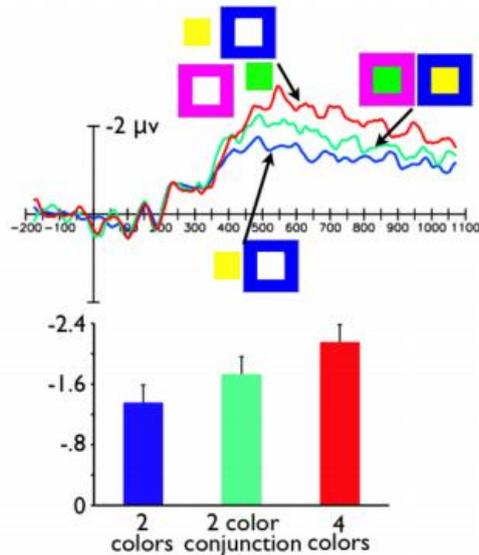
作者认为特征数量的增加会增加记忆资源的分配，实验 1 采用的条件是两个双色部分改变和两个双色整体改变，由于这两种条件下被试需要记忆 4 个特征(无论精度如何)，结果发现两个条件下的 CDA 不存在显著差异，该结果存在两种可能性。一是如作者结论所述记忆精度不影响资源分配；二是实际上记忆精度会对记忆资源分配造成影响，但由于两种条件下记忆内容都达到或超过被试的容量上限，因此 CDA 波幅上不会出现显著差异。请作者尝试排除第二种可能性。

回应:

非常感谢审稿专家的意见，您的意见引导我们对实验结果的解释进行了进一步的思考，当前的数据确实需要我们去考虑排除天花板效应的存在。接下来我们将尝试从三个方面来排除这种可能性。

(1)在我们的实验中呈现包含信息最多的就是两个双色块，而对于复杂刺激来说，两个双色块可能已经达到容量上限，然而在我们的实验中并无 CDA 的数据直接显示两个双色块是不是被试的最高容量值。因此，我们试图借助 Luria 等人(2011)的研究结果来帮助解释这一问题。Luria 等人(2011)的研究也是使用了双色块作为刺激材料，同时也使用了四个单色块。在他们的研究中我们可以发现，两个双色块的 CDA 振幅值并不是所有条件中的最高值，四个单色块的 CDA 振幅显著高于两个双色块(见下图)。如果两个双色块已经达到被试的容量

上限的话，那么四个单色块的振幅就不可能超过两个双色块的 CDA 振幅值。因此，这一结果就表明，两个双色块并没有达到被试的容量上限。



(2)我们查阅了已有的文献，大多数文献中的 4 个项目或达到容量上限的 CDA 振幅值都要高于本实验中的两个双色块的振幅值。例如，Ikkai, McCollough & Vogel(2010)的实验中，4 个单色块的振幅值约为-1.2μV；Luria 等(2009)4 个单色块的振幅值约为-1.99μV，而随机多边形的振幅值在阵列大小为 2 时已经达到上限，振幅值为-1.83μV；沈模卫等(2009)的实验结果中无论是简单客体还是复杂客体达到容量上限的振幅值也都大于-1.2μV；使用两个双色块作为刺激材料，Luria 等人(2011)的实验中得到的振幅值也大于 1.6μV。因此，从振幅值上看我们认为，在我们的实验中被试并没有达到容量上限。

(3)我们之前进行过的实验结果表明，LPC 可能指示的控制资源也会受到容量限制，即当容量达到上限时 LPC 也会达到上限。而在本实验中，两个条件下的 LPC 是有差异的，受到了表征精度的影响，也就暗示，两个条件下的容量没有达到被试的容量上限。

因此可以排除被试已经达到容量上限而导致两条件的 CDA 振幅无显著差异的可能性。

第二轮

审稿人 1 意见：

意见 1：

“该模型则认为，记忆资源没有一个明确的上限，各个项目获得的资源会依据该项目的复杂程度、重要性等而灵活变化(Fukua, Awh, & Vogel, 2010)。”此处参考文献建议增加提出灵活资源模型的原始文献，如 Bays & Husain, 200 Science.

回应:

感谢审稿专家的指正, 我们已在原文相应处进行了修改。

详见 P14 引言第二段: “该模型则认为, 记忆资源没有一个明确的上限, 各个项目获得的资源会依据该项目的复杂程度、重要性等而灵活变化(Bays & Husain, 2008)。”

意见 2:

然而, Awh, Barton 和 Vogel(2007)对关于复杂刺激研究的结论提出了质疑, 他们在实验中发现复杂刺激类别内变化测得的容量显著低于简单刺激, 但是跨类别间变化测得的容量却与简单刺激并没有差异。……因此, 他们认为复杂刺激存储容量较低并非由于特征数量的增加, 而精度需求上的差异才是导致容量降低的原因, 即表征精度影响了记忆资源的分配。”此处作者对于 Awh et al.(2007)的解释有误。Awh 等人认为工作记忆的容量与表征精度是两个不同的问题, 反应工作记忆容量的不同方面(capacity vs. resolution)。简单刺激与复杂刺激具有相同的工作记忆的容量, 在平衡比较阶段难度的情况下, 两种刺激均可以存储 3-4 个。在比较难度较大的情况下, 被试需要存储更精细的表征以完成任务, 但是这属于表征精细度的问题, 和容量无关。真正持 resolution 与 capacity 间存在 trade-off 的研究应该是; Alveraz & Cavanagh, 2004; Bays & Husain, 2008; Gao et al., 2009; Luria et al., 2010.

回应:

感谢审稿专家的指正。我们在原文中已经更正了对 Awh et al.(2007)实验的解释, 并对前言进行了相关修改。

详见前言中第三段、第四段红色字体部分(P14-15)。

意见 3:

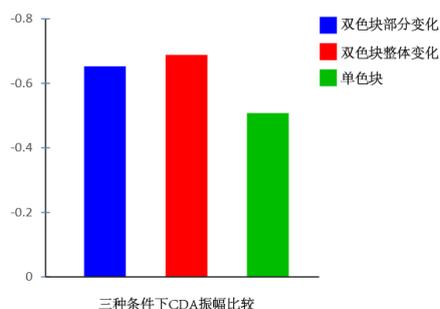
作者并未去除水平眼动(eye movement)的影响, 而仅仅对眨眼(blink)进行了校正。原因是 Luria et al. 2010 也并未去除, 以及眼动的 trial 太多。但是作者认为 Luria et al.(2009)实质上亦做了水平眼动剔除, 虽然比较粗糙: “Single trials with ocular artifacts (exceeding 200 μ V) and with other artifacts (zero lines, transients, large fluctuations, and amplifier saturations) were excluded from analysis.”尽管此处作者用的剔除标准较低(早期研究), 但是由于作者的刺激呈现基本为 100ms, 所以在某种程度上已经做了水平眼动控制; 但是由于本文记忆项刺激为 400ms, 极易引发水平眼动。该水平眼动影响 CDA 幅值与前额 LPC 幅值(影响会更大)。因此, 为了确保数据模式的准确性, 特别是 LPC 的结果, 审稿人做如下建议: a)选取水平眼

动少的被试，进行水平眼动去除，看是否同论文中报告的结果模式相似；若相似，加一个脚注，进一步增加论文数据的可信性；b)按照实验一的三个条件把水平眼动的 ERP 叠加(注意左右视野的幅值相反，分别叠加或做极性翻转后叠加)，看三种条件下的水平眼动幅值间是否有差异，以排除实验一中 LPC 的差异是由于水平眼动导致的尾迹，并在正文中报告该结果。

回应：

感谢审稿专家的意见。根据审稿专家的意见，我们对所有被试进行了水平眼动的去除(以 $30\mu\text{V}$ 为标准)，并选取了眼动较少的被试 6 名进行了数据分析(拒斥率 $<25\%$)。

(1)对三条件下的 CDA 幅值进行重复测量方差分析，CDA: $F(2,10)=0.02, p>0.05$ 。三个条件两两配对 t 检验均不显著。但三个条件的均值模式和原文报告保持一致。虽然差异均为达到显著性，这有可能也是由于被试数较少造成的。

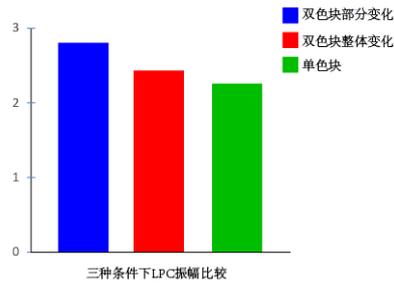


除此之外，选取 600-1200ms 作为分析时段，对三种条件下的水平眼电幅值进行了方差分析。条件的主效应显著， $F(2,34)=7.38, p<0.05$ 。双色块部分变化: $M=-5.57, SE=1.45$; 双色块整体变化: $M=-5.31, SE=1.42$; 单色块: $M=-2.37, SE=1.03$ 。双色块条件下的水平眼电要显著大于单色块条件(双色块部分变化和单色块: $t(17)=-3.41, p<0.05$; 双色块整体变化和单色块: $t(17)=-2.80, p<0.05$)。

CDA 实验过程中，水平眼动会导致记录到的幅值显著降低(高在峰等，2012)。据此，虽然本研究中对水平眼电的分析表明，双色块的水平眼动要大于单色块，但是如果排除眼动的影响，双色块和单色块之间的差异应该会更大，而三条件下的幅值变化模式不会受到影响。因此，也可以排除水平眼动的影响。

(2)对三条件下的 LPC 幅值进行重复测量方差分析， $F(2,10)=3.10, p=0.13$ 。对双色块整体变化和部分变化做配对 t 检验， $t(5)=-2.61, p=0.048$ ；双色块部分变化和单色块进行 t 检验， $t(5)=1.848, p=0.12$ ；双色块整体变化和单色块差异不显著。结果基本模式和原文报告的模式基本一致，但是可能由于被试数限制，一些尚未达到显著性水平。因此说明，LPC 的结果并

不是水平眼动伪迹造成的。



由于 LPC 与水平眼动间的关系尚不明确，所以我们认为使用去除眼动影响后的结果来排除水平眼动对 LPC 的影响是比较合适的。

该部分已在原文中增加了说明，详见 2.2.2 中红色字体部分(P20-21)。

意见 4:

作者 ERP 的结果同 Luria & Vogel(2011)的结果不一致，作者在讨论中提到“在 Luria 和 Vogel(2011)对多特征客体的研究中，与当前研究一致的是在相同的客体数量下双色块的 CDA 振幅高于单色块，但不同的是，他们观察到特征数量导致的 CDA 振幅差异随着时间进程逐渐减弱，在延迟阶段后期消失，而在本研究中双色块和单色块的振幅差异并未出现消退。”建议作者进一步讨论为何不一致，以及潜在的启示。

回应:

感谢审稿专家的意见。我们对这个问题的解释如下:

在 Luria 和 Vogel(2011)的研究中，在刺激消失前期，双色块诱发的 CDA 振幅要显著高于单色块，但是这种差异随着时间进程在延迟阶段后期逐渐消失。Luria 等人解释到，这是由于双色块中的两个色块在延迟阶段前期并没有完成特征间的捆绑，但是到了后期捆绑逐渐完成，因而和单色块的 CDA 振幅差异消失。然而在本研究中此种差异并未消失。我们认为可能产生的原因是：(1)Luria 的实验中使用的刺激呈现时间为 200ms，由于刺激使用时间较短，被试为了减少记忆负担就进行了组块记忆。而在本研究中使用的刺激呈现时间为 400ms，时间相对较充足。(2)与刺激使用的颜色有关。可能在 Luria 等人的实验中的刺激颜色更为相似，因此更有利于组块的产生，但是在我们的研究中颜色相差较大，因此难以完成组块。

关于该问题我们已经在讨论中做了补充，详见讨论中 4.1 第三段中红色字体部分(P24-25)。

审稿人 2 意见:

意见 1:

作者关于实现精度调控的解释过于牵强，实际上作者提出的精度控制假设的前提是双色块物体是以客体为单位进行存储的。而对于双特征物体的存储是否以客体为单位存储，是本文要验证的问题之一，以一个将要验证的结论为前提提出假设进行实验，这种实验逻辑是不合理的。因此，建议退稿。

回应:

感谢审稿专家的意见。对审稿专家所提的关于实验逻辑问题我们并不能完全赞同，具体回答如下。

首先，我们再次解释下本研究的实验逻辑。在本研究中，我们提出的精度控制的前提并不是双色块物体是以客体为单位存储的。在高精度条件下，只有一个色块发生变化，因此检测项和记忆项之间的反差较小，因此被试需要更多的努力去表征项目；而在低精度条件下，双色块的两个色块都发生变化，因此整体也就发生变大，被试只需粗略的表征就可以完成实验任务。

虽然我们假设中认为，学习和测验阶段项目的相似性会影响着学习阶段项目的整体表征，但这里并不是说“整体”就代表着是以客体为单位的。此处的“整体”强调的是多特征刺激自身，而假设并不是只有在“多特征刺激是以客体为单位”这个前提下才成立的。具体来说，对于一个项目来说，如果是以客体为单位，那么一个项目也就是一个客体。“检测项和记忆项之间的反差大小”说的也就是“客体与客体之间的反差大小”。但如果是以特征为单位的，那么一个项目则是由两个特征组成的。“检测项和记忆项之间的反差大小”指的就是“两个特征和两个特征之间的反差大小”了。因此，无论多特征物体是以特征为单位的还是以客体为单位的，我们这一假设都能成立。

除此之外，本研究使用多特征色块作为刺激材料，更多的主要想考察的实验一中特征数量和表征精度对工作记忆资源分配的直接影响，而实验二中的存储单位问题只是我们在研究这个问题的同时进行了一个补充，因此并不是作为我们需要验证的重点进行讨论。

所以，我们认为本研究并不存在实验逻辑问题。

审稿人 3 意见:

意见 1:

作者通过事件相关脑电技术，探讨了多特征刺激在视觉工作记忆中的存储模式，发现

CDA 随着特征数量增强而变大，但不随着精度要求而变化。该文章试验设计合理，方法可靠，结论合理，在修改中很好地回答了审稿人的意见，建议发表。同时，在今后的实验中，希望作者能更精确的控制眼动等参数，可以采用事先训练被试和眼动仪结合等方法，使实验结果更可靠和有说服力。

回应：

感谢审稿专家的支持性意见，我们在原文中已经给出尽可能排除眼动影响的证据，详见 2.2.2 中红色字体部分(P20-21)。

第三轮

审稿人 1 意见：

作者很好的回答了审稿人前期提出的问题，建议接收。

编委复审意见：

在再次阅读本稿件的过程中，发现两个问题：1. 图 3 的正确率恐怕标得不对：%0.8 的准确率应该不可能。纵坐标估计应该是从 80 至 100；2.关于统计值 F 和 P 值的写法以及参考文献的引用中，=和 > 的两头需要留一空格，两个人名之间的逗号之后需要留一空格。建议确认修改。

回应：

感谢编委专家的意见。

1、我们已经对图 3 中的纵坐标做了修改。另外，我们还发现在图 6 中也出现同样的问题，并一同做了修改,详见图 3 和图 6。

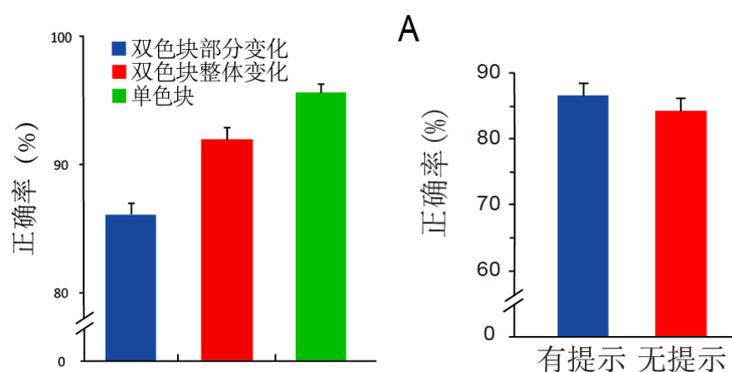


图 3 三种条件下正确率比较图 6 实验二两种条件下正确率比较

2、关于“=和& gt;的两头需要留一空格，两个人名之间的逗号之后需要留一空格”这一问题已经在原文中做了检查，在并予以一一修改。

第四轮-主编终审

意见 1:

在文中多次提到对侧延迟活动（contralateral delay activity, CDA）这一名词，但在正式介绍这一概念之前就多次直接使用其英文缩写，即 CDA，直到前言的后半部分，作者才正式对这一概念进行定义，“对侧延迟活动(contralateral delay activity, CDA)是指在记忆项目的保持阶段，目标视野的对侧脑区会比同侧脑区出现更大的负波。CDA 的振幅随着保持在视觉工作记忆中的项目数的增加而上升，并在每个被试的记忆容量临界值处达到极值。”建议对 CDA 概念进行介绍后，再使用其缩略形式。

回应:

感谢主编的意见。

我们已经在前言中调整了 CDA 概念介绍的先后顺序，即先引入其概念的介绍，再使用缩略形式。详见前言第二段红色字体部分（P18）。

此外，我们在对 FPC 的介绍中同样发现该问题，也在前言第六段做了修改（P20 红色字体部分）。

意见 2:

在介绍插槽模型（slots models）时，缺少相关文献；见原文“这些实验结果支持了记忆资源分配的插槽模型（slots models），即视觉工作记忆资源存在一个明显的上限，每个存储项目所获得的存储资源是固定的、等量的，不受项目所包含特征数量的影响。”原文中并没有引用任何提出插槽模型的文献。

回应:

感谢主编的意见，我们已在原文该处插入参考文献。详见前言第三段红色字体部分（P19）：“……插槽模型(slots models)，即视觉工作记忆资源存在一个明显的上限，每个存储项目所获得的存储资源是固定的、等量的，不受项目所包含特征数量的影响(Luck & Vogel, 1997; Zhang & Luck, 2008; Anderson, Vogel & Awh, 2011)。”

意见 3:

“然而，其后的研究结果与此并不完全一致。尽管部分研究者再次证明不同维度的特征数量的增加并不会使容量降低(Fougnie, Asplund, & Marois, 2010; Luria & Vogel, 2011),”这里作者介绍的是 Luria 和 Vogel(2011)的研究结果和 Fougnie 等人(2010)与 Luria 和 Vogel(2011)研究结果的不一致，按照时间来看，称后者为“其后的研究结果”恐怕不妥，直接说存在不一致的研究结果即可。

回应:

感谢主编的意见，原文已修改。详见前言第三段红色字体部分 (P19):

“然而，一些研究结果与此并不完全一致。……”

意见 4:

作者在文中提出 LPC 时比较突兀，认为“发生在位于前额叶皮层周边的晚期正成分 LPC(the late positive component)与工作记忆保持相关，可能反映了前额区对后部脑区的自上而下的控制(Gao et al., 2011; Kusak, Grune, Hagendorf, & Metz, 2000; Li, Li, & Luo, 2006)”，这一理由作为考察 LPC 的论据并不充分，前额区对后脑部的自上而下的控制能说明记忆过程的什么问题，它与本文要考察记忆资源分配问题有什么联系，希望作者能再解释得清楚一点。

回应:

感谢主编的意见。

关于前额叶脑区对后部脑区自上而下的控制问题在很多文献中都有所涉及 (McNab & Klingberg, 2008; Roggeman, Klingberg, Feenstra, Compte, & Almeida, 2013; Voytek & Knight, 2010)。例如，Fuster 和 Alexander 在 1974 年发现前额叶皮质细胞在工作记忆任务中对项目的保持阶段产生持续的激活。另有研究者发现，前额叶的激活可以预测对无关信息的过滤，个体差异的产生也是由前额叶自上而下控制强度决定的 (Druzgal & D'esposito, 2008; Edin et al., 2009)。这些研究都表明，前额叶在工作记忆中起到的注意控制的作用。

我们之所以选取前额区 LPC 作为控制强度的指标是因为，有研究表明前额叶皮层周边的晚期正成分 LPC(the late positive component)与工作记忆保持相关，可能就反映了前额区对后部脑区的自上而下的控制(Gao et al., 2011; Kusak, Grune, Hagendorf, & Metz, 2000; Li, Li, & Luo, 2006)。因此，我们试图通过 LPC 的大小来反映记忆过程中的注意控制大小。

而在本研究中，我们需要考察的对工作记忆资源分配可能产生影响的表征精度也涉及到被试在工作记忆存储过程中自上而下的控制强度的问题。因为精度需求越高则有可能需要被

试投入的控制资源也就越多，控制强度也就越大。

因此，我们一方面试图通过高低精度条件下的 CDA 大小变化来考察记忆资源分配是否会受到表征精度的影响；另一方面，就是我们引入 LPC 的目的，即试图通过高低精度条件下的 LPC 大小差异来考察在高低表征精度在保持阶段是否存在控制资源上的差异，LPC 是否确实和 CDA 所指示的脑活动有所不同。

详见原文前言第六段红色字体部分(P20)。

意见 5:

文章假设的提出，“根据插槽模型的假设，我们推测，如果记忆资源的分配不受特征数量的影响，那么将会观察到由双色块条件诱发的 CDA 的振幅会和单色块条件无显著差异。同时，如果精度需求未会影响记忆资源的分配，那么将观察到高低精度条件间的 CDA 幅值也会没有差异。此外，对 LPC 振幅的考察则能够反映出不同条件间在控制资源的投入上是否有差异，如果双色块部分变化条件下诱发了更多的自上而下的控制，那么该变化条件就会诱发比整体变化条件更强的前额区 LPC。”条理不够清晰，建议重新梳理。此外，为什么根据插槽模型的假设提出文章假设，而不根据灵活资源模型提出假设，作者在前言中并未体现出对插槽模型的支持，希望作者能给出解释。

回应:

感谢主编的意见。

在前言部分我们主要介绍了插槽模型和灵活资源模型关于视觉工作记忆资源分配是否受特征数量和表征精度影响问题的讨论。然而在当前的研究中，这两个模型各有相关证据支持，并没有形成定论。因此，在假设的提出中，我们仅仅从插槽模型单方面来提出假设，确实有失偏颇。因此，修改稿中已将假设部分重新梳理，从两种模型分别提出假设，详见原文前言最后一段红色字体部分（P21）。

“.....我们推测，(1)如果在记忆双色块与单色块时诱发的 CDA 振幅无显著差异，说明视觉工作记忆容量资源的分配不受项目特征数量的影响，支持插槽模型；反之，如果记忆双色块诱发的 CDA 振幅与单色块有显著差异，则说明视觉工作记忆容量受到特征数量的影响，支持灵活资源模型。(2)如果在同样的特征数量下高低精度条件间的 CDA 振幅无显著差异，则说明精度需求不影响视觉工作记忆容量资源的分配，支持插槽模型；反之，如果在同样的特征数量下的高低精度间的 CDA 振幅有显著差异，则说明视觉工作记忆容量受到表征精度的影响，支持灵活资源模型。(3) 如果双色块比单色块诱发了更强的前额区 LPC，则说明

被试在双色块条件下投入了更多的控制资源；同样，如果双色块高精度条件比双色块低精度条件诱发了更强的前额区 LPC，则说明双色块高精度条件下诱发了更多的自下而上的控制。”

意见 6:

作者在 EEG 数据记录时，剔除了 4 个被试的数据，但在行为结果中并没有剔除这部分被试的数据，希望作者能说明原因。前面已有审稿人提出了这个问题，但作者没有回应。

回应:

感谢主编的意见。

首先对我们在之前回复中的疏漏表示歉意。

在进行 EEG 数据分析时，之所以会剔除 4 个被试的脑电数据是因为这 4 个被试的脑电数据伪迹过多，有大量的试次由于振幅超过 $\pm 75\mu\text{V}$ 而被剔除（超过 25%），造成叠加试次数不够，因此这 4 个被试的脑电数据就无法使用。但是在行为结果中，这些被试的实验操控是符合要求的，数据可以正常使用，因此未将这些被试的行为数据剔除。

在心理学研究中常有因为同样原因而行为结果和脑电结果中的使用的被试数是不一致的。例如：

Voss, J. L., & Paller, K. A. (2006). Fluent conceptual processing and explicit memory for faces are electrophysiologically distinct. *The Journal of Neuroscience*, 26(3), 926-933.

意见 7:

文章讨论的最后，“Awh 等人(2007)的研究中就发现，无论存储 4 个项目还是 8 个项目复杂刺激在类别间变化试次中的正确率都与简单刺激相仿，以及在四项阵列中复杂刺激与简单刺激的 CDA 振幅无显著差异。我们似乎可以猜测当存储较多个复杂刺激时（两个以上）可能是存储了每个项目的部分特征。”作者猜测当存储多个复杂刺激时，可能存储了项目的部分特征，这一猜测与实验二中得到的特征刺激的存储单位基于客体，而非基于特征的结果是否有矛盾，请作者进行说明。

回应:

感谢主编的意见。

这里我们所说的存储复杂刺激时可能存储了项目的部分特征，“部分特征”指的是关于项目的整体性特征，而不是表面上所理解的一个个分离的部分。因此，这一猜测并不与实验二中“刺激的存储单位是基于客体”的这一结论相矛盾。

为了避免读者产生误解，我们已将此处进行了修改。详见讨论最后一段（P32）：

“.....我们似乎可以猜测当存储较多个复杂刺激时(两个以上)可能仅是存储了每个项目的类别特征,即这一种类的复杂刺激的普遍特征。这一存储足以区分不同类别的复杂刺激间的差异(比如一个随机多边形和一个汉字),但并不足以区分同一类别内的刺激间的差异(比如两个随机多边形)。”

意见 8:

文中有几处格式问题:(1)“视觉工作记忆(visual working memory, VWM)是对视觉信息进行暂时性存储和操作的系统(Baddeley, 1992; Cowan, 2001; Luck & Vogel, 1997)”,其中Baddeley的字体和其他引用的字体不一致;(2)作者在文中引用时,有时使用中文括号(),有时使用西文括号(),希望作者统一;(3)被试信息的描述,实验一“均通过石原氏色盲测验”,实验二“无色盲色弱(均通过了石原氏色盲测验)”,希望两处的描述统一(4)实验一的结果部分,“结果表明,两种变化幅度间无显著差异, $t(17) = 0.11, p > 0.05$ 。由于传统的假设检验只能推翻而不能证实零假设,, ”逗号使用2次,希望更正。

回应:

感谢主编的意见。

(1)原文中已改正。见前言第一段红色字体部分(P18)。“视觉工作记忆(visual working memory, VWM)是对视觉信息进行暂时性存储和操作的系统(Baddeley, 1992; Cowan, 2001; Luck & Vogel, 1997),”。

(2)已将原文中所有的括号统一为西文括号。

(3)已统一。见实验二 3.1.1 红色字体部分(P28)。“视力或矫正视力正常,均通过石原氏色盲测验。”

(4)多余的逗号已去除(详见 2.2.2, P25)。