

《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：掩蔽刺激对目标识别加工的作用：来自 fNIRS 的证据

作者：杨海波 刘和珺 章鹏 李量

第一轮

审稿人 1 意见：本文运用功能近红外成像技术，研究了不同类型掩蔽刺激对目标识别影响在视知觉相关皮层的神经机制。通过对比字母掩蔽、字母碎片掩蔽和像素掩蔽条件，发现三种条件下的行为学和脑神经响应存在一系列差异，作者认为该结果反映了掩蔽类型影响对目标加工的早期阶段，字母掩蔽与字母碎片掩蔽之间的加工存在一定程度的分离。本研究关注了一个重要的基础科学问题，但研究设计、数据分析等方面存在一定的不足，具体如下：

意见 1：摘要：未对本文的研究背景、研究方法关键细节进行足够充分的介绍。

回应：非常感谢审稿专家的建议，已根据专家建议对摘要部分的相关内容进行了补充与修改。具体如下：

信息掩蔽刺激(如随机字母群)对字母视觉搜索的干扰大于能量掩蔽刺激(如将字母群像素随机化后的散点)，但相应的中枢机理还不清楚。本研究采用记录脑代谢激活模式的功能性近红外光学脑成像技术(fNIRS)，考察年轻成年被试分别在字母掩蔽、字母碎片掩蔽、像素掩蔽条件下判断上、下、左、右四个目标字母是否相同时的大脑皮层氧合血红蛋白浓度的变化。结果显示，依字母、字母碎片、随机散点掩蔽条件顺序，被试的搜索任务成绩显著递增，而顶-枕皮层的激活范围与程度显著递减，表明信息掩蔽较匹配的能量掩蔽对视觉搜索有更大的干扰作用，并在初级和联合视觉皮层引发更大的加工负载，而不同信息掩蔽的差异表现在对目标字母中枢加工的早期阶段。

意见 2：引言：主要篇幅用于介绍研究的大背景，但具体研究假设相关的内容介绍不足，在最后一段引入假设时仅仅报告了两个前人研究结果，建议从这些结果的解释和推导到更深入的讨论，以引出本文的研究假设，目前的版本读起来太单薄；此外，使用近红外作为研究工具的论述也比较弱，仅仅引用一些文献(且未展开)说近红外可以很好的探讨视觉搜索加工过

程是不够的,请举出具体与本研究相关的例子,目前这个实验设计看起来也许 fMRI 更合适?
为什么不用 fMRI?

回应:首先,感谢审稿专家的建设性建议。已根据您的建议修改了问题提出部分,从研究的内在逻辑层面进一步梳理了问题提出部分,并补充了相关研究(详见正文的问题提出部分)。

其次,研究假设的提出部分,我们在全面修改问题提出部分内容的基础上,进一步修改了研究假设的提出,具体如下:

实验操作了掩蔽刺激的类型,分为像素掩蔽、字母碎片掩蔽和字母掩蔽,其中像素掩蔽是指掩蔽刺激由随机像素组成,没有任何语义信息,因此被称为能量掩蔽。字母碎片掩蔽与字母掩蔽均为信息掩蔽,根据 Gao 等人(2017)、杨志刚(2014)等人对信息掩蔽的分类,字母碎片掩蔽条件下,由于碎片与目标字母存在知觉层面的相似性,因此被称为知觉掩蔽;字母掩蔽条件下,因字母包含清晰的语义信息,具有自动加工的特性,与目标竞争高级认知加工资源,被称为认知掩蔽。这三种类型的掩蔽刺激,既有纯粹的无语义的掩蔽,也有知觉水平的掩蔽,还有更高的认知掩蔽,较为全面地包括当前掩蔽研究中的大部分掩蔽类型。根据加工负荷理论,从像素掩蔽、字母碎片掩蔽到字母掩蔽,其需要的加工负荷依次增加。Durantin 等人(2014; 2016)、Herrmann 等人(2016)的认为,行为指标与加工负荷呈负相关,大脑皮层血氧变化与加工负荷存在正相关。结合 Gao (2017)等人和 Rabaglia (2016)等人研究的结果,提出研究假设 1,从像素掩蔽、字母碎片掩蔽到字母掩蔽条件,被试的目标识别准确率呈显著下降趋势。

Mattys 等人(2009)提出,能量掩蔽对目标的干扰发生在视网膜水平,因此不需要太多的认知加工;信息掩蔽发生在认知加工阶段,因此提出研究假设 2,能量掩蔽条件下的视觉皮层激活模式与信息掩蔽条件存下显著差异。另外,Gao 等人(2017)认为,字母碎片掩蔽条件下仅仅保持了碎片的知觉信息,而字母掩蔽条件下的掩蔽刺激得到识别并激活了语义信息,因此提出研究假设 3,字母碎片掩蔽条件的大脑皮层激活模式与字母掩蔽条件下的大脑激活模式存在显著差异。

再次,根据审稿专家的意见,增加了选择使用 fNIRS 的原因。

选择近红外光学脑成像方法,是基于以下几方面的考虑:

(1)已有研究已经证实, fNIRS 已经被广泛用于研究视觉加工时枕叶视觉皮层活动可以很好地揭示视觉加工过程中的大脑皮层激活模式(McIntosh, Shahani, Boulton, & McCulloch, 2010; Ward, Aitchison, Tawse, Simmers, & Shahani, 2015; Wijekumar, Shahani, Simpson, &

McCulloch, 2012; Wijekumar, Shahani, McCulloch, & Simpson, 2012), 可以满足本研究的需要。

(2)与 fMRI 相比, fNIRS 在时间维度上的采样率较高(本研究中的采样率为 11.11 Hz), 在同样的时间段内, 获得更多的认知加工早期阶段脑激活模式。本研究探讨视觉掩蔽对目标识别的早期加工过程, 因此在较短的时间内较高频率的采样, 获得较为精确的脑激活模式就至关重要。从这个角度看, fNIRS 可以较好地实现本研究的目的。

(3)由于当前研究的关注点是大脑的视觉加工皮层, 没有涉及更深层次的脑组织和脑结构。在这种设计要求下, 与 fMRI 相比, fNIRS 是一种便利、高效、可行的工具。另外, fNIRS 运行比较安静, 实验花费比较小, 使用起来也比较方便, 对被试要求比较低, 实验中被试可以以自然的坐姿进行实验, 可以在一个更自然、真实的情景下记录大脑, 具有更高的生态效度(刘宝根, 周兢, 李菲菲, 2011)。

基于上述原因, 本研究选择 fNIRS 作为研究工具, 可以较为理想地实现研究目标。

相关参考文献如下:

- McIntosh, M. A., Shahani, U., Boulton, R. G., & McCulloch, D. L. (2010). Absolute Quantification of Oxygenated Hemoglobin within the Visual Cortex with Functional Near Infrared Spectroscopy (fNIRS). *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, *51*, 4856-4860. doi:10.1167/iovs.09-4940
- Ward, L. M., Aitchison, R. T., Tawse, M., Simmers, A. J., & Shahani, U. (2015). Reduced Haemodynamic Response in the Ageing Visual Cortex Measured by Absolute fNIRS. *PLoS One*, *10*, 1-16. doi:10.1371/journal.pone.0125012
- Wijekumar, S., Shahani, U., Simpson, W. A., & McCulloch, D. L. (2012). Localization of Hemodynamic Responses to Simple Visual Stimulation: An fNIRS Study. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, *53*, 2266-2273. doi:10.1167/iovs.11-8680
- Wijekumar, S., Shahani, U., McCulloch, D. L., & Simpson, W. A. (2012). Neural and Vascular Responses to Fused Binocular Stimuli: A VEP and fNIRS Study. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, *53*(9), 5881-5889. doi:10.1167/iovs.12-10399
- Rowland, S. C., Hartley, D. E. H., & Wiggins, I. M. (2018). Listening in Naturalistic Scenes: What Can Functional Near-Infrared Spectroscopy and Intersubject Correlation Analysis Tell Us About the Underlying Brain Activity? *Trends in Hearing*, *22*. doi:10.1177/2331216518804116
- 刘宝根, 周兢, 李菲菲. (2011). 脑功能成像的新方法——功能性近红外光谱技术(fNIRS). *心理科学*, *34*(4), 943-949.

意见 3: 方法: 细节及规范性需要加强, 比如组块还是 block?(且有错别字'组快'), 试次还是 trial? (且有错别字 trail), 同时, 三种材料条件是每个组块内都随机混合还是按组块随机? 等等。

回应：感谢审稿专家的细心审阅，出现这种问题，是我们的疏忽，我们已经进行了修改，文中已统一使用“组块”代替“block”，使用“试次”代替“trial”。并纠正了错别字。

同时感谢审稿专家的提醒，本研究采用 block 设计，由于 fNIRS 研究方法自身的信噪比与统计功效均较高的特点，因此本研究材料条件是按照组块随机呈现。正文中实验程序的修改如下：

正式实验共有 3 个处理水平，每个处理水平包含 5 个组块，每个组块包含 8 个试次。每两个组块之间呈现 20 秒的静息。一个试次的完整流程如图 3，首先在平面中心呈现一个注视点，此时被试需要把注意集中在注视点上，500 ms 后呈现刺激，呈现时间为 2000 ms，被试在此期间进行按键反应。不同处理条件按照组块进行随机呈现。

意见 4：结果与讨论：虽然本文报告了近红外响应的差异，但因为不同条件下的物理刺激不同且行为学响应已经报告了显著的差异，近红外差异如何理解需要更加谨慎对待。建议开展个体层面的分析查看行为学与近红外响应的个体相关性，基于这个结果再重新开展讨论。

回应：非常感谢审稿专家的建议。我们根据您的建议下，对目标识别正确率与近红外光学脑成像指标(HbO)之间的进行了相关分析。具体的过程与结果现报告如下：

首先根据正文表 3 中各通道与其对应的布鲁德曼分区结果，将位于视觉初级皮层的 5 个通道(ch15、17、20、22、25)以及位于视觉联合皮层的 3 个通道(ch11、27、31)分别作为兴趣区纳入进一步的统计分析。然后，对不同掩蔽类型下 8 个显著激活的通道按照不同兴趣区将 beta 值求取平均。最后，将平均后的 beta 值与各掩蔽条件下被试视觉搜索的目标识别正确率进行相关分析。皮尔逊相关分析结果如下表 4 所示：

表 4 被试目标识别正确率与 fNIRS 数据的相关(n = 20)

| | 通道 | 布鲁德曼分区 | 皮尔逊相关系数 r | | |
|--------|----|----------|-----------|--------|---------|
| | | | 像素掩蔽 | 字母碎片掩蔽 | 字母掩蔽 |
| 视觉皮层 | 15 | V1(BA17) | -0.114 | -0.023 | -0.261 |
| | 17 | V1(BA17) | -0.074 | 0.101 | 0.090 |
| | 20 | V1(BA17) | -0.028 | -0.068 | 0.007 |
| | 22 | V1(BA17) | 0.082 | 0.473* | -0.085 |
| | 25 | V1(BA17) | 0.035 | 0.122 | -0.062 |
| 视觉联合皮层 | 11 | V2(BA18) | 0.001 | 0.245 | -0.011 |
| | 27 | V2(BA18) | 0.011 | 0.021 | -0.222 |
| | 31 | V2(BA18) | -0.081 | 0.124 | -0.478* |

注：*表示 $p < 0.05$ 。

同时在结果分析部分增加了相关结果的描述，具体如下：

从表 4 可以看出，像素掩蔽条件下，无论是视觉初级皮层还是视觉联合皮层，目标识别准确率与 fNIRS 结果之间的相关系数均不显著；字母碎片掩蔽条件下，位于视觉初级皮层区域的通道 22 上的目标识别准确率与 fNIRS 结果之间的相关系数显著， $r = 0.473$ ，其他通道的相关系数不显著；字母掩蔽条件下，视觉联合皮层的通道 31 上的目标识别准确率与 fNIRS 结果之间的相关系数显著， $r = -0.478$ ，其他通道的相关系数不显著。

在讨论部分增加了对相关分析结果的讨论，具体如下：

视觉皮层的血氧变化情况与目标识别正确率之间的相关分析进一步证实了字母碎片掩蔽与字母掩蔽的脑激活模式差异。已有研究表明，虽然视觉初级皮层和视觉联合皮层都涉及到对视觉信息的加工，但它们与不同的认知功能有关，例如，视觉信息的知觉整合加工更多地与视觉初级皮层有关(Kok & de Lange, 2014)，视觉信息的语义加工更多地与视觉联合皮层有关(Bonner et al., 2009)。本研究发现，在字母碎片掩蔽条件下，视觉初级皮层的部分区域激活水平与行为判断结果的相关显著、而视觉联合皮层的二者相关不显著，说明字母碎片掩蔽条件下的掩蔽效果更多地与视觉初级皮层的激活有关；字母掩蔽条件下，视觉联合皮层部分区域的激活水平与行为判断结果的相关显著、而视觉初级皮层的二者相关不显著，说明字母掩蔽条件下的掩蔽效果更多地与视觉联合皮层的激活有关。因此，这进一步说明信息掩蔽中的字母掩蔽和字母碎片掩蔽的掩蔽作用的大脑皮层中枢是不同的。

.....

审稿人 2 意见：该研究采用 fNIRS 技术探讨了掩蔽信息类型影响目标识别的认知和脑机制。结果发现，像素掩蔽、字母碎片掩蔽和字母掩蔽三种条件下目标识别的正确率依次下降，视觉区的血氧激活模式在三种条件之间也存在统计差异。

意见 1：本研究拟解决的问题较为明确，但是采用的实验设计与前人的设计基本相似，比如，前人也采用过能量掩蔽和信息掩蔽的比较，也采用了字母掩蔽和字母碎片掩蔽的比较，但是前人却得出不一致的结论。那么，本研究采用类似的设计，为什么预期能够更好的回答这一问题呢？如果要检验加工阶段的问题，为什么不同时测量前额叶和视觉区呢？

回应：感谢审稿专家的意见。文中的表述可能不够清晰与准确，为此我们在引言部分进行了修改与补充，进一步回答我们进行此项研究的目的。

本研究中，我们重点关注枕叶区域，主要基于以下考虑：本研究拟探讨的是掩蔽类型

在影响视觉加工(目标识别)时的早期加工差异,已有研究证明视觉掩蔽与视觉早期皮层加工是密切相关的(Breitmeyer, 2008),但包含不同信息的掩蔽在此阶段是如何影响个体目标识别、是否在视觉皮层的早期阶段加工就存在不同掩蔽类型间的加工分离,这些还没有统一结论,这是本研究关注的研究目的。

关于审稿专家提出的前额叶脑区的同时测量问题,我们非常感谢专家的建议,我们将在随后的进一步研究中增加前额叶脑区的测量,探讨在具有不同信息的不同类型掩蔽刺激条件下,枕叶、顶枕叶、前额叶等区域之间是如何协同加工。

文中的修改内容如下:

综合分析已有的行为研究与脑成像研究可以看出,能量掩蔽与信息掩蔽的差异已经在行为研究中得到证实,但是还不清楚这种外显行为差异与大脑皮层激活之间的对应关系;另一方面,关于能量掩蔽、不同类型信息掩蔽的大脑皮层激活上是否存在加工模式的差异。基于此,本研究使用功能性近红外光谱脑成像技术(fNIRS)来考察在不同类型掩蔽刺激条件下被试进行目标识别的行为反应与大脑皮层激活的关系。实验操作了掩蔽刺激的类型,分为像素掩蔽、字母碎片掩蔽和字母掩蔽,其中像素掩蔽是指掩蔽刺激由随机像素组成,没有任何语义信息,因此被称为能量掩蔽。字母碎片掩蔽与字母掩蔽均为信息掩蔽,根据 Gao 等人(2017)、杨志刚(2014)等人对信息掩蔽的分类,字母碎片掩蔽条件下,由于碎片与目标字母存在知觉层面的相似性,因此被称为知觉掩蔽;字母掩蔽条件下,因字母包含清晰的语义信息,具有自动加工的特性,与目标竞争高级认知加工资源,被称为认知掩蔽。这三种类型的掩蔽刺激,既有纯粹的无语义的掩蔽,也有知觉水平的掩蔽,还有更高的认知掩蔽,较为全面地包括当前掩蔽研究中的大部分掩蔽类型。通过这种设计,以期探讨不同类型掩蔽刺激的在早期加工阶段是否存在视觉皮层加工的分离和差异。在视觉注意研究中,早期加工阶段的大脑皮层中枢主要是枕叶的视觉初级皮层和视觉联合皮层(Breitmeyer, 2008),因此本研究重点关注枕叶皮层的激活模式。

已有研究表明, fNIRS 已被广泛用于探讨视觉加工时枕叶视觉皮层活动,可以对被试在视觉搜索过程中大脑的响应进行较好的监测(McIntosh, Shahani, Boulton, & McCulloch, 2010; Ward, Aitchison, Tawse, Simmers, & Shahani, 2015; Wijekumar, Shahani, Simpson, & McCulloch, 2012; Wijekumar, Shahani, McCulloch, & Simpson, 2012; Rowland, Hartley, & Wiggins, 2018); 另外与 fMRI 相比, fNIRS 运行比较安静,实验花费比较小,使用起来也比较方便,对被试要求比较低,实验中被试可以以自然的坐姿进行实验,可以在一个更自然、真实的情景下记录大脑,具有更高的生态效度(刘宝根,周兢,李菲菲,2011)。

意见 2: 无论行为结果还是 fNIRS 结果, 均发现了字母和字母碎片掩蔽条件间的差异, 但是为什么没有进一步分析行为与脑的关系? 为什么讨论部分也忽略了脑激活的差异, 认为脑与行为的结果并不一致?

回应: 非常感谢审稿专家的建议。根据您的建议, 对目标识别正确率与近红外光学脑成像指标(HbO)之间的进行了相关分析。对于讨论部分的内容也进行了全面梳理。

增加内容如下:

首先根据正文表 3 中各通道与其对应的布鲁德曼分区结果, 将位于视觉初级皮层的 5 个通道(ch15、17、20、22、25)以及位于视觉联合皮层的 3 个通道(ch11、27、31)分别作为兴趣区纳入进一步的统计分析。然后, 对不同掩蔽类型下 8 个显著激活的通道按照不同兴趣区将 beta 值求取平均。最后, 将平均后的 beta 值与各掩蔽条件下被试视觉搜索的目标识别正确率进行相关分析。皮尔逊相关分析结果如下表 4 所示:

表 4 被试目标识别准确率与 fNIRS 数据的相关(n = 20)

| | 通道 | 布鲁德曼分区 | 皮尔逊相关系数 r | | |
|--------|----|----------|-----------|--------|---------|
| | | | 像素掩蔽 | 字母碎片掩蔽 | 字母掩蔽 |
| 视觉初级皮层 | 15 | V1(BA17) | -0.114 | -0.023 | -0.261 |
| | 17 | V1(BA17) | -0.074 | 0.101 | 0.090 |
| | 20 | V1(BA17) | -0.028 | -0.068 | 0.007 |
| | 22 | V1(BA17) | 0.082 | 0.473* | -0.085 |
| | 25 | V1(BA17) | 0.035 | 0.122 | -0.062 |
| 视觉联合皮层 | 11 | V2(BA18) | 0.001 | 0.245 | -0.011 |
| | 27 | V2(BA18) | 0.011 | 0.021 | -0.222 |
| | 31 | V2(BA18) | -0.081 | 0.124 | -0.478* |

注: *表示 $p < 0.05$ 。

同时在结果分析部分增加了相关结果的描述, 具体如下:

从表 4 可以看出, 像素掩蔽条件下, 无论是视觉初级皮层还是视觉联合皮层, 目标识别准确率与 fNIRS 结果之间的相关系数均不显著; 字母碎片掩蔽条件下, 位于视觉初级皮层区域的通道 22 上的目标识别准确率与 fNIRS 结果之间的相关系数显著, $r=0.473$, 其他通道的相关系数不显著; 字母掩蔽条件下, 视觉联合皮层的通道 31 上的目标识别准确率与 fNIRS 结果之间的相关系数显著, $r=-0.478$, 其他通道的相关系数不显著。

在讨论部分增加了对相关分析结果的讨论, 具体如下:

视觉皮层的血氧变化情况与目标识别正确率之间的相关分析进一步证实了字母碎片掩蔽与字母掩蔽的脑激活模式差异。已有研究表明, 虽然视觉初级皮层和视觉联合皮层都涉

及到对视觉信息的加工，但它们与不同的认知功能有关，例如，视觉信息的知觉整合加工更多地与视觉初级皮层有关(Kok & de Lange, 2014)，视觉信息的语义加工更多地与视觉联合皮层有关(Bonner et al., 2009)。本研究发现，在字母碎片掩蔽条件下，视觉初级皮层的部分区域激活水平与行为判断结果的相关显著、而视觉联合皮层的二者相关不显著，说明字母碎片掩蔽条件下的掩蔽效果更多地与视觉初级皮层的激活有关；字母掩蔽条件下，视觉联合皮层部分区域的激活水平与行为判断结果的相关显著、而视觉初级皮层的二者相关不显著，说明字母掩蔽条件下的掩蔽效果更多地与视觉联合皮层的激活有关。因此，这进一步说明信息掩蔽中的字母掩蔽和字母碎片掩蔽的掩蔽作用的大脑皮层中枢是不同的。

意见 3: 前言，第四页第三段第一句话提到前人研究了时间进程和空间位置，但是前文的综述并未涉及时间进程问题，近红外和核磁技术也无法回答时间进程的问题。

回应: 感谢并同意审稿人所提意见，时间进程问题不是本研究的关注重点，在前言这里下这样的结论确实不太得当。已根据您的建议将不恰当的语句去除，并对部分内容语句重新进行了调整。(详见引言)

调整后的内容如下：

基于上述争论，一些研究使用脑成像技术探讨掩蔽刺激产生掩蔽效应时的神经活动规律，这些研究结果表明，掩蔽后的目标可见度与枕叶视觉皮层的响应变化呈显著相关(Breitmeyer, 2008; Cai et al., 2017; Tsubomi et al., 2009)，也就是说，掩蔽刺激能够影响初级视觉皮层的激活响应。Fahrenfort 等人(2007)的研究以随机任意方向的短线簇为掩蔽刺激，探讨掩蔽刺激对目标识别的影响，结果发现，枕叶区域的激活与视觉掩蔽刺激量存在相关，额顶区对枕叶皮层的激活存在调节作用(Fahrenfort, Scholte, & Lamme, 2007)。Tse 等人(2005)的研究发现，当目标受到掩蔽刺激的影响而很难识别时，枕叶脑区的 BOLD 信号减少；而当掩蔽刺激的掩蔽效应很小、目标很容易识别时，枕叶脑区的 BOLD 信号会显著增加，说明掩蔽刺激的掩蔽效应与枕叶脑区的激活程度成反比(Tse, Martinez-Conde, Schlegel, & Macknik, 2005)。

但是也有研究的结果与之不一致。Durantin 等人(2014)发现，随着掩蔽刺激所产生的掩蔽效应的增加，被试的行为反应绩效下降，视觉皮层的激活水平增高。这与 Tse 等人(2005)的研究结果不一致。对于这种现象，Durantin 等人(2016)从认知加工负荷角度进行了分析和解释。他们认为，随着掩蔽效应的增加，识别目标所需的认知资源增加，表现在大脑皮层激活上就是大脑皮层的激活水平显著提高。也就是说，掩蔽效应越大，大脑皮层的激活水

平越高(Durantín et al., 2016)。随后的研究采用近红外光学脑成像技术,进一步探讨这种不一致的原因,他们的研究发现,行为结果(目标识别正确率)和大脑皮层血氧变化(血氧浓度的相对变化)均与对掩蔽刺激的加工负荷存在相关,其中目标识别正确率与加工负荷呈负相关;而氧合血红蛋白的变化与认知负荷呈正相关(Herrmann, Neueder, Troeller, & Schulz, 2016)。上述研究结果的不一致的原因在于掩蔽刺激与目标刺激的差异导致,对已有研究进行对比分析发现,在掩蔽刺激选择方面,没有很好地区分和操作能量掩蔽和信息掩蔽,已有研究大多使用的是低信息量水平的材料,比如隐形驻波(Tse et al., 2005)、随机短线簇(Fahrenfort et al., 2007)等,只有较少的研究涉及高信息量水平的掩蔽材料(Durantín et al., 2016)。另外,即使是信息掩蔽,也没有很好地区分和操作掩蔽刺激信息含量的大小,从而导致结果出现差异。

意见 4: 前言第五页第一段最后一句,激活模式和激活水平分别指什么?

回应: 感谢审稿专家的建议。文中的表述确实有些不清楚,已做了语句以及表述上的修改。

我们在这里的用词主要参考了国内外期刊的报告方式(Abrams et al., 2011; Liu et al., 2017)。其中,激活模式指被试在执行某项认知任务时,大脑的功能活动模式,即有哪些脑区参与并与该任务相关(空间模式)。激活水平主要是指大脑某些脑区在不同任务态下其血氧浓度的响应强度(特定区域的激活幅值)。

相关参考文献如下:

- Abrams, D. A., Bhatara, A., Ryali, S., Balaban, E., Levitin, D. J., & Menon, V. (2011). Decoding Temporal Structure in Music and Speech Relies on Shared Brain Resources but Elicits Different Fine-Scale Spatial Patterns. *Cerebral Cortex*, 21(7), 1507-1518. doi:10.1093/cercor/bhq198
- Liu, Y., Piazza, E. A., Simony, E., Shewokis, P. A., Onaral, B., Hasson, U., & Ayaz, H. (2017). Measuring speaker-listener neural coupling with functional near infrared spectroscopy. *Scientific Reports*, 7. doi:10.1038/srep43293

意见 5: 数据分析部分,应报告因头动等伪迹而被去除的数据量和标准。

回应: 感谢审稿人的意见。本研究共做了被试 23 人,其中 3 人的数据因伪迹被剔除。剔除过程和剔除标准如下:本研究基于一般线性模型(GLM)的 NIRS_SPM 这个相对成熟的软件来对 fNIRS 的原始数据进行预处理。这种分析可以利用回归模型来控制一些外源性因素(比如说漂移、动作或者心跳等)对 fNIRS 数据的影响,同时可以对原始数据进行滤波以去除伪迹的干扰。

对 fNIRS 数据预处理方法如下：首先对被试数据采用 Hemodynamic Response Function(简称 HRF)去除频率较高的噪音，如仪器产生的随机噪声以及心率/呼吸等引起的生理噪声。再用 Wavelet-MDL 除低频振荡噪声，去除全局漂移趋势。

基于此，本研究采用基于一般线性模型(GLM)的 NIRS_SPM 这个相对成熟的软件来对 fNIRS 的原始数据进行预处理，具体使用采用小波分析、低通滤波、去漂移等方法，以排除动作和生理伪迹(如心跳)对 NIRS 数据的影响。在完成上述操作的过程中，共剔除 3 个伪迹过多的被试数据。

相关参考文献如下：

- Ye, J., Tak, S., Jang, K., Jung, J., & Jang, J. (2009). NIRS-SPM: Statistical parametric mapping for near-infrared spectroscopy. *Neuroimage*, 44, 428-447. doi:10.1016/j.neuroimage.2008.08.036
- Jang, K. E., Tak, S., Jung, J., Jang, J., Jeong, Y., & Ye, J. C. (2009). Wavelet minimum description length detrending for near-infrared spectroscopy. *Journal of Biomedical Optics*, 14(3), 034004.
- Tak, S., Jang, J., Lee, K., & Ye, J. C. (2010). Quantification of cmro2 without hypercapnia using simultaneous near-infrared spectroscopy and fmri measurements. *Physics in medicine and biology*, 55(11). doi:10.1088/0031-9155/55/11/017
- Tak, S., Yoon, S. J., Jang, J., Yoo, K., Jeong, Y., & Ye, J. C. (2011). Quantitative analysis of hemodynamic and metabolic changes in subcortical vascular dementia using simultaneous near-infrared spectroscopy and fmri measurements. *Neuroimage*, 55(1), 176-184.
- Beurskens et al., (2014). Age-related changes in prefrontal activity during walking in dual-task situations: a fNIRS study. *International Journal of Psychophysiology*, 92(3), 122-128.
- Ding, X. P., Fu, G., & Lee, K. (2014). Neural correlates of own- and other face recognition in children: a functional near-infrared spectroscopy study. *Neuroimage*, 85(2), 335-344.
- Zhu, H., Li, J., Fan, Y., Li, X., Huang, D., & He, S. (2015). Atypical prefrontal cortical responses to joint/non-joint attention in children with autism spectrum disorder (asd): a functional near-infrared spectroscopy study. *Biomedical Optics Express*, 6(3), 690.

意见 6：数据分析部分，应报告滤波的方法和阈值。

回应：感谢审稿专家的意见。文中数据分析部分没有表述完整，现已对其进行了补充与修改。

本研究分别通过低通滤波器和高通滤波器来实现噪声的滤除。具体来说，使用标准血液动力学函数(Hemodynamic response function，简称为 HRF)进行低通滤波，可以去除仪器产生的随机噪声以及心率/呼吸等引起的生理噪声；基于 wavelet_MDL 的高通滤波则可以去除低频振荡噪声，去除全局漂移趋势。

之前文中数据分析部分没有表述清楚，现已对其进行了补充。考虑到运动伪迹的频率

成分较为复杂，无法轻易通过设置截止频率的方式进行去除，本研究采用 wavelet_MDL 方法进行滤波的同时还采用 HRF 进行低通滤波(Jang et al., 2009)。通过仔细阅读 NIRS_SPM 软件包使用手册以及相关文献(Ye, Tak, Jang, Jung, & Jang, 2009)并结合本研究的实验设计，最终采用小波最小描述长度(Wavelet_MDL) (Jang et al., 2009)去趋势算法对头动伪迹进行去除。具体来说，利用小波变换将近红外测量时间序列数据分解为不同尺度下的全局趋势、血液动力学信号和不相关噪声分量。同时，为了防止对全局趋势估计的过分拟合或拟合不足，采用最小描述长度(MDL)原则。Wavelet_MDL 算法去趋势，不仅可以提高信噪比，相比于传统的滤波方法还可以对目标皮层提供更准确、具体的定位(Jang et al., 2009)。

为了更好的回答审稿专家的问题，我们翻阅了开发 NIRS_SPM 软件包的 Tak 等人关于 Wavelet_MDL 方法的相关文献。由于血液动力学信号的频率极低，有时会与低频全局趋势混淆，此时传统的滤波方法无法更好的区分二者，Wavelet_MDL 方法则可以对未知偏差给出更准确的估计。此外，由于小波变换可以提供“时间-频率”窗口，能更好的分析局部化信息，针对突然出现的锐利高峰的伪迹噪声有较好的滤除效果。Tak 等人研发的 NIRS_SPM 软件将相关算法内置，我们在进行 GUI 界面的选择的同时，软件自行进行了处理，对于不同实验中近红外数据的测量，在不同尺度上小波系数的数量是不同的，且针对不同的数据，其阈值是变化的。

为此，我们又将使用 NIRS_SPM 工具且选择 Wavelet_MDL 算法去趋势的相关文献进行查阅与研读。Beurskens 等人证明了 Wavelet_MDL 对 fNIRS 数据去噪的有效性(Beurskens et al., 2014)。我们参照他们的表达方式对本文数据分析部分进行了修改。(详见方法 2.7 数据分析部分)

我们进一步阐述对选用 HRF 进行滤波的原因与细节。如果在近红外数据中没有进行时间自相关校正，可能会夸大后续统计推断计算的显著性水平(Jang et al., 2009)。为此，我们选择了 Precoloring method (Worsley and Friston, 1995)，其核函数可采用高斯滤波器或 HRF(血液动力学响应函数)低通滤波器。本文使用的 HRF 滤波器是近红外光谱数据的首选滤波器，因为 HRF 的传递函数是基于神经元信号建模的频率(Ye, Tak, Jang, Jung, & Jang, 2009)、可去除由仪器产生的随机噪声以及心率/呼吸等引起的生理噪声。这一过程也是在 NIRS_SPM 软件中实现。

此外，我们也同样参考了使用 NIRS_SPM 工具且选择 HRF 滤波的相关文献，我们参照他们的表达方式对本文数据分析部分进行了修改。(详见方法 2.7 数据分析部分)

相关参考文献如下：

- Worsley, K.J., Friston, K.J. (1995). Analysis of fMRI time-series revisited — again. *Neuroimage*, 2(3), 173–181.
- Beurskens et al., (2014). Age-related changes in prefrontal activity during walking in dual-task situations: a fNIRS study. *International Journal of Psychophysiology*, 92(3), 122–128.
- Ding, X. P., Fu, G., & Lee, K. (2014). Neural correlates of own- and other face recognition in children: a functional near-infrared spectroscopy study. *Neuroimage*, 85(2), 335-344.
- Zhu, H., Li, J., Fan, Y., Li, X., Huang, D., & He, S. (2015). Atypical prefrontal cortical responses to joint/non-joint attention in children with autism spectrum disorder (asd): a functional near-infrared spectroscopy study. *Biomedical Optics Express*, 6(3), 690.
-

第二轮

审稿人 1 意见： 作者对文稿进行了大幅度的调整，内容可读性以及结果丰富性有显著提升，但研究背景和研究问题的提出还需要提升，具体问题如下：

意见 1： 关键概念表述不够清晰准确，开篇提到了视觉刺激的信息掩蔽和能量掩蔽两种不同机制假说，而本文的研究构建了能量、知觉、认知三个层次的掩蔽，为什么构建新的层次体系，以及新层次架构的必要性和意义如何，缺乏相应的解释说明。

回应： 感谢审稿专家的建议。针对文中有关逻辑的表述有些不清楚的地方，我们已做了语句以及表述上的修正。本文首先介绍了视觉刺激带来的掩蔽效应由于刺激类型的不同进而存在机制上的不同，且已有研究对这种差异在机制上的分类主要是信息掩蔽与能量掩蔽双机制系统。其中，对造成能量掩蔽的视觉刺激研究已较为一致，而有关信息掩蔽的研究则随着研究者对掩蔽刺激的进一步细化而更加复杂化。知觉层次的掩蔽和语义层次上的掩蔽都属于信息掩蔽，仅是在加工层次上有所区别。通过对有关信息掩蔽的文章进行分析与探讨发现，已有行为结果可以表明，不同掩蔽刺激（例如，字母和字母碎片）所引发的信息掩蔽效应存在差异。信息掩蔽和能量掩蔽之间的差异在不同研究中都有一致的报告，而本研究首次在已有研究基础上进一步验证与考察相应于不同掩蔽刺激类型的大脑皮层激活的异同。即已有的研究工作仅在行为上考察不同掩蔽刺激之间的差别，并没有考察外显行为的差异与大脑皮层激活差异之间的对应关系。因而，本研究结合了近红外光学脑成像研究方法，分析了不同掩蔽刺激所导致的掩蔽效应与大脑皮层激活是否存在联系。其中包括考察较低层的字母碎片的信息掩蔽与较高层的完整字母信息掩蔽之间在识别与脑成像两个方面的差别。因此，本文章将信息掩蔽进一步区分，只是对已有分类的进一步细化，旨在进一步区分探讨信息掩蔽的作用机制。

意见 2: 虽然作者仅在回复中提到而没有在正文中体现, 还是需要纠正: fNIRS 的时间分辨率并不比 fMRI 高。同时, 正文中提到的 fNIRS 实验花费低和使用方便两点, 对本研究来说是没有意义的。

回应: 感谢审稿专家的意见。我们已根据专家建议对引言部分的相关内容进行了修改。具体如下:

已有研究表明, fNIRS 已被广泛用于探讨视觉加工时枕叶视觉皮层活动, 可以对被试在视觉搜索过程中大脑皮层的血氧代谢活动响应进行较好的监测(McIntoshShahani, Boulton, & McCulloch, 2010; Ward, Aitchison, Tawse, Simmers, & Shahani, 2015; Wijekumar, Shahani, Simpson, & McCulloch, 2012; Wijekumar, Shahani, McCulloch, & Simpson, 2012; Rowland, Hartley, & Wiggins, 2018)。另外与其他脑成像方法相比, 在 fNIRS 实验中, 被试可以以自然的姿势进行实验, 即可以在一个更自然和低限制的条件下记录大脑皮层的血氧代谢活动, 使得在采用 fNIRS 方法的研究具有更高的生态效度(刘宝根, 周兢, 李菲菲, 2011)。

意见 3: 本文的研究假设表述立足在实验操纵条件上, 没有回归本质科学问题, 请从掩蔽机制(信息 vs. 能量)的角度来展开。

回应: 根据这项建议, 我们对研究假设部分的相关内容进行了修改。具体如下:

结合 Gao(2017)等人和 Rabaglia(2016)等人研究的结果, 我们提出如下三项研究假设:

(1) 从能量掩蔽到信息掩蔽的转变, 形成认知加工负载的提高, 进而造成被试对目标识别的准确率呈显著下降的趋势。这一假设符合 Mattys 等人(2009)的研究发现, 即能量掩蔽对目标的干扰发生在视网膜水平, 因此不需要太多的中枢加工负载, 而信息掩蔽发生在认知加工阶段, 需要占用中枢加工负载。(2) 由于中枢加工负载的不同, 能量掩蔽条件下的视觉皮层激活模式与信息掩蔽条件下的视觉皮层激活模式存在显著差异。Gao 等人(2017)认为, 字母碎片掩蔽条件下仅仅保持了碎片的知觉信息, 而字母掩蔽条件下的掩蔽刺激得到识别并激活了语义信息。(3) 受到刺激类型与目标刺激关系的影响, 信息掩蔽又可以进一步分为知觉信息掩蔽(如字母碎片掩蔽)和认知信息掩蔽(如字母掩蔽), 而且在这两种掩蔽机制下的大脑激活模式存在显著差异。

意见 4: fNIRS 通道的定位是基于每个个体分别开展还是个体的平均? 准确性如何? 在分区解释时需要谨慎。

回应: 感谢审稿专家的提醒。本研究针对每个个体均求取了 3D 定位的数据。文中数据处理

部分采用的是所有个体定位数据的均值。这种数据处理方式的可靠性和有效性已由相关的前人研究工作所确认(白学军, 张琪涵, 章鹏等, 2016)。

白学军, 张琪涵, 章鹏, 周菘, 刘颖, 宋星, et al. (2016). 基于 fNIRS 的运动执行与运动想象脑激活模式比较. 心理学报, 48(5), 495-508.

意见 5: 表 4 的通道排列顺序与视觉皮层分区不匹配, 且初级和联合皮层的通道分区边界在表中不明确。

回应: 根据审稿专家的意见, 我们已经进行了相应的修改。已根据专家建议, 使结果表中的信息更加全面, 以使读者能更加明确初级皮层和联合皮层的分区依据。

.....

审稿人 2 意见: 该研究采用 fNIRS 技术探讨了掩蔽信息类型影响目标识别的认知和脑机制。结果发现, 像素掩蔽、字母碎片掩蔽和字母掩蔽三种条件下目标识别的正确率依次下降, 视觉区的血氧激活模式在三种条件之间也存在统计差异。

意见 1: 本研究拟解决的问题较为明确, 但是采用的实验设计与前人的设计基本相似, 比如, 前人也采用过能量掩蔽和信息掩蔽的比较, 也采用了字母掩蔽和字母碎片掩蔽的比较, 但是前人却得出不一致的结论。那么, 本研究采用类似的设计, 为什么预期能够更好的回答这一问题呢? 如果要检验加工阶段的问题, 为什么不同时测量前额叶和视觉区呢?

回应: 感谢审稿专家的意见。稿件中的表述可能不够清晰与准确, 为此我们在问题提出部分进行了修改与补充, 进一步明确了研究目的。

本研究重点关注枕叶区域, 主要原因是, 本研究主要探讨不同类型掩蔽刺激影响目标识别的早期加工差异, 已有研究证明视觉掩蔽与视觉早期皮层加工是密切相关的 (Breitmeyer, 2008), 但关于不同类型掩蔽刺激在此阶段是如何影响个体目标识别、是否在视觉皮层的早期阶段加工就存在不同掩蔽类型间的加工分离, 这些还没有统一结论, 这是本研究关注的研究目的。

关于审稿专家提出的前额叶脑区的同时测量问题, 我们非常感谢专家的建议, 我们将在随后的进一步研究中增加前额叶脑区的测量, 探讨在具有不同信息的不同类型掩蔽刺激条件下, 枕叶、顶枕叶、前额叶等区域之间是如何协同加工。这涉及到研究关注点的变化, 我们在以后的研究中探讨此问题。

稿件中修改后的内容如下：

到目前为止，相应于在视觉搜索任务中，不同掩蔽类型刺激的特异性神经机制还没有得到一致性结论。综合分析已有的行为研究与脑成像研究可以看出，能量掩蔽与信息掩蔽的差异已经在行为研究中得到证实，但是还不清楚这种外显行为差异与大脑视觉皮层激活之间的对应关系；另一方面，行为研究对不同类型刺激导致信息掩蔽的探讨存在争议，尤其也没有得到大脑皮层激活机制的证据。基于此，本研究使用功能性近红外光谱脑成像技术(fNIRS)来考察在不同类型掩蔽刺激条件下被试进行目标识别的行为反应与大脑视觉皮层激活的关系，旨在对视觉搜索任务的行为反应进行考察的同时，还考察不同掩蔽类型刺激大脑视觉皮层激活的神经机制，以此探讨不同掩蔽类型刺激的大脑视觉皮层激活是否具有特异性。实验操作了掩蔽刺激的类型，分为像素掩蔽、字母碎片掩蔽和字母掩蔽，其中像素掩蔽是指掩蔽刺激由随机像素组成，没有任何语义信息，因此被称为能量掩蔽。字母碎片掩蔽与字母掩蔽均为信息掩蔽，根据 Gao 等人(2017)、杨志刚(2014)等人对信息掩蔽的分类，字母碎片掩蔽条件下，由于碎片与目标字母存在知觉层面的相似性，因此被称为知觉掩蔽；字母掩蔽条件下，因字母包含清晰的语义信息，具有自动加工的特性，与目标竞争高级认知加工资源，被称为认知掩蔽。这三种类型的掩蔽刺激，既有纯粹的无语义的掩蔽，也有知觉水平的掩蔽，还有更高的认知掩蔽，较为全面地包括当前掩蔽研究中的大部分掩蔽类型。通过这种设计，以期探讨不同类型掩蔽刺激的在早期加工阶段是否存在视觉皮层加工的分离和差异。在视觉注意研究中，早期加工阶段的大脑皮层中枢主要是枕叶的视觉初级皮层和视觉联合皮层(Breitmeyer, 2008)，因此本研究重点关注枕叶皮层的激活模式。

已有研究表明，fNIRS 已被广泛用于探讨视觉加工时枕叶视觉皮层活动，可以对被试在视觉搜索过程中大脑皮层的血氧代谢活动响应进行较好的监测(McIntoshShahani, Boulton, & McCulloch, 2010; Ward, Aitchison, Tawse, Simmers, & Shahani, 2015; Wijekumar, Shahani, Simpson, & McCulloch, 2012; Wijekumar, Shahani, McCulloch, & Simpson, 2012; Rowland, Hartley, & Wiggins, 2018)。另外与其他脑成像方法相比，在 fNIRS 实验中，被试可以以自然的姿势进行实验，即可以在一个更自然和低限制的条件下记录大脑皮层的血氧代谢活动，使得在采用 fNIRS 方法的研究具有更高的生态效度(刘宝根, 周兢, 李菲菲, 2011)。

意见 2: 无论行为结果还是 fNIRS 结果，均发现了字母和字母碎片掩蔽条件间的差异，但是为什么没有进一步分析行为与脑的关系？为什么讨论部分也忽略了脑激活的差异，认为脑与

行为的结果并不一致？

回应：非常感谢审稿专家的建议。根据您的建议，对目标识别正确率与近红外光学脑成像指标(HbO)之间的进行了相关分析。对于讨论部分的内容也进行了全面梳理。

增加内容如下：

首先根据正文表 3 中各通道与其对应的布鲁德曼分区结果，将位于视觉初级皮层的 5 个通道(ch15、17、20、22、25)以及位于视觉联合皮层的 3 个通道(ch11、27、31)分别作为兴趣区纳入进一步的统计分析。然后，对不同掩蔽类型下 8 个显著激活的通道按照不同兴趣区将 beta 值求取平均。最后，将平均后的 beta 值与各掩蔽条件下被试视觉搜索的目标识别正确率进行相关分析。皮尔逊相关分析结果如下表 4 所示：

表 4 被试目标识别准确率与 fNIRS 数据的相关(n = 20)

| 视觉皮层 | 通道 | 皮尔逊相关系数 r | | |
|--------|----|-----------|--------|---------|
| | | 像素掩蔽 | 字母碎片掩蔽 | 字母掩蔽 |
| 初级视觉皮层 | 11 | 0.001 | 0.245 | -0.011 |
| | 15 | -0.114 | -0.023 | -0.261 |
| | 17 | -0.074 | 0.101 | 0.090 |
| | 20 | -0.028 | -0.068 | 0.007 |
| | 22 | 0.082 | 0.473* | -0.085 |
| 视觉联合皮层 | 25 | 0.035 | 0.122 | -0.062 |
| | 27 | 0.011 | 0.021 | -0.222 |
| | 31 | -0.081 | 0.124 | -0.478* |

注：*表示 $p < 0.05$ 。

同时在结果分析部分增加了相关结果的描述，具体如下：

从表 4 可以看出，像素掩蔽条件下，无论是视觉初级皮层还是视觉联合皮层，目标识别准确率与 fNIRS 结果之间的相关系数均不显著；字母碎片掩蔽条件下，位于视觉初级皮层区域的通道 22 上的目标识别准确率与 fNIRS 结果之间的相关系数显著， $r = 0.473$ ，其他通道的相关系数不显著；字母掩蔽条件下，视觉联合皮层的通道 31 上的目标识别准确率与 fNIRS 结果之间的相关系数显著， $r = -0.478$ ，其他通道的相关系数不显著。

在讨论部分增加了对相关分析结果的讨论，具体如下：

视觉皮层的血氧变化情况与目标识别正确率之间的相关分析进一步证实了字母碎片掩蔽与字母掩蔽的脑激活模式差异。已有研究表明，虽然视觉初级皮层和视觉联合皮层都涉及到对视觉信息的加工，但它们与不同的认知功能有关，例如，视觉信息的知觉整合加工更多地与视觉初级皮层有关(Kok & de Lange, 2014)，视觉信息的语义加工更多地与视觉联

合皮层有关(Bonner et al., 2009)。本研究发现,在字母碎片掩蔽条件下,视觉初级皮层的部分区域激活水平与行为判断结果的相关显著、而视觉联合皮层的二者相关不显著,说明字母碎片掩蔽条件下的掩蔽效果更多地与视觉初级皮层的激活有关;字母掩蔽条件下,视觉联合皮层部分区域的激活水平与行为判断结果的相关显著、而视觉初级皮层的二者相关不显著,说明字母掩蔽条件下的掩蔽效果更多地与视觉联合皮层的激活有关。因此,这进一步说明信息掩蔽中的字母掩蔽和字母碎片掩蔽的掩蔽作用的大脑皮层中枢是不同的。

意见 3: 前言,第四页第三段第一句话提到前人研究了时间进程和空间位置,但是前文的综述并未涉及时间进程问题,近红外和核磁技术也无法回答时间进程的问题。

回应: 感谢并同意审稿人所提意见,时间进程问题不是本研究的关注重点,在前言这里下这样的结论确实不太得当。已根据您的建议将不恰当的语句去除,并对部分内容语句重新进行了调整。

修改后的内容如下:

基于上述争论,一些研究使用脑成像技术探讨掩蔽刺激产生掩蔽效应时的神经活动规律,这些研究结果表明,掩蔽后的目标可见度与枕叶视觉皮层的响应变化呈显著相关(Breitmeyer, 2008; Cai et al., 2017; Tsubomi et al., 2009),也就是说,掩蔽刺激能够影响初级视觉皮层的激活响应。Fahrenfort 等人(2007)以有特定短线簇纹理特征的方块图形为目标刺激,以随机任意方向的短线簇为掩蔽刺激,探讨掩蔽刺激对目标刺激识别的掩蔽影响的机制。结果发现,掩蔽所作用的脑区为在刺激呈现后 109~141 毫秒被激活的枕叶区域,由于掩蔽刺激信号干扰了额顶区对该枕叶皮层的再进入加工式(reentrant processing)的反馈调节作用,进而造成了对目标信号知觉的掩蔽。

但是也有研究的结果与之不一致。Durantin 等人(2014)发现,随着掩蔽刺激所产生的掩蔽效应的增加,被试的行为反应绩效下降,视觉皮层的激活水平增高。这与 Tse 等人(2005)的研究结果不一致。对于这种现象,Durantin 等人(2016)从认知加工负荷角度进行了分析和解释。他们认为,随着掩蔽效应的增加,识别目标所需的认知资源增加,表现在大脑皮层激活上就是大脑皮层的激活水平显著提高。也就是说,掩蔽效应越大,大脑皮层的激活水平越高(Durantin et al., 2016)。同时,Herrmann(2016)的研究采用近红外光学脑成像技术探讨上述不一致的原因,他们的研究发现,行为结果(目标识别正确率)和大脑皮层血氧变化(血氧浓度的相对变化)均与对掩蔽刺激的加工负荷存在相关,其中目标识别正确率与加工负荷呈负相关;而氧合血红蛋白的变化与认知负荷呈正相关(Herrmann, Neueder, Troeller, &

Schulz, 2016)。上述研究结果的不一致的原因在于掩蔽刺激与目标刺激的差异导致，对已有研究进行对比分析发现，在掩蔽刺激选择方面，没有很好地区分和操作能量掩蔽和信息掩蔽，已有研究大多使用的是低信息量水平的材料，比如隐形驻波(Tse et al., 2005)、随机短线簇(Fahrenfort et al., 2007)等，只有较少的研究涉及高信息量水平的掩蔽材料(Durantin et al., 2016)。另外，即使是信息掩蔽，也没有很好地区分和操作掩蔽刺激信息含量的大小，从而导致结果出现差异。

意见 4: 前言第五页第一段最后一句，激活模式和激活水平分别指什么？

回应: 感谢审稿专家的建议。文中的表述确实有些不清楚，已做了语句以及表述上的修改。

我们在这里的用词主要参考了国内外期刊的报告方式(Abrams et al., 2011; Liu et al., 2017)。其中，激活模式指被试在执行某项认知任务时，大脑的功能活动模式，即有哪些脑区参与并与该任务相关(空间模式)。激活水平主要是指大脑某些脑区在不同任务态下其血氧浓度的响应强度(特定区域的激活幅值)。

相关参考文献如下：

Abrams, D. A., Bhatara, A., Ryali, S., Balaban, E., Levitin, D. J., & Menon, V. (2011). Decoding Temporal Structure in Music and Speech Relies on Shared Brain Resources but Elicits Different Fine-Scale Spatial Patterns. *Cerebral Cortex*, 21(7), 1507-1518. doi:10.1093/cercor/bhq198

Liu, Y., Piazza, E. A., Simony, E., Shewokis, P. A., Onaral, B., Hasson, U., & Ayaz, H. (2017). Measuring speaker-listener neural coupling with functional near infrared spectroscopy. *Scientific Reports*, 7. doi:10.1038/srep43293

意见 5: 数据分析部分，应报告因头动等伪迹而被去除的数据量和标准。

回应: 感谢审稿人的意见。本研究共做了被试 23 人，其中 3 人的数据因伪迹被剔除。剔除过程和剔除标准如下：本研究基于一般线性模型(GLM)的 NIRS_SPM 这个相对成熟的软件来对 fNIRS 的原始数据进行预处理。这种分析可以利用回归模型来控制一些外源性因素(比如说漂移、动作或者心跳等)对 fNIRS 数据的影响，同时可以对原始数据进行滤波以去除伪迹的干扰。

对 fNIRS 数据预处理方法如下：首先对被试数据采用 Hemodynamic Response Function(简称 HRF)去除频率较高的噪音，如仪器产生的随机噪声以及心率/呼吸等引起的

生理噪声。再用 Wavelet-MDL 除低频振荡噪声，去除全局漂移趋势。

基于此，本研究采用基于一般线性模型(GLM)的 NIRS_SPM 这个相对成熟的软件来对 fNIRS 的原始数据进行预处理，具体使用采用小波分析、低通滤波、去漂移等方法，以排除动作和生理伪迹(如心跳)对 NIRS 数据的影响。在完成上述操作的过程中，共剔除 3 个伪迹过多的被试数据。

相关参考文献如下：

- Ye, J., Tak, S., Jang, K., Jung, J., & Jang, J. (2009). NIRS-SPM: Statistical parametric mapping for near-infrared spectroscopy. *Neuroimage*, *44*, 428-447. doi:10.1016/j.neuroimage.2008.08.036
- Jang, K. E., Tak, S., Jung, J., Jang, J., Jeong, Y., & Ye, J. C. (2009). Wavelet minimum description length detrending for near-infrared spectroscopy. *Journal of Biomedical Optics*, *14*(3), 034004.
- Tak, S., Jang, J., Lee, K., & Ye, J. C. (2010). Quantification of cmro2 without hypercapnia using simultaneous near-infrared spectroscopy and fmri measurements. *Physics in medicine and biology*, *55*(11). doi:10.1088/0031-9155/55/11/017
- Tak, S., Yoon, S. J., Jang, J., Yoo, K., Jeong, Y., & Ye, J. C. (2011). Quantitative analysis of hemodynamic and metabolic changes in subcortical vascular dementia using simultaneous near-infrared spectroscopy and fmri measurements. *Neuroimage*, *55*(1), 176-184.
- Beurskens et al., (2014). Age-related changes in prefrontal activity during walking in dual-task situations: a fNIRS study. *International Journal of Psychophysiology*, *92*(3), 122-128.
- Ding, X. P., Fu, G., & Lee, K. (2014). Neural correlates of own- and other face recognition in children: a functional near-infrared spectroscopy study. *Neuroimage*, *85*(2), 335-344.
- Zhu, H., Li, J., Fan, Y., Li, X., Huang, D., & He, S. (2015). Atypical prefrontal cortical responses to joint/non-joint attention in children with autism spectrum disorder (asd): a functional near-infrared spectroscopy study. *Biomedical Optics Express*, *6*(3), 690.

意见 6: 数据分析部分，应报告滤波的方法和阈值。

回应: 感谢审稿专家的意见。文中数据分析部分没有表述完整，现已对其进行了补充与修改。

本研究分别通过低通滤波器和高通滤波器来实现噪声的滤除。具体来说，使用标准血液动力学函数(Hemodynamic response function, 简称为 HRF)进行低通滤波，可以去除仪器产生的随机噪声以及心率/呼吸等引起的生理噪声；基于 wavelet_MDL 的高通滤高通滤波则可以去除低频振荡噪声，去除全局漂移趋势。

之前文中数据分析部分没有表述清楚，现已对其进行了补充。考虑到运动伪迹的频率成分较为复杂，无法轻易通过设置截止频率的方式进行去除，本研究采用 wavelet_MDL 方法进行滤波的同时还采用 HRF 进行低通滤波(Jang et al., 2009)。通过仔细阅读 NIRS_SPM 软

件包使用手册以及相关文献(Ye, Tak, Jang, Jung, & Jang, 2009)并结合本研究的实验设计, 最终采用小波最小描述长度(Wavelet_MDL) (Jang et al., 2009)去趋势算法对头动伪迹进行去除。具体来说, 利用小波变换将近红外测量时间序列数据分解为不同尺度下的全局趋势、血液动力学信号和不相关噪声分量。同时, 为了防止对全局趋势估计的过分拟合或拟合不足, 采用最小描述长度(MDL)原则。Wavelet_MDL 算法去趋势, 不仅可以提高信噪比, 相比于传统的滤波方法还可以对目标皮层提供更准确、具体的定位(Jang et al., 2009)。

为了更好的回答审稿专家的问题, 我们翻阅了开发 NIRS_SPM 软件包的 Tak 等人关于 Wavelet_MDL 方法的相关文献。由于血液动力学信号的频率极低, 有时会与低频全局趋势混淆, 此时传统的滤波方法无法更好的区分二者, Wavelet_MDL 方法则可以对未知偏差给出更准确的估计。此外, 由于小波变换可以提供“时间-频率”窗口, 能更好的分析局部化信息, 针对突然出现的锐利高峰的伪迹噪声有较好的滤除效果。Tak 等人研发的 NIRS_SPM 软件将相关算法内置, 我们在进行 GUI 界面的选择的同时, 软件自行进行了处理, 对于不同实验中近红外数据的测量, 在不同尺度上小波系数的数量是不同的, 且针对不同的数据, 其阈值是变化的。

为此, 我们又将使用 NIRS_SPM 工具且选择 Wavelet_MDL 算法去趋势的相关文献进行查阅与研读。Beurskens 等人证明了 Wavelet_MDL 对 fNIRS 数据去噪的有效性(Beurskens et al., 2014)。我们参照他们的表达方式对本文数据分析部分进行了修改。(详见方法 2.7 数据分析部分)

我们进一步阐述对选用 HRF 进行滤波的原因与细节。如果在近红外数据中没有进行时间自相关校正, 可能会夸大后续统计推断计算的显著性水平(Jang et al., 2009)。为此, 我们选择了 Precoloring method (Worsley and Friston, 1995), 其核函数可采用高斯滤波器或 HRF(血液动力学响应函数)低通滤波器。本文使用的 HRF 滤波器是近红外光谱数据的首选滤波器, 因为 HRF 的传递函数是基于神经元信号建模的频率(Ye, Tak, Jang, Jung, & Jang, 2009)、可去除由仪器产生的随机噪声以及心率/呼吸等引起的生理噪声。这一过程也是在 NIRS_SPM 软件中实现。

此外, 我们也同样参考了使用 NIRS_SPM 工具且选择 HRF 滤波的相关文献, 我们参照他们的表达方式对本文数据分析部分进行了修改。(详见方法 2.7 数据分析部分)

相关参考文献如下:

Worsley, K.J., Friston, K.J. (1995). Analysis of fMRI time-series revisited — again. *Neuroimage*, 2(3), 173–181.

Beurskens et al., (2014). Age-related changes in prefrontal activity during walking in dual-task situations: a fNIRS

study. *International Journal of Psychophysiology*, 92(3), 122–128.

Ding, X. P., Fu, G., & Lee, K. (2014). Neural correlates of own- and other face recognition in children: a functional near-infrared spectroscopy study. *Neuroimage*, 85(2), 335-344.

Zhu, H., Li, J., Fan, Y., Li, X., Huang, D., & He, S. (2015). Atypical prefrontal cortical responses to joint/non-joint attention in children with autism spectrum disorder (asd): a functional near-infrared spectroscopy study. *Biomedical Optics Express*, 6(3), 690.

.....

审稿人 3 意见：本文利用 fNIRS 的 HbO 信号研究了不同类型掩蔽刺激对目标识别影响的早期加工差异。比较了能量掩蔽、不同类型的信息掩蔽下，所产生的大脑皮层激活上的差异。能够在前人的研究的基础上有所推进，研究意义较好。主要的不足之处或建议在于：

意见 1：摘要中，作者提到“表明信息掩蔽较匹配的能量掩蔽对视觉搜索有更大的干扰作用，并在初级和联合视觉皮层引发更大的加工负载，而不同信息掩蔽的差异表现在对目标的早期加工阶段”。全文并未对加工负载和早期加工阶段进行检测，更多的是基于前人研究的推论，直接笃定得出这样的结论是否合适，有待商榷。

回应：我们在修改的稿件中，强调了加工负载的理论假设。使用近红外脑成像技术就是从大脑皮层血氧代谢活动的角度来考察这个假设。根据这位审稿专家的建议，我们对摘要部分的相关内容进行了修改。相应的主要内容包括：

在字母碎片掩蔽条件下，视觉初级皮层部分区域的激活水平与行为判断结果的相关显著、而在字母掩蔽条件下，视觉联合皮层部分区域的激活水平与行为判断结果的相关显著。这进一步说明信息掩蔽中的字母掩蔽和字母碎片掩蔽的掩蔽作用在大脑皮层上所造成加工负载存在差异。

意见 2：在前言处，在综述掩蔽刺激相关行为学研究的结果差异时，详细列举不同的掩蔽类型的行为学结果差异。但在第三段报告视觉掩蔽的神经差异时，并未阐明掩蔽刺激的类型，过于笼统，请添加。还有在引言第三段第 5 行“枕叶区域的激活与视觉掩蔽刺激量存在相关，额顶区对枕叶皮层的激活存在调节作用”，阐述不清楚，存在相关是正相关还是负相关？额顶区对于枕叶皮层的激活存在调节作用？如何调节？以及第 7 行“枕叶脑区的 BOLD 信号减少”，对于 BOLD 信号减少的产生是否合适，请确认。第五段第 3 行“关于能量掩蔽、不同类型信息掩蔽的大脑皮层激活上是否存在加工模式的差异”，这句话感觉没有阐述完全，请完善。

回应：感谢这位审稿专家发现一个重要的问题。我们在以下四个方面作了相应的修改和补充：

- (1) 在引言的最后，进行了如下修改“到目前为止，相应于在视觉搜索任务中，不同掩蔽类型刺激的特异性神经机制还没有得到一致性结论。综合分析已有的行为研究与脑成像研究可以看出，能量掩蔽与信息掩蔽的差异已经在行为研究中得到证实，但是还不清楚这种外显行为差异与大脑皮层激活之间的对应关系；另一方面，行为研究对不同类型刺激导致信息掩蔽的探讨存在争议，同时也未有研究对争议进行神经机制层面的探讨。基于此，本研究使用功能性近红外光谱脑成像技术(fNIRS)来考察在不同类型掩蔽刺激条件下被试进行目标识别的行为反应与大脑皮层激活的关系，旨在对视觉搜索任务的行为成绩进行考察的同时，还考察不同掩蔽类型刺激大脑皮层激活的神经机制，以此探讨不同掩蔽类型刺激的大脑皮层激活是否具有特异性。”
- (2) 根据审稿人建议，我们将“Fahrenfort 等人(2007)的研究以随机任意方向的短线簇为掩蔽刺激，探讨掩蔽刺激对目标识别的影响，结果发现，枕叶区域的激活与视觉掩蔽刺激量存在相关，额顶区对枕叶皮层的激活存在调节作用(Fahrenfort, Scholte, & Lamme, 2007)”，修改为，“Fahrenfort 等人(2007) 以有特定短线簇纹理特征的方块图形为目标刺激，以随机任意方向的短线簇为掩蔽刺激，探讨掩蔽刺激对目标刺激识别的掩蔽影响的机制。结果发现，掩蔽所作用的脑区为在刺激呈现后 109~141 毫秒被激活的枕叶区域，由于掩蔽刺激信号干扰了额顶区对该枕叶皮层的再进入加工式(reentrant processing)的反馈调节作用，进而造成了对目标信号知觉的掩蔽。”
- (3) Tse 等人(2005)的研究主要针对形成视觉意识的脑区而开展的脑成像的工作，和我们这项研究实质性的关系并不密切，因此我们删去了下面的句子及相应的文章引用：“Tse 等人(2005)的研究发现，当目标受到掩蔽刺激的影响而很难识别时，枕叶脑区的 BOLD 信号会随之减少，反之相反(Tse, Martinez-Conde, Schlegel, & Macknik, 2005)。”
- (4) 我们将下面的句子“此外，信息掩蔽与能量掩蔽已在行为研究中证实存在显著差异，但是还不清楚这种行为模式的差异与对应的大脑皮层激活模式之间的关系”修改为“尽管信息掩蔽与能量掩蔽之间的掩蔽效果的差异已在行为研究中得到证实，但是还不清楚与这种行为模式的差异相对应的大脑皮层激活模式的差异。”

意见 3: 方法部分，2.6 探头布置“并将最低端的探头与枕骨隆突重合”，最低端的探头有 5 个，第几个是与枕骨隆突重合，中间的还是，请表述清楚。

回应：根据这位评审专家的这条意见，我对方法部分的相关内容进行了补充，加入了一句如下：

“根据国际 10-10 脑电系统安置探头，将帽子中线与 CZ-OZ 线重合。最低端处中间位置的探头与枕骨隆突重合，覆盖顶枕联合区。”

意见 4：结果部分，3.2 fNIRS 结果 “结果发现，像素掩蔽条件下显著激活的通道有 ch24、ch28 ($p < .05$)，其余通道都未被显著激活($p > .05$)，虽然方法部分阐述了进行校正，但是此处最好标明 $p < .05$ ，是否经过了校正，如果经过校正，是哪种校正，因为全文进行了两种校正，FDR 和 Bonferroni，因此需要标明。图 9 掩蔽类型对视觉搜索影响的激活两两对比热量图，figure legend 和结果阐述不明，比如图 9a，“(a)字母掩蔽和像素掩蔽”，是这两个条件的 beta 值进行相减还是 t 检验？colorbar 代表什么？对应的结果阐述“Bonferroni 校正的事后检验显示，字母掩蔽与字母碎片掩蔽条件下相关皮层的激活水平显著高于像素掩蔽条件（见图 9a、图 9b）”，阐述和图不是很能对应的起来，读者并不明确你是做了何种事后检验，图上是表示的差异还是什么。3.3 fNIRS 结果与识别准确率的相关，对于得到的显著相关系数，是否和同一个通道上的不同条件下进行相关系数的差异检验？请阐述。

回应：我们已根据专家建议对结果部分的相关内容进行了补充与修改。首先，在原文 3.2 部分标明数据处理使用的校正方式。其次，图 9 中的值是 t 值，colorbar 代表的也是 t 值，t 值是两两水平 beta 值相减后的均值除以标准误得来。Bonferroni 校正后的文字与图对应不清的部分已做了修改。最后，关于 3.3.部分的相关分析，上一版稿件尚未对同一通道不同水平下的相关系数进行检验，但在这一版中已根据这位评审专家意见将对各个通道不同水平相关系数进行费舍 z 转换，并对转换后的 z 值进行统计检验。结果发现，各通道下三水平两两之间均无显著差异。

意见 5：在讨论部分，第二段第 8 行“进一步的二者之间对比发现，字母掩蔽条件下的皮层激活范围 和水平高于字母碎片掩蔽条件”，从本研究结果我们发现字母掩蔽条件与字母碎片掩蔽条件的激活脑区基本差不多，数量也相当，所以字母掩蔽条件下的皮层激活范围高于字母碎片掩蔽条件的阐述与现有结果不符，需要重新核对一下。第三段第 2 行“本研究中，视觉皮层的血氧浓度变化模式表明，字母掩蔽与字母碎片掩蔽对目标加工影响的脑机制在皮层激活模式上存在很大相似性，都激活了视觉初级皮层和视觉联合皮层的大部分区域，这在一定程度上与行为结果相呼应”，这段的阐述也存在问题，因为本研究行为学结果发现字

母掩蔽条件下的掩蔽效应要显著大于字母碎片掩蔽条件下，而在脑区激活上是基本相似的，因此本段的阐述就是有问题的。讨论中还存在一个很大的问题，针对被试作答准确率与 fNIRS 数据的相关，可以发现字母碎片掩蔽与初级视觉皮层 22 通道的激活呈显著正相关，而与字母掩蔽条件视觉联合皮层的激活呈显著负相关，而在讨论中只是笼统的把这两部分放在一起来说，并未对这种正相关和负相关进行讨论，此处也是不合适的。

回应：已根据专家意见对讨论部分的相关内容进行了补充与修改。针对讨论部分第二段第八行，本文提出字母掩蔽条件下的皮层激活范围和水平高于字母碎片掩蔽条件这一结论是基于结果部分的图 9(c)对应的数据处理，虽然在单因素重复测量方差分析以及 Bonferroni 矫正后并未发现二者有统计水平上的显著差异，但在数值上仍有一定的倾向性。已根据专家意见对相关三个段落的内容进行了修改与补充，具体如下：

进一步的二者之间对比发现，字母掩蔽条件下的皮层激活范围和水平高于字母碎片掩蔽条件，虽未达到显著性水平，但依然有一定借鉴意义，关于这种差异的解释，存在两种不同的观点。

本研究中，视觉皮层的血氧浓度变化模式表明，字母掩蔽与字母碎片掩蔽对目标加工影响脑机制的皮层激活模式在存在很大相似性的同时，仍可以看出字母掩蔽条件下的皮层激活水平有大于字母碎片掩蔽条件的趋势。这种差异在一定程度上与行为结果相呼应，说明字母掩蔽与字母碎片掩蔽作为信息掩蔽既存在共性的加工机制也存在刺激特异性的机制。

本研究发现，在字母碎片掩蔽条件下，视觉初级皮层部分区域的激活水平与行为成绩的相关显著，而视觉联合皮层与行为成绩的相关不显著，说明字母碎片掩蔽条件下的掩蔽效果更多地与视觉初级皮层的激活有关，主要对字母碎片进行特征分析，因而激活了与知觉特征分析加工相关的视觉初级皮层。字母掩蔽条件下，视觉联合皮层部分区域的激活水平与行为成绩的相关显著，而视觉初级皮层与行为成绩的相关不显著，说明字母掩蔽条件下的掩蔽效果更多地与视觉联合皮层的整合加工的激活有关。目标刺激与掩蔽刺激均为携带语义信息的字母，为此被试在对目标进行加工判断时也受到同为字母的掩蔽刺激的语义加工的影响，因而激活了与语义加工相关的视觉联合皮层。

第三轮

意见 1：题目中的早期加工问题，恐怕本研究说明不了。发生在枕区并不一定意味着早期；

fNIRS 对时间进程并不敏感。题目需修改。反过来看，英文题目中并没有这个早期加工的意思。

回应：感谢编委的意见和建议。我们根据这条意见，梳理了整个稿件的思路，在结合研究内容的基础上，将稿件题目修改为：“掩蔽刺激对目标识别加工的作用：来自 fNIRS 的证据”，这样，使得题目更为凝练和准确。

意见 2：英文摘要需要仔细修改，目前的水平达不到学报发表的要求。

回应：根据编委的意见，我们对英文摘要进行了重写，并请该领域的小同行专家给予修改，也请英语为母语的研究人员进行了挑剔性阅读。修改后的摘要如下：

The Role of Masking Stimulation in Target Recognition Processing: Evidence from fNIRS

Abstract

When our visual system processes target signals, it usually receives large amounts of irrelevant information from the target, leading to a reduction in the visibility of the target. A wealth of research has shown that visual search for target letters against a masking background is largely determined by the masker type. Informational maskers, such as either randomly positioned and oriented letters or randomly distributed letter fragments, induce stronger masking effects on recognition of target letters than the energetic maskers do, such as the random-phase masker (same spectral amplitude composition as the letter masker but with the phase spectrum randomized) or the random-pixel masker (the locations of the letter maskers' pixel amplitudes being randomized). However, the mechanisms under informational masking and those under energetic masking are still unknown.

The current study examined both cortical activities and behavioral performances in the visual search task, which is determined by whether one of four letters presented at four symmetrically-located positions differs from the others under three masking conditions (random pixels, letter fragments, and random letters). Both the oxygenated hemoglobin concentration (HbO) responses in the primary visual cortex (V1) and secondary visual cortex (V2) with a functional near infrared spectroscopy (fNIRS) were recorded. Twenty (4 males, 16 females) healthy adults (mean age: 22.5 ± 1.67 years) participated in the experiment. Each masking condition contained 5 blocks, and each block contained 8 trials. There was a resting phase of 20 seconds between the two blocks. Spatial registration methods were applied to localize the cortical regions underneath each channel and to define two regions of interest (ROIs), which are the primary visual cortex (V1) and secondary visual cortex (V2).

The behavioral results showed that the performance of recognizing target letters improved when the masker type shifted from random letters to letter fragments and to random pixels, suggesting that the letter masker interfered the most with performance than the letter fragment and random-pixel maskers. The random-pixel masker caused the least masking effect. The fNIRS results showed that both letter masker and letter-fragment masker produced an increase in cortical oxygen level. Many regions of interest (ROIs), particularly the visual cortex (including V1 and V2), were more activated under the letter or the letter-fragment masking condition compared to the random-pixel masking condition. Moreover, the differences in cortical activation between the masking conditions further suggested that the V1 and V2 are the critical brain regions involved in visual letter search and informational masking of letter recognition.

To summarize, this study used fNIRS to explore the cortex activation patterns of different types of masking on target recognition. The results showed that information masking had much more interference on visual search and caused greater processing loads in primary and secondary visual cortex, compared with energy masking under the same conditions. Furthermore, the differences between letter fragments masking and letters masking are reflected in the activation mode of V1 and V2 regions.

Key words visual masking, visual research, functional near infrared spectroscopy (fNIRS), parietal-occipital cortices