

《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：左侧额中回参与汉字视觉空间分析的 fNIRS 证据

作者：陈发坤 陈甜 蔡文琦 王小娟 杨剑峰

第一轮

审稿人 1 意见：

该研究采用 fNIRS 技术，考察了左侧额中回参与汉字视觉空间分析的认知神经机制。研究中操纵了字类型和空间频率两个自变量，重点关注了被试的左侧额中回在完成 one-back 任务时的血氧浓度变化。结果发现两个自变量及其交互作用都影响了左侧额中回的血氧浓度变化。文章写作思路比较清晰，格式规范。

回应：感谢审稿人的肯定和建议，希望此次修改对文章有很大程度的提升。

意见 1a：尽管如此，我有以下建议供作者考虑。前言中主要阐述了左侧 MFG 在汉字识别中的作用，主要是从汉字与拼音文字对比的角度来阐述的。作者在摘要中也指出有假设认为 MFG 的激活负责了汉字独特的视觉空间加工。在此基础上，我预期的是研究中会比较汉字与拼音文字在 MFG 激活上的差异，然而研究中并未比较汉字与拼音文字的加工过程。

回应：感谢审稿人的细致阅读与仔细推敲，这的确是我们写作逻辑上的问题。此次修改，我们在前言弱化了汉字与拼音文字的对比(详见第 3~4 页)，将重点转移到视觉词汇识别中高/低空间频率信息对汉字识别的 MFG 脑区的影响。

意见 1b：另一方面，研究中的目标刺激均为汉字，所操纵的自变量为汉字类型和空间频率，操纵这些自变量尤其是汉字类型的研究基础及研究逻辑需要较为深入详细的阐述。

回应：非常赞同评审的建设性意见，这有助于提升本文的逻辑。此次修改，我们在前言中介绍了汉字类型是探讨 MFG 参与汉字阅读的重要变量，通过三种字类型的对比不仅有助于区分正字法、词典水平的汉字加工(详见第 5 页，第 2~3 段)，还能探讨视觉空间频率能够在哪种加工成分下影响到 MFG 在汉字阅读中的参与激活，从而深入揭示 MFG 参与汉字阅读加工的功能(详见第 5 页，第 4~5 段)。

意见 2：本文采用的是 fNIRS 技术，这一技术的空间定位并不精确，作者如何确定血氧浓度的变化是来自左侧额中回？作者在数据收集部分也指出本研究重点关注的是左背侧通路脑区，并未说明是左侧 MFG。如果不能精确定位，建议作者修改标题，并修改文中相应的阐述。与该问题相关的是，前言中有关左侧 MFG 的阐述也要相应地进行修改，主要阐述左背侧通路脑区在汉字识别中的作用。

回应：这是我们的疏忽。初稿中我们以 fMRI 的数据分析思路在报告所有结果，存在很多问题。

实际上，我们的实验设计仅关注左侧 MFG 的功能，所以在放置前部的光纤支架时，以能够覆盖 MFG 区域作为定位标准。实验中使用 3D 定位仪对每个被试的 MFG 进行定位，最后使用了组平均的通道定位。fNIRS 的空间分辨率能达到 2~3 cm，测量深度为 1.5~2 cm (Pinti et al., 2020)，而额中回又是额叶最大的一个脑回；因此使用 fNIRS 技术完全可以测量到左侧额中回皮层的活动。定位结果发现，通道 3、6、9、10、12、13 和 16 通道采集的血

氧浓度变化数据是来自或者主要来自左侧 MFG。本研究近红外的主要结果发现的三个效应通道(9, 10 和 13)就是属于额中回脑区。

而在后部光纤支架的放置, 主要是想探测左侧梭状回(FFG)中部区域, 该区域被识别为视觉词汇识别区(VWFA), 但该脑区在梭状回腹侧, 使用 fNIRS 技术比较难探测, 很遗憾本研究在 FFG 的相近通道也没有发现自变量的效应。但是在初稿中, 为了全面地报告实验结果, 就报告了包括枕中回在内的所有通道的结果。

此次修改, 我们在方法部分明确说明了被试光纤支架放置的定位标准(详见第 7 页, 2.4 数据收集部分)。在结果部分去掉了与研究目的无关的结果报告, 集中报告和讨论了 MFG 相关通道的结果(详见第 9~11 页, 3.2 近红外结果部分), 将其它结果作为附件上传。

意见 3: 高低频的对比为什么要采用灰度背景, 这使得高频下的汉字几乎看不清, 影响了被试的加工, 使得被试在汉字高低频上的知觉加工过程完全不同。

回应: 感谢评审专家对材料细节的仔细推敲。我们在确定实验材料的过程中, 曾经意识到这种差别, 也尝试过使用其他颜色背景, 但是视觉效果不理想。鉴于前人的研究(Calderone et al., 2013; Horie, Yamasaki, Okamoto, Kan, et al., 2012; Petras et al., 2019)都是使用灰色背景, 我们最终确定了灰色背景, 本研究的高、低空间频率条件, 图片视觉效果都与前人研究相似。而且, 高空间频率图只表征了物体的边缘和轮廓, 需要更加精细和慢速的识别; 高空间频率下的汉字刺激更需仔细辨认, 也正符合了高空间频率特征识别的理论效果。

此次修改, 我们在文中明确地陈述了上述考虑, 并增加了相应的参考文献作为材料选取的依据(见第 6 页)。

意见 4: 研究中在正确率、反应时和近红外结果的分析中都采用了多重比较, 作者需要报告使用了哪种方法进行了校正?

回应: 抱歉, 这是我们初稿的疏忽。我们的行为和近红外结果的多重比较都采用了 Bonferroni 方法进行了校正。

本次修改, 在方法 2.5 数据分析部分的倒数第二段末尾增加了校正的方法(见第 8 页)。

意见 5: 关于本研究中发现的左侧 MFG 脑区在字类型上的差异, 主要表现为假字比真字和非字的激活更高。根据前言中的阐述, 左侧 MFG 主要负责空间频率信息的加工, 在此基础上会预期无论哪一种字类型都应该表现出激活, 但研究却仅发现了假字的激活。为什么? 是哪些可能的因素影响了这一结果? 事实上, 这一问题也与作者研究中为什么要操纵字类型这一自变量密切相关(见问题 1), 然而作者在前言部分并未对此做出深入阐述。

回应: 评论得非常中肯, 我们完全接受。深入讨论这一实验发现能够有助于加强本研究的逻辑性。审稿专家 3 也指出了这一发现的重要性, 可以有助于排除任务难度的影响。

此次修改, 我们在引言部分明确阐明对比三种字类型的重要意义(回复意见 1, 文中见第 5 页), 在讨论部分也进行了深入分析(见第 11~12 页, 4.1 部分), 指出假字激活大于非字和真字, 表明 MFG 进行正字法信息的视觉空间加工。非字只有基本的视觉信息, 没有正字法信息, 所以没有激活 MFG。尽管真字有正字法信息, 但是被试在做 one-back 任务时, 可能还用到了语音和语义等信息, 对正字法的依赖程度下降, 所以真字条件下 MFG 也没有足够强的激活。

意见 6: 作者在讨论中也指出了 fNIRS 技术的局限性, 然而讨论中大量的篇幅都在针对一个具体的脑区进行讨论。建议作者基于本研究的数据讨论左背侧通路脑区在汉字识别中的作用, 而不是针对某个具体的脑区进行讨论。

回应：感谢审稿人的建议。实际上，我们只能选择以 MFG 脑区的功能作为研究问题的出发点。汉字识别的确应该是背/腹侧通路共同作用的结果，但使用 fNIRS 技术具有局限性，1) 无法同时考察两个通路的活动情况；2)也无法同时准确定位背侧通路几个脑区的活动。使得我们无法从通路的角度来探讨脑区激活在汉字识别中的作用。而且，本实验在放置支架时，是以定位被试的 MFG 脑区为中心放置的支架，能够相对准确地考察 MFG 脑区的激活，对其它脑区的定位就不够准确了。

这也是此次修改稿中最大的调整，我们在文中弱化了对于阅读背侧通路的探讨，集中考察 MFG 在汉字阅读中的激活是否受到视觉空间频率的影响。在“fNIRS 近红外结果”部分仅报告了左侧额中回通道的结果，其他通道的结果主要以附件的形式呈现。

意见 7：对于研究中所关注的左侧 MFG 脑区的作用，根据本研究的结果并不能得出结论说 MFG 存在功能分离的亚脑区。作者需要基于研究和技术的局限性谨慎地得出本研究的结论。

回应：完全接受审稿人的建议，初稿中得出 MFG 存在功能亚脑区的结论有些过于武断，需要更加谨慎。毕竟本研究的结果相对 fMRI 的发现说服力较弱。在本研究中，发现左侧额中回的通道 9 存在字类型的主效应，而在左侧额中回的通道 10 和 13 表出现交互作用，是否表明了 MFG 的功能亚脑区，还需要更加细致深入地研究。

在修改稿中，我们对此进行了修改，更加谨慎地解释了该结果(详见讨论部分，第 14 页第 1 段)。

.....

审稿人 2 意见：

论文招募了 31 名大学生，采用 3*2 的被试内实验设计，用 fNIRS 考察汉字频率与类型的效应及其脑机制。研究设计简单，结果也简单，在控制上面缺乏一些关键的内容，建议不用。

回应：很抱歉我们的初稿由于在写作上存在逻辑问题导致了审稿专家的误解，尤其是夸大了 fNIRS 对于脑区功能的探测能力，同时也使用 fMRI 的数据分析思路导致了数据统计上的误解。此次修改，重点更新了论文的写作逻辑，希望能够得到审稿专家的认可。

意见 1：论文没有根据前人研究计算样本量，仅根据方便取样的方式进行了被试招募和后期的数据筛选，目前已经不符合主流心理学研究设计的基本要求；

回应：的确如此，本研究在实验设计之初没有使用 G-Power 进行样本量的预算，而是根据经验实际收集了 31 名被试的数据。根据审稿专家的建议，我们事后使用 G-Power 对样本量进行计算，评估一个中等大小的 3*3 交互作用的效应量($f = 0.25$, Cohen, 1992), α 设置为 0.05, 统计检验力为 0.95(Faul et al., 2009), 计算得到的样本量为 22 人。这说明本研究的样本量是足够的，而且，我们在统计结果部分也都报告了实际得到的统计检验力。

Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychological Bulletin*, 112(1), 155–159.

Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A., & Lang, A. G. (2009). Statistical power analyses using G*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*, 41(4), 1149–1160.

意见 2：论文采用 fNIRS，但是对 fNIRS 能解决前人不能解决问题的理由上描述不够，并不是没人这么做过咱们就可以做。并且对于数据的分析也很简单，仅仅把脑数据与类似行为数据的分析方法进行了分析。

回应：很抱歉文章初稿的逻辑错误导致了审稿专家的误解。本研究使用 fNIRS 技术是为了

探讨 MFG 在汉字阅读中的功能,并非因为 fNIRS 有比 fMRI 更强的地方,而简单地使用 fNIRS 技术进行了一次尝试。相反,如果使用 fMRI 技术,从全脑的角度展开研究,可能会得到更多的研究结果。

审稿人对此的误解,应该是源于初稿在引言部分的逻辑不够简洁和清晰。此次修改,我们重写了引言部分,突出和加强了本实验解决的研究问题。使用 fNIRS 技术不是因为前人没有使用这项技术开展研究,只是为了探讨 MFG 在汉字阅读中受到了视觉空间频率的影响,fNIRS 技术刚好足够解决本研究提出的问题。

至于审稿人提出的“仅仅把脑数据与类似行为数据的分析方法进行了分析”这一点评论,我们很难苟同,数据分析方法的应用,是为了把研究问题说清楚。如果说不清问题,再高级的数据分析都没有意义。真诚希望审稿专家为我们提供高级的数据分析思路和技术,来帮助我们研究问题探讨的更加透彻,我们也非常愿意学习和尝试,很感激审稿人的建议。

意见 3: fNIRS 数据采集和分析方面的问题: 首先,数据的采集根据描述不是所有被试都进行了 3D 定位,这可能造成不同被试之间的差异被计算到了研究中。其次,作者最核心的问题是把所有的通道都进行了 3*2 的方差分析,找出其中有显著效应的通道,而并没有进行 FWE 的校正,这会严重影响作者的结果有效性,因为校正后很多显著的结果可能就不显著了,进一步的讨论和分析就没有意义了。

回应: 这是我们初稿写作上的疏忽和逻辑错误。首先,我们使用 3D 定位仪对每个被试的 MFG 都进行了定位,这一点在初稿中没有明确陈述。修改稿中对此进行了明确地说明(详见第 7 页,2.4 数据收集部分)。其次,初稿在报告结果时,采取了 fMRI 的思路,报告了所有通道的数据。当把标准的 fMRI 分析技术应用于 fNIRS 数据分析时,的确会产生较高的假阳性率,还没有特别有效的方法来控制 fNIRS 的错误发现率(Buss et al., 2014)。而且, fNIRS 也只能在重点关注的通道上进行相对准确地脑区定位,其它通道的定位都不太准确了。

因此,在修改稿中,我们集中报告和探讨 MFG 的相关通道结果,其他通道的结果主要以附件的形式呈现。这样也能将问题聚焦在左侧额中回在汉字阅读中的视觉空间分析作用。
Buss, A. T., Fox, N., Boas, D. A., & Spencer, J. P. (2014). Probing the early development of visual working memory capacity with functional near-infrared spectroscopy. *Neuroimage*, 85(Pt. 1), 314–325.

意见 4: 如作者所言,空间频率应该是一个基础视觉的相关信息,应该激活枕叶相关的皮层,但是作者在所有的通道检验中其实并没有发现空间频率的主效应,这个有点匪夷所思。

回应: 感谢审稿人的敏锐洞察力,我们的确没有在枕叶区域发现空间频率的主效应,但是发现了空间频率和字类型的交互作用。主效应不显著主要是因为三种字类型在完整频谱、低空间频率和高空间频率条件下对枕叶区域的依赖程度不同。从枕中回的结果可以看出,每种空间频率条件下,三种字类型的激活模式都不太一样,所以导致三种空间频率条件的总体激活强度差不多,导致枕叶区域没有发现空间频率主效应。至于为什么三种空间频率对真字、假字和非字产生了不同的影响,还需要通过进一步的研究进行深入探讨。对此,本研究还无法回答或解释,或许需要全脑的 fMRI 研究来对此进行深入探讨。我们在讨论部分承认了本研究的不足,并对此进行明确说明(见第 15 页,4.4 部分)。

审稿人 3 意见:

本研究以汉字类型和空间频率为变量,使用 fNIRS 技术考察大脑左额中回在汉字阅读中的功能,尤其是对汉字正字法空间频率的敏感性。结果发现,左额中回的激活受汉字的类

型影响,并且表现出字类型和空间频率的交互作用:假字比真字和非字更多地激活了左额中回;在低空间频率条件下假字比真字和非字具有更强的激活。本实验设计新颖,所用方法恰当,数据分析合理,研究结果揭示了左脑额中回在中文阅读过程中的具体作用,加深了对中文识别的脑科学机制的理解。

回应:感谢审稿专家的肯定和鼓励!

意见 1: 请作者在修改文稿时考虑以下两个简单的问题:在前沿部分,请简单介绍为什么选择真字、假字和非字三类刺激。对中文识别的神经科学研究不仅是小同行的关注点,引起了不少大同行甚至脑科学领域以外的学者对兴趣。稍详细解释一下三类刺激的选择原因,可以帮助更多的读者理解中文加工的脑机制。

回应:此次修改中,我们完全接收了审稿人的建议。不仅让读者更加理解了选择三类汉字材料的理由,也提升了本文章的研究逻辑。具体而言,我们增加了关于字类型对比的 fMRI 和 ERP 研究文献的介绍,深入分析了对比三种字类型的逻辑和意义。详见引言第 5 页。

意见 2: 假字比真字和非字更多地激活了左额中回,这一结果非常重要。它完美地阐释了左脑额中回在汉字正字法加工中的独特作用,这一作用不受刺激难度影响:非字比假字难度大,但并没有更多地唤醒额中回。作者在讨论时应增加几句话,排除“难度”效应。

回应:感谢审稿专家的建议。我们在讨论 4.2 部分的第二段(第 13 页)增加了这部分内容。

第二轮

审稿人 1 意见:

作者根据第一轮的审稿意见进行了较为全面的修改,文章的质量有了一定程度的提升。

回应:感谢审稿人的肯定,希望此次修改对文章有更大程度的提升。

审稿人 1 意见: 修改稿中仍然存在如下问题需要作者思考。研究中目标刺激均为汉字,所操纵自变量为汉字类型和空间频率,操纵这些自变量尤其是汉字类型的研究基础及研究逻辑需要较为深入详细的阐述。这是上一轮审稿意见中所提出来的建议,修改稿中作者主要描述了有关日语中同时操纵了文字类型和空间频率的 ERP 和 fMRI 研究,研究发现表明空间频率只影响特定水平的阅读加工。在此基础上作者提出本研究要考察汉字中的空间频率是在字形还是词典加工水平对左侧 MFG 的激活产生影响。文献综述部分有几点不清楚的地方:

回应:很抱歉针对审稿人这一点的修改未达到预期效果,本次修改过程中我们进行了深入思考和反复推敲,在文中进行了细致的修改,希望能够回复审稿人提出问题。我们也非常感谢评审人耐心、细致的阅读,根据审稿人的建议修改的确有助于提高文章论述的逻辑性。下面对审稿人的三个具体问题进行逐条回复:

意见 1a: 第一,什么是字形水平?什么是词典加工水平?汉字类型这一自变量所包括的三个水平之间的对比是如何分别探测字形水平和词典加工水平的?词典加工水平是否具有不同的水平?比如真字和假字相比

回应:汉字阅读过程是由视觉信息通达到汉字心理表征的过程,这个复杂的过程可以简单地描述为,汉字承载的字形/正字法、语音和语义信息在心理词典中都对应着相应记忆存储,同时就对应着三种信息从物理信号输入到心理词典信息通达的加工过程,每种信息的加工过程都可以区分为亚词典和词典水平的加工:亚词典加工是在心理词典信息通达前的加工过

程，如字形到语音转换；而词典加工是指心理词典信息的检索、提取、验证、确认等加工过程。

此次修改中，我们首先在引言中对上述过程进行了详细介绍(见前言第3页第2段)，便于读者更好地理解汉字阅读的内在加工机制，尤其是让不从事阅读研究的读者能够更清晰地理解本实验；其次，我们对涉及到“水平”这一不精确术语的表述进行了通篇修改，表述为具体地加工。最后，根据审稿人的建议，我们详细解释了三种字类型的对比是如何区分出正字法、语音和语义信息的词典和亚词典加工的(见前言第3页第3段)。

意见 1b: 第二，三种实验任务是判断前后程序的两个刺激是否相同，对于不同类型的汉字，真字、假字和非字，其辨别难度不同，被试可能采取的策略也不同。如何考虑和排除这些因素对结果所产生的影响，包括对行为和 MFG 激活程度的影响？

回应: 感谢审稿人敏锐的洞察力，我们高度认可审稿人的观点。的确，不同刺激类型肯定会诱发被试的加工差异，体现为被试的内在加工策略，这与本课题组已有的研究结论相一致。我们的元分析(Zhao et al., 2017)表明，在汉字阅读的脑成像研究中，刺激对比和任务对比最终都体现为被试潜在的完成任务的加工策略差异。这也是导致实验室任务夸大了阅读的跨语言脑机制差异的主要原因(Wang et al., 2015)。

在本研究中，不同类型汉字的 one-back 任务确实存在一定难度上的差异。本研究的行作为结果中，在正确率和反应时上都发现了字类型的主效应，表现为非字的记忆、识别的难度高于真字和假字，但是真字和假字之间没有难度差异。此结果与 Yang 等人(2011)研究中使用类似真字、假字和非字材料以及相同的 one-back 任务得到的行为结果是一致的。

我们与上一轮的审稿人 3 都认为不同类型的汉字材料在行为结果上的差异并不影响本研究关于 MFG 功能的结论，反而为本研究得出 MFG 进行正字法信息加工的结论提供一定支持证据。因为：1) 行为结果中发现假字和真字 one-back 任务不存在难度差异，但假字比真字更多激活 MFG-通道 9；MFG 对假字更敏感不是因为假字任务更难，而可能是因为假字只能依赖正字法等视觉信息加工导致的。2) 行为结果还发现假字 one-back 任务比非字的更容易，但是假字依然比非字更多激活了 MFG-通道 9，这也进一步验证了该区域对假字有更强的激活是因为加工假字的正字法信息。因为如果 MFG-通道 9 只对任务难度敏感，那非字应该比假字更多激活该区域，而本研究结果并未发现这样的结果。

关于上述内容的讨论详见 4.2 部分的第三段末尾。

意见 1c: 第三，汉字识别研究中真字、假字和非字加工中所激活的脑区主要有哪些？仅有 MFG 吗？VWFA 这一经典的脑区是否有激活呢？建议作者系统地阐述不同类型汉字加工过程的异同及其激活脑区。在此基础上进一步思考并深入阐述高低空间频率信息是会如何影响不同类型的汉字加工过程的。

回应: 审稿人的这个建议，涉及了两个方面的问题：一是建议详细介绍阅读三种字类型的脑区激活情况；二是阅读相关的经典脑区 VWFA 的参与激活情况。很遗憾我们不能完全认同这个修改建议，仅在讨论部分进行了有限地修改，下面依次说明：

1) 关于建议详细介绍三种字类型的脑区激活情况的问题，鉴于下述理由，我们认为此次修改中不适合对三种字类型的脑机制进行详细介绍：

首先，本研究受技术限制，仅能关注到主要兴趣脑区(MFG)的功能，这是对初稿进行的最重要的修改和调整。而汉字阅读的脑机制研究表明，三种字类型激活了大量共同的脑区，同时三种字类型的对比又能发现大量存在差异的脑区。比如真字、假字和非字存在三者共同激活的脑区，如双侧梭状回、上顶叶和额下回以及右侧 MFG (Liu et al., 2008; Wang et al., 2011; Yang et al., 2011)，这些区域被认为加工汉字复杂的空间布局(Tan et al., 2003; Wang et al.,

2011)。而条件之间进行对比,真字、假字和非字也存在条件差异性敏感的脑区,比如真字比假字、非字更多激活颞叶后部和中部区域(Liu et al., 2008; Yang et al., 2011),这两个区域可能分别负责从书写到语音的映射(Booth et al., 2006; Wang et al., 2011)和语义加工(Wu et al., 2012);假字比真字、非字更多激活双侧 MFG 和梭状回,这些脑区可能反映了汉字的正字法加工(Liu et al., 2008);非字比真字、假字更多激活视觉皮层(枕中回和梭状回)(Liu et al., 2008),顶叶后部(Wang et al., 2011),这些区域的激活可能是因为对汉字笔画进行基本的视觉加工(Liu et al., 2008)。所以,本研究对 MFG 之外的其它脑区功能的探讨起不到作用,在文中就没有必要进行详细介绍。

其次,我们的研究也表明,最简单的汉字笔画的随机组合,都可能涉及到所有汉字阅读的脑区的参与,不同类型的汉字脑机制差异,不是脑区参与的质上的差异,而是激活量上不同(Wang et al., 2011; Yang et al., 2011)。通过对比不同汉字类型仅仅能够揭示出汉字类型之间的加工差异,而本研究正是利用这一点来探讨 MFG 在汉字阅读中的功能,至于不同汉字类型是否存在更多的脑区差异,不是本研究探讨的问题。

最后,详细介绍三种字类型的脑机制差异不能增强本研究的必要性,反而会让问题变得更加复杂。本研究的出发点是使用 fNIRS 技术,瞄准 MFG 脑区来开展,从全脑的角度来介绍三种汉字类型的脑激活差异对本文的研究目的没有帮助。我们在讨论部分也承认了研究技术的局限性,实在不适合在文中将问题扩展到对其它脑区的探讨,本研究做不到,就算是使用 fMRI 技术,也很难对多个脑区进行全面考察。

2) 关于建议考察经典的 VWFA 脑区的参与激活情况,本研究在技术上无法准确考察其激活情况,因此不考虑该脑区的结果。

首先,本文初稿中的确汇报了除 MFG 之外的其它脑区通道的结果,但是接受审稿人的意见,我们也认同这一主张,认为使用 fNIRS 同时从多个脑区探讨神经通道问题存在非常大的问题,从而在上一版修改中仅强调本研究的主要问题,即考察 MFG 的功能。

其次,本研究对 VWFA 脑区的探测结果不准确。VWFA 位于腹侧颞枕交接区,使用 fNIRS 技术较难准确定位该脑区,本研究设计之初就没有考虑要探测该脑区的活动,这种情况下就更难真实地反映该脑区的参与激活了。该局限性已经在文中 4.4 部分进行了讨论。

3) 接受审稿人的建议,我们在讨论部分考虑到了阅读背、腹侧通道的差异。

首先,由于低空间频率更多在背侧视觉通路加工,高空间频率更多在腹侧视觉通路进行加工(Leonova et al., 2003; Allen et al., 2009);因而,低空间频率可能对背侧通路脑区加工假字和非字有更大的影响,而对腹侧通路脑区加工三种字类型刺激的影响较小;高空间频率可能对腹侧通路脑区加工真字有更强的影响,而对背侧通路脑区加工三种字类型刺激的影响较小。本研究结果发现,在低空间频率条件下,左侧 MFG 表现出对假字激活强于真字和非字,而在完整频谱和高空间频率下三者没有差异。这可能是因为低空间频率下,真字主要在腹侧通路脑区加工,假字和非字在背侧通路脑区进行加工;并且由于具有正字法的假字能够在背侧通路的 MFG 进行加工,而不具有正字法的非字不能在 MFG 得到加工。因此,低空间频率条件下只表现出对假字的敏感。相比之下,在高空间频率以及具有高空间频率的完整频谱条件下,真字、假字和非字都在背侧通路的 MFG 脑区得到较少加工,所以没有表现出对假字的敏感。该部分见讨论 4.2、4.3 部分。

其次,真字、假字和非字都依赖枕顶叶皮层的视觉空间加工;但真字加工可能更依赖腹侧通路的颞叶脑区对语音、语义的加工,假字更需要梭状回(视觉词形区)和背侧通路下左侧 MFG 的正字法加工,非字可能更多需要背侧通路的枕叶和顶叶皮层的基本视觉空间分析。在本研究中,真字、假字和非字在枕中回脑区的激活都较大(相比于额叶等脑区),并且不存在字类型之间的差异,一定程度上表明三种字类型都需要基本的视觉空间分析。本研究的支架主要覆盖枕叶和额叶,并未覆盖腹侧通路的颞叶脑区,因此未能发现真字的更强激活;但

是本研究发现了假字比真字、非字更多激活了左侧 MFG 脑区，该区域激活反映的可能是对假字正字法的加工；而且，非字更多激活了顶叶附近的中央后回，该区域可能反映了对非字更多的视觉空间分析。该部分更改内容见前言第 3 页和讨论 4.2 部分。

意见 2： 需要在一个统一的框架中解释结果：

回应： 感谢审稿人的仔细推敲与建设性意见，通过对五条意见的修改，对文章结果的理解以及逻辑提升具有很大的帮助。下面依次说明：

意见 2a： 第一，如果 MFG 反映的是正字法水平的视觉空间加工，无论真字和假字的辨认应该都发现 MFG 的激活。因为无论是真字还是假字刺激，要完成刺激辨别任务都需要首先激活正字法信息，之后在真字条件下会激活相应的语音和语义信息。作者提出在真字辨认任务中对正字法信息的依赖程度下降，这有什么直接或间接的证据吗？

回应： 与审稿人的推理一致，如果 MFG 反映的是正字法信息的视觉空间加工，那么 MFG 理应对具有正字法的真字和假字有相似的激活；但是本研究结果发现 MFG 对真字的激活显著少于假字，这一结果与 Yang 等人(2011)的研究结果相同。我们推测在真字条件下，被试可能依靠语音和语义信息完成 one-back 任务，因此降低了对正字法的依赖，导致真字没有激活负责正字法加工的 MFG。此猜测得到 Wang 等人(2011)fMRI 研究一定的支持，他们使用了类似的真字、假字和非字材料以及相同的实验任务，独立成分分析的结果发现真字特异性地激活了负责语音、语义加工的颞叶后部、中部区域。该部分更改内容见讨论 4.2 部分。

意见 2b： 第二， 针对反应时和正确率的分析，其行为结果与已有研究一致吗？与哪些已有研究一致，与哪些已有研究不一致？为什么？行为结果之间的一致性可以为本研究提供支持。

回应： 本研究的反应时和正确率分析中，在正确率和反应时上都发现了字类型的主效应，表现为非字记忆和识别的难度高于真字和假字，但是真字和假字之间没有难度差异。此结果与 Yang 等人(2011)研究中使用类似真字、假字和非字材料以及相同的 one-back 任务得到的行为结果是一致的。此外，在该研究中，被试对完全相同的材料完成了词汇判断的行为任务，得到了完全不同的结果，表现为假字的难度最大，非字的难度最小；说明任务能够调节对不同类型汉字的加工需求。此部分更改内容见讨论 4.1 部分。

意见 2c： 第三， 根据文献综述部分中所提到有关 MFG 激活的相关解释，一种认为 MFG 与一般的工作记忆有关，主要是参与了视觉特征的工作记忆加工，而另一种解释是 MFG 主要负责空间信息的整合加工。建议作者结合三类刺激的特点，根据本研究的结果分别在这两类解释下进行讨论，进而得出本研究支持的主要观点。

回应： 完全同意审稿人的建议。首先，本研究中发现 MFG 只对假字有更强的激活，可能是因为该脑区在 one-back 任务下对假字进行了视觉正字法的工作记忆加工，而该脑区对不具有正字法的非字以及对正字法依赖更低的真字未进行足够强的视觉正字法工作记忆加工。该结果支持了 MFG 进行视觉特征的工作记忆的解释。

其次，MFG 只在低空间频率条件下对假字更敏感，这可能是因为低空间频率具有促进整体快速加工的特点(Calderone et al., 2013; Kveraga et al., 2007)，被试能够将低空间频率假字的各个部件进行整合以形成一个整体，从而能快速地在额叶皮层推测可能的结果；非字没有部件信息，因此不能进行空间整合；而真字因为更多依赖腹侧通路脑区加工，因此没有激活 MFG。该结果支持了 MFG 负责空间信息整合加工的解释。该部分内容见讨论 4.2 部分。

意见 2d: 第四，研究中所采取的任务是刺激辨别，这与汉字阅读中最终通达意义的过程不同，而且在真字的辨别中并未发现 MFG 的显著激活，这是否表明汉字阅读中 MFG 的激活与阅读识别过程中的语义提取无关？

回应: 本研究发现 MFG 只对假字有更强的激活可能反映了该脑区的正字法加工，此结果并不支持额中回的激活和汉字语义加工有关；但是该结果也并不否认额中回和汉字语义加工有关，因为 MFG 的激活可能受到任务的调节(Zhao et al., 2017)。本研究使用的是 one-back 工作记忆任务，该任务偏向自下而上的刺激加工和要求一定的工作记忆加工(Wang et al., 2011)，对语义加工的依赖程度可能不如词汇判断、语义判断以及语义相关的词产生等任务。例如，Tan 等人(2000)让被试对单字模糊意义、单字精确意义和双字精确意义的汉字材料完成语义相关的词产生任务，结果发现 MFG 在三种条件下都有激活，且该脑区受到语义精确性的调节。

Tan, L. H., Spinks, J. A., Gao, J. H., Liu, H. L., Perfetti, C. A., Xiong, J. H., . . . Fox, P. T. (2000). Brain activation in the processing of Chinese characters and words: A functional MRI study. *Human Brain Mapping, 10*(1), 16-27.

意见 2e: 第五，讨论中的小标题并不能准确地反映作者的观点，建议作者进一步思考并为各个部分取合适的名称。例如，4.2 为“MFG 在汉字阅读中的功能”，这一子标题太大了，不能明确地反映出作者在这一部分想表达的观点。同时，作者要注意 3 个小标题之间的联系和区别，三个小标题下的内容有重复。总讨论需要更进一步的整合。

回应: 感谢同意审稿人的建议，我们重新对讨论部分小标题的名称及其内容进行了调整，使得讨论的各个部分之间相对独立且有联系。

意见 3: 在文字表述上要注意：第一，不要中英混用，比如文中多次出现“block”；第二，有很多句子能够理解意思，但仔细琢磨后发现存在表达问题，比如：“假字要比真字和非字需要更多的 MFG 参与激活”，“更多的 MFG 参与激活”激活是什么意思？

回应: 完全接受赞同审稿人的意见。我们将“block”改成了组块(block)，将“假字要比真字和非字需要更多的 MFG 参与激活”修改成“假字比真字、非字需要更多的 MFG 激活”。此外，我们对全文进行了仔细的校正阅读，发现和修改了一些类似的问题，以尽量减少文字表述问题。

第三轮

审稿人 1 意见: 作者针对上一轮修改意见做了认真的思考、回应和修改，我没有进一步的意见了。

编委复审意见: 该文经几轮审稿，作者对审稿专家的意见进行了认真的回复，审稿专家对回应表示满意，认为论文达到发表的水平。同意推荐。

主编终审意见: 本论文借助功能性近红外光谱成像(fNIRS)技术，通过操纵汉字材料的视觉呈现空间频率，对左侧额中回在汉字视觉空间加工中的作用进行了考察。本论文的选题具有一定新颖性，研究范式选用恰当，所得到的研究结论具有较强理论价值。