

## 《心理科学进展》审稿意见与作者回应

题目：文字与面孔识别的半球偏侧化互补模式的竞争性发展机制

作者：高飞，蔡厚德，齐星亮

---

### 第一轮

#### 审稿人 1 意见：

《文字与面孔识别的半球偏侧化互补模式的竞争性发展机制》一文，以文字与面孔知觉这两个在个体发展中有着重要意义的专家化系统的关系为主题，围绕当前两大理论模型，结合 FG 的结构分区与功能特征的新近研究，综述两个专家化系统的关系并提出未来研究应关注的问题。整体看，这篇综述的思路及文字表达清晰，体现出了作者对相关领域的了解。但是，仍有一些问题需要作者修改。

**意见 1：**文章的整体内容以介绍两大理论模型为主，介绍性明显，综述性不足，很难体现这一研究领域中的核心研究问题。建议以核心研究问题来重新结构文章，如从文字与面孔加工的发展机制的角度来组织综述内容。

**回应：**诚如专家所言，文章对两个理论模型（文字阅读学习的神经元再利用假设、分布式半球组织的观点）和相关证据，只进行了简要的介绍与评价，尤其是第二个理论模型。本文的重点在于试图探究支持这两个理论或观点的认知神经加工机制，特别是与 FG 的结构和功能特征的关系，进而阐明文字阅读学习与面孔识别的半球偏侧化互补模式的竞争性发展机制。文章的逻辑是：以这两大理论模型为基础，结合 FG 的结构和功能特征的近期进展，以及据此提出的由内-外轴与后-前轴组成的 FG 多维度计算加工模型，深入探讨 FG2 和 FG4 如何在自下而上和自上而下信息加工的调节下，完成 VWFA 和 FFA 的半球偏侧化竞争性发展的。因此，文章中这两个理论模型的阐述只在逻辑上起铺垫作用，重点或创新点集中体现在第 4 部分：“FG 的结构与功能区及其与 VWFA 和 FFA 的半球偏侧化竞争性发展的关系”。修改稿中这部分内容得到了进一步加强，如逻辑关系更清晰，重点内容更突出，观点阐述更明确（见 4.1 第 2 和 3 段中的红色字体，P7）。修改稿中增加了一张加工机制图，使 VWFA 和 FFA 的半球偏侧化竞争性发展的加工机制一目了然（见图 3，P9）。

针对专家的修改意见，修改稿增加了第二个理论模型的一些参考文献，便于读者了解相关研究的背景资料（见第 3 部分的红色字体，P4~5）。修改稿还对两个理论模型做了更深入

的分析评述（见第 2 部分第二段，P4；第 3 部分第二段，P5），指出了它们的价值与不足之处，进而理顺了两个理论在偏侧化竞争性发展机制核心观点上的逻辑关系，为本文提出的需要探究的关键加工机制问题奠定了基础。

**意见 2：**文章的主题“竞争性发展机制”的表述值得商榷。首先，发展机制应侧重综述文字和面孔不同偏侧化特征的由来、在个体发展中二者关系的变化及影响因素（如为什么会存在竞争）等等。已有基于儿童的脑电和行为研究都发现，在发展早期文字和面孔加工的发展存在竞争关系，而在学龄儿童的研究中则发现二者的促进关系。建议作者一方面在综述中补充相关研究，特别是儿童的研究，包括训练研究以给读者呈现这一领域研究进展的全貌，另一方面斟酌“竞争性”的说法是否合适（我觉得按照当前的内容写成认知神经机制更合适）。

**回应：**对于您提出的文章主题中“竞争性发展机制”的表述是否合适的问题，我们重新梳理了本文在解决阐述问题上的逻辑框架、写作思路和相关证据，认为“竞争性发展”的机制解释是合适的。

首先，本文主要探讨了从文字阅读学习开始文字识别与面孔表征在皮层空间上发生的竞争加工，这会导致 VWFA 出现左侧优势，进而推动 FFA 出现右侧优势。文章围绕神经元再利用假设，梳理了大量的研究证据。基于对分布式半球组织的观点阐述，文章还提出文字与面孔的偏侧化竞争是发生在 vOTC(FG)的多层次结构上的双向(自下而上与自上而下)动态加工过程。

第二，本文的重点或创新之处在于：根据 FG 的结构与功能分区研究新发现，以及据此构建的多维度计算加工模型，从层次性与领域特异性两方面，深入探讨了文字与面孔识别的偏侧化竞争的双向加工是如何从 FG2 到 FG4 的动态发展过程。具体而言，位于 FG2 中的 VWFA-1 和 FFA-1 处在后-前轴的较低层次上，两者的皮层空间存在一定的交叠（领域特异性低），提示它们的加工不仅主要受自下而上传入信息的制约，也会因共享皮层空间导致在知觉加工的早期出现神经资源的竞争，进而开始出现 VWFA-1(内-外轴的外侧)的左侧化和 FFA-1(内-外轴的内侧)的右侧化。随着文字阅读学习和面孔识别经验的积累，文字或面孔信息的加工从 FG2 中的 VWFA-1 和 FFA-1 分别向位于 FG 中部外侧的 FG4 中的 VWFA-2(内-外轴的外侧)和 FFA-2(内-外轴的内侧)转换。由于文字阅读的经验增强了 VWFA-2 与左半球语言网络的连通性，这种自上而下的偏侧化调制会强化文字与面孔的竞争加工，进而导致 VWFA-2 出现更强的左侧化，并加快 FFA-2 的右侧化。同时，面孔的学习经验也会增强 FFA-2 与相关脑网络的右侧化连通性，这种自上而下的调制也推动了 FFA-2 的右侧化。

当然，文字阅读学习与面孔表征的竞争加工只是影响面孔识别右侧化发展的因素之一。在个体发展中，面孔识别的右侧化发展会经历一个较长的时间延迟，这不仅受脑发育和文字阅读学习的影响，也与面孔经验的缓慢积累过程有关。修改稿中的总结与展望中的第四部分“面孔表征右侧化的发展机制”做了较全面细致的探讨。（见 P12~13）

对于专家提到的“已有基于儿童的脑电和行为研究都发现，在发展早期文字和面孔加工的发展存在竞争关系，而在学龄儿童的研究中则发现二者的促进关系。”我们找到了研究学龄前汉语儿童的早期汉字阅读经验对文字与面孔半球偏侧化影响的三篇文献(Li et al., 2013; 张文芳, 2020; Zhao et al., 2015)。Li 等人(2013)和张文芳(2020)对学龄前汉语儿童(5~6 岁)的 ERPs 和 EEG 的  $\gamma$  波的研究发现，汉字诱发的左侧化 N170 振幅与面孔诱发的右侧化 N170 振幅负相关，表明儿童的早期阅读经验不仅会导致汉字识别出现左侧优势，还在右侧与面孔竞争加工资源。研究者(Li et al., 2013; 张文芳, 2020)推测，在发展早期文字和面孔存在竞争关系，而在学龄儿童中则是促进关系。然而，对学龄前字母文字儿童（4~6 岁）的 fMRI 却发现，当儿童获得字母知识时左侧 FG 对面孔的反应随之减弱(Cantlon et al., 2011; Centanni et al., 2018)，且随着阅读成绩的提高，右侧 FG 对面孔的神经活动显著增强(Dehaene-Lambertz et al., 2018; Monzalvo et al., 2012)。这不仅与学龄字母文字儿童的表现一致，也符合 Dehaene 等人(2005, 2007, 2011, 2015)提出的神经元再利用假说的预期，即文字与面孔在左侧竞争导致 VWFA 左侧化，并推动了 FFA 右侧化。在本质上，“竞争关系”反映的是一种内在加工机制，表现为文字可能占用面孔的皮层资源，进而干扰或削弱其加工效率，导致面孔偏侧化在一侧半球的减弱；“促进关系”则强调文字在左侧与面孔竞争所导致的 VWFA 左侧化会推动 FFA 的右侧化。在汉语学龄前儿童中出现的文字与面孔在右侧竞争可能与汉字具有与字母文字相比更复杂的视觉构型特征有关，这需要擅长视空间辨别能力的右半球的更多参与(Li et al., 2013; 张文芳, 2020)。值得关注的是，Zhao 等人(2015)对学龄前汉语儿童(4~6 岁)的 ERPs 研究发现，汉字视觉辨认学习训练会引起汉字在右侧诱发更大的 N170 振幅，面孔在左侧诱发的 N170 振幅却变小。这提示右半球在幼儿处理早期汉字视觉经验中起了重要作用，但汉字与面孔又可能在左半球竞争资源。可以推测，学龄前儿童的汉字阅读学习既要依赖右半球辨别字形，又要利用左半球通达正字法和字音、字义信息，所以他们的早期阅读经验会在右半球和左半球与面孔竞争加工资源。到了学龄期，随着儿童阅读熟练水平的提高，汉字在左半球与面孔的竞争会愈加激烈，进而加快了文字的左侧化建立，并推动了面孔的右侧化。今后的研究有必要采用学龄前和学龄儿童的跨期研究设计，利用具有高时间分辨率的 ERPs 技术和具有高空间分辨率的 fMRI 技术，系统探查汉语儿童早期阅读经验影响汉字与面孔偏

侧化竞争加工的独特机制。基于以上探讨，修改稿中展望部分“第三，汉字与面孔的偏侧化竞争加工机制”做了相应阐述。（见 P11~12）

当然，对发展机制的探讨确实应该考虑到您的意见中所提到的偏侧化改变及其影响因素等。由于本文主要关注的是：文字阅读学习如何导致 VWFA 左侧化与面孔识别的 FFA 右侧化，因此主要探讨了文字与面孔在左侧的竞争加工导致这种偏侧化改变的发生机制。需要强调的是，在这一过程中文字的左侧化与面孔的右侧化经历了不同的时间延迟历程。由于 VWFA 与左侧语言网络的强势连接(Reynolds, Long, Grohs, Dewey, & Lebel, 2019)，以及对文字阅读技能不断地强化训练(Dundas et al., 2014; Ozernov-Palchik et al., 2021; Qi, Schaadt, & Friederici, 2019)，使得 VWFA 的左侧化一旦出现便会迅速发展(Dehaene et al., 2015; Dehaene-Lambertz, Monzalvo, & Dehaene, 2018; Maurer et al., 2005; Lopez-Barroso et al., 2020; Op de Beeck, Pillot, & Ritchie, 2019)。与文字阅读学习不同，个体自出生时便广泛接触面孔，但学前期儿童的面孔识别能力远未达到成人的水平(Behrmann & Plaut, 2013; Grill-Spector, Golarai, & Gabrieli, 2008)，且 FFA 的右偏侧化发展相对缓慢，直到青春期早期（12-14 岁）才稳定下来(Aylward et al., 2005)。修改稿中的展望部分“第四，面孔的右侧化发展机制”中增加了相关阐述。（见 P12~13）

**意见 3：**加强对综述中第 4 部分，FG 的结构分区与功能特征与之前两大理论模型之间内在逻辑关系的论述。

**回应：**衷心感谢审稿专家指出这一部分的不足。修改稿在以下方面做了更深入的探讨与阐述：

第一，在介绍 FG 的结构分区与功能特征和多维度计算加工模型的基础上，指出：“视觉信息由早期视觉皮层对感知特征进行初步处理后，经 FG1 进入 FG2，随后从 FFA-1 和 VWFA-1 分别传递到 FFA-2 和 VWFA-2，以完成面孔与文字识别的层次性和领域特异性加工。可见，文字与面孔识别区是沿 FG 的内-外轴与后-前轴逐步出现和动态发展的。”（见 P7 第一段）

第二，指出多维度的计算模型的不足之处：并未说明这种动态加工如何受到自下而上与自上而下信息加工的调节(第二个理论模型)，也未涉及它们与 VWFA 和 FFA 的半球竞争性偏侧化发展的关系(两个理论模型)。（见 P7 第二段）

第三，基于 FFA-1 和 VWFA-1 以及 FFA-2 和 VWFA-2 在 FG 中的分布特点，指出：“位于 FG2 中的 VWFA-1 和 FFA-1 处在后-前轴的较低层次上，两者的皮层空间还存在一定交叠(领域特异性低)，提示它们的加工可能主要受自下而上感觉传入的制约，因此 FG2 可能是文

字与面孔出现早期竞争的皮层位置；比较而言，位于 FG4 中的 VWFA-2 和 FFA-2 处在后-前轴的较高层次上，两者的皮层空间已相互分离(领域特异性高)，提示它们的加工可能发生在知觉的后期，且主要通过学习与经验接受自上而下信息加工的调制，所以这两个脑区的半球偏侧化可能会变强。”以上阐述可以为进一步探讨文字与面孔识别的半球偏侧化发展的早期竞争与后期调制机制做铺垫。(见 P7 第二段)

第四，4.2 的标题改为“VWFA-1 与 FFA-1 在 FG2 中的早期竞争加工”；4.3 的标题改为：“VWFA-2 与 FFA-2 与相关脑网络的偏侧化连通性对早期竞争加工的调制”，明确了早期竞争和后期加工两个阶段的关系。

第五，在第 5 部分的总结增加了“图 3 文字与面孔识别的半球偏侧化竞争性发展的多层次双向动态加工机制图”(见 P9)，以方便读者对内在逻辑关系和加工机制的理解。

**意见 4:** 加深对研究展望部分的写作。文字与面孔加工的发展是经验依赖的，也与儿童大脑发育的过程有关，可以从这两个方面结合儿童文字学习与面孔学习(更内隐，而不是作者说的面孔识别教学)的方式等进行深入阐述。此外，汉字专家化加工的 fMRI 和脑电研究已有较系统的研究证据报告，应当结合进行深入讨论。

**回应:** 诚如专家所说，文字与面孔识别都是专家化加工系统。但是，文字与面孔识别选择区(如 VWFA 和 FFA)的出现和发展，一方面会受刺激视觉特征加工的制约，另一方面受经验的驱动(drived)或是经验依赖的(Op de Beeck et al., 2019)。在本文探讨的文字与面孔识别的偏侧化双向(自下而上与自上而下)竞争加工的机制中，VWFA-1 与 FFA-1 在 FG2 中的早期竞争加工主要受自下而上信息加工的制约，而 VWFA-2 与 FFA-2 与相关脑网络的偏侧化连通性对早期竞争加工的调制主要通过学习与经验以自上而下的方式进行。本文认为，对文字与面孔的学习经验可以增强 VWFA-2 和 FFA-2 与相关脑网络偏侧化的连通性，进一步推动 VWFA-2 的左侧化与 FFA-2 的右侧化。在大脑中，VWFA (Saygin et al., 2016)和 FFA(Powell, Kosakowski et al., 2018)与相关脑网络的偏侧化连接是预置的(pre-existing)，学习经验通过改变这些脑网络的连通性可以塑造文字或面孔选择区，因此也可以预测儿童或成人个体脑中的所观察到的 VWFA 和 FFA 的皮层位置。

但是，相比于文字左侧化的发展更多受经验驱动的影响，面孔右侧化的发展则更多受到来自经验驱动和大脑发育的双重影响(Op de Beeck et al., 2019)。研究证据(Lochy, de Heering, & Rossion, 2019; Behrmann & Avidan, 2022)显示，面孔右侧化会经历非线性的发展轨迹，即面孔表征的右半球优势在婴儿期存在，但 5-6 岁时消失，而随文字阅读学习的开始，又逐渐

再现，且在成年时稳定下来。本文主要探讨从文字阅读学习开始文字与面孔竞争的半球偏侧化发展的认知神经机制，对于右侧化的发展如何受到来自经验驱动和大脑发育的双重影响，在展望部分中“第四，面孔表征右侧化的发展机制”对此做了深入讨论。（见 P12~13）

根据专家的修改意见，修改稿中删除了“面孔教学与训练”的表述。（见 P2）

**意见 5：**此外，一些论述和表达需要澄清和修改：

1) 文中引用的图和文对位置的描述不是很清楚。

**回应：**修改稿将原来稿件中的图 1 做了更换(P6)，可以更为准确的显示 FG 的解剖边界与各个脑区的位置。

2) P7 第二自然段，请明确高级皮层指的是什么？早期和后期是如何界定的？连通性指的是什么？如何做出“文字与面孔加工的早期竞争决定于两者共享神经加工资源的程度，可能主要集中在与早期视觉信息加工联系密切的 FG 后部”这一段推论的？

**回应：**已将“高级皮层”改为“高级皮层(如语言区等)”(P5)。

**回应：**“早期”是指文字与面孔识别的早期知觉阶段，由 FG2 加工经 FG1 传来的早期视觉皮层(V1、V2/V3 和 V4)的视觉信息，负责表征刺激的高分辨率形状不变性知觉(Dehaene et al., 2015)。这一阶段的加工主要受自下而上感觉转入信息的制约，且共享高视敏度视觉加工的皮层空间。相对而言，“后期”是指在文字和面孔识别的晚期知觉阶段，由 FG 中更高层次的 FG4 来完成(Op de Beeck et al., 2019)，并通过偏侧化的领域特异性连通性与非视觉系统脑区连接，以完成对整体刺激的身份识别和意义解释(Bhrmann & Plaut, 2013; Mahon & Caramazza, 2011; Op de Beeck et al., 2019)。这一阶段主要基于学习经验的积累以自上而下的方式影响文字与面孔识别的半球竞争性偏侧化发展。(相关表述见 P5, 7, 8)

**回应：**连通性指皮层区之间互通信息的程度，包括结构与功能连通性(structural and functional connectivity)(Op de Beeck et al., 2019)。修改稿中补充了这一表述 (P8)

**回应：**修改稿中 4.1 部分的第三段和 4.2 部分的内容(P7)，重点阐述了 VWFA-1 与 FFA-1 为何会在 FG2 中竞争加工皮层空间资源，请详见该部分内容。

3) 描述清楚 FG 的中前部和 FG2 与 VWFA-1、FFA-1 和 VWFA-2、FFA-2 之间的关系？

**回应：**FG4 位于 FG 的中前部，VWFA-2 和 FFA-2 则处于 FG4 内的 FG 中部 (Weiner et al., 2017)。修改稿中见 P6 中的文字表述，也见图 2。

4) 梳理 4.2 和 4.3 之间的逻辑关系。

**回应：**将 4.2 的标题改为“VWFA-1 与 FFA-1 在 FG2 中的早期竞争加工”，4.3 的标题改为

“VWFA-2 与 FFA-2 与相关脑网络的偏侧化连通性对早期竞争加工的调制”，并对相关表述进行了补充与调整，进而明确了它们之间的逻辑关系(P6-7)。

绘制了“图 3 文字与面孔识别的半球偏侧化竞争性发展的多层次双向动态加工机制图”(P9)，进一步明确了早期竞争与后期调制的内在逻辑关系。请详见修改稿内容。

5) 对 Dehaene-Lambertz 的修订理论进行核查。该理论并未明确指出文字反应相关的神经元会“阻止面孔斑块的扩展”。修正后的理论认为，儿童在学习阅读之前，腹侧视觉皮层由具有选择性反应的部位和其他不稳定部位组成，即工具、房屋等视觉刺激的选择性反应在生命的第一年出现，并在随后的几年里逐渐扩大。随着阅读的学习，对文字的选择性反应出现在一个固定的位置——VWFA，这个位置的出现并没有改变对先前其他视觉刺激选择性反应的脑区位置，即没有“招募”之前出现的面孔专家化加工区域。但是在发育过程中，阅读的学习和其他视觉刺激还是存在皮质上的竞争。经过阅读学习，越来越多的皮层区域逐渐地投入到文字学习中，逐渐地阻止了附近物体或面孔特异性脑区的扩展。

回应：对 Dehaene-Lambertz 等人于 2018 年所发表的文献仔细核查后，明确了修订后的理论指出了文字反应相关的神经元会“阻挡物体和面孔斑块的扩展”，并在修改稿中做了相应修改(P10)。修改稿中还增加了一项支持阻挡模型(blocking model)的近期研究 (Feng et al., 2022)。

6) 关于“面孔表征右侧化的发展机制”。目前也有研究发现婴儿时期的面孔识别在一定程度上就是右侧化的，对此作者有什么看法？

回应：在展望中“第四，面孔表征右侧化的发展机制”部分做了系统探讨。(见 P12~13)

7) 发展性失读症(developmental dyslexia, DD)一般译为发展性阅读障碍。

回应：修改稿中，已经修改为“发展性阅读障碍(developmental dyslexia, DD)”。(见 P3)

.....

**审稿人 2 意见：**

这篇综述的资料详实，内容丰富，有较高的理论价值。但是大量文字晦涩难懂，还有部分错句，希望作者仔细修改。详细内容见审改稿批注。

回应：非常感谢审稿专家的宝贵意见！您提供的细致和专业的建议对我们提高文章质量有很重要的指导和帮助。我们深入思考了您提出的问题和建议，逐条进行了回复，并在论文中做了相应修改，修改内容均使用红色字体以便于您审查。

**意见 1：**综述的第四部分是文章的精华，请作者对相关证据加以更精细的整理，并且对每一

个部分的结果进行概括。如能画出相应的关系图则更好。

**回应：**诚如您所言，文章的第 4 部分中这一部分探讨的逻辑关系还不够清晰，证据阐述还不够精准。

由于您的这条意见与第一位专家的修改意见 3 基本相同，因此相关修改说明请参考意见 3。另外，参考您的建议，总结与展望部分绘制了一张反映加工机制的图，见 P9 的图 3。

**意见 2：**大脑的可塑性并不局限于文字和面孔加工的神经机制。其他认知功能的可塑性是否与这二者的模式存在相似性？建议作者增加相关内容的比较。

**回应：**十分感谢审稿专家的启发性意见，这促使我们对文化发明导致大脑可塑性变化的深入思考。我们在“5 总结与展望”部分的最后一段增加了该部分内容，详见“第五，文化发明的学习导致大脑可塑性改变的机制”。（见 P13~15）

在这一部分中，首先阐述了视觉数字和音符阅读学习的大脑可塑性机制，并将其与文字阅读学习做比较，发现它们共享了基本相似的大脑可塑性加工原理，即都需要占用 FG 中原先可用于表征其它领域客体（如物体、面孔或躯体等）的皮层区域，并通过与各自相关脑网络的连通性，以确定各自不同的皮层定位与半球偏侧化效应，这提示文字阅读学习的神经元再利用假设似乎也适用于解释一些其他文化产品(如数字、音符等)的阅读学习。之后，对数字、音符与文字阅读学习的大脑可塑性改变之间的相互关系的研究做了探讨与展望，指出未来研究应关注：（1）研究左侧 VNFA 与 VWFA 究竟是合并出现的，还是两个截然不同的区域；（2）基于数字认知的三重编码模型，探究儿童数字阅读学习中表征数字形状、数量和数词脑网络之间连通性的可塑性改变及其对数字运算或思维能力发展的影响；（3）探究早期的文字与音乐阅读学习经验对 VWFA 与音符识别区之间竞争皮层空间的影响，以及这两个脑区的定位与偏侧化如何受到来自外侧裂周边语音网络的自上而下的调制。

另外，根据审稿专家在文中批注所提的意见，我们逐条进行了认真细致地修改。

---

## 第二轮

**审稿人 1 意见：**

作者较好地回复了审稿人的意见。仍有几个问题需要修改：

**意见 1：**作者在阐述本文的核心问题时，特别强调“发展”，所以在本文提出的理论框架图 3

中需体现图表题中的“发展”的含义。目前图3提出的“早期”主要指的是加工的早期阶段（认知过程的一部分），而不是个体发展的“早期”。希望作者在整体行文中区分这些不同，既能体现个体发展过程中的“竞争性”机制的形成，又能从加工过程的角度解释竞争背后的机制问题。儿童发展生态理论中“历时系统”的时间轴的呈现方式是否有助于修改图3？

**回应：**文中的“发展”主要关注文字与面孔识别的半球偏侧化互补模式在FG中如何形成的认知神经加工过程，如图3所示。这一过程通常发生在学龄期儿童开始学习文字阅读时，包括文字与面孔识别“早期”发生的“竞争”（自下而上）加工与后期发生的“调制”（自上而下）加工。而且，VWFA的左侧化与FFA的右侧化是从FG2向FG4逐渐发展变化的。但是，基于目前的研究证据，这一过程还难以从宏观上以个体发展进程的方式来呈现。

当然，审稿专家的关于“儿童发展生态理论中“历时系统”的时间轴的呈现方式是否有助于修改图3”的建议，对完善本文的不足，却有价值。因此，在修改稿的总结与展望的“第四，面孔表征右侧化的发展机制”之后，我们增加了“图4个体发展中文字和面孔偏侧化动态改变的时间进程”，以补充说明审稿专家所关注的“个体发展”机制。（见P13）

**意见2：**讨论的最后一段，谈到学习由文化发明而来的符号系统，这部分内容的研究对于回答本文主题由什么特别的意义？是从哪些方面可以深化本文的主题？可以阐述地更加明确、精炼。

**回应：**首先，由于原来的标题“第五，文化发明学习的大脑可塑性机制”的表达不够精准（见意见3），需要涵盖的内容也过大，现改为“第五，数字和音符阅读学习的大脑可塑性机制”。

（见P14）另外，对文字表述做了适当精简，并对意义进行补充阐述。概括起来，主要从两方面深化了主题：

（1）数字和音符也属于人类文化发明的视觉符号系统，它们的阅读学习是否也会出现与文字阅读学习类似的大脑可塑性改变呢？回答这一问题，有助于阐明不同视觉符号系统阅读学习的大脑可塑性机制是否具有普遍性。第一段末已做阐述。（见P14）

（2）（根据专家意见，修改稿中增加）对数字、音符与文字阅读学习大脑可塑性机制相互关系的探讨表明，它们的脑结构与功能网络既相互分离，又相互重叠；既相互竞争，又相互协调。还特别指出：“重要的是，儿童阅读这三种视觉符号的学习在时间上可能是同步或异步发生的。因此，有必要探明儿童文字、数字和音符阅读学习相互作用的时间动力学及其脑机制。这不仅对加深文化学习大脑可塑性的认识有理论意义，也对指导语言、数学和音乐的早期教学有实践意义。”（见P15）

**意见 3:** 个别文字表述要符合汉语的表达习惯：如文化发明学习翻译是否合适，请修改后并标出英文；“由于面孔选择区的发展需要更长的时间延迟”，什么是更长时间的延迟？“妨碍”-“阻碍”？、“可见，学龄前与学龄前字母文字儿童……”等等。

**回应:** 非常感谢审稿专家指出的问题。

(1) 依据 Dehaene 和 Cohen(2007)的定义，将“文化发明学习”修改为“文化学习(cultural learning)”；(见 P15)

(2) “更长时间的延迟”是指面孔选择区的发展成熟相对缓慢，需要更长的发展时间。由于“延迟”一词可能被认为是一种“异常”现象，因此修改稿中改为“由于面孔选择区的发展成熟需要更长的时间……”；(见 P2~3)

(3) 依据 Feng 等人(2022)所提的“阻挡模型(blocking model)”，将展望第一部分“文字与面孔竞争皮层空间的加工机制”中的“妨碍”-“阻碍”等表述，统一修改为“阻挡”；(见 P10~11)

(4) 参考 Li 等人(2013)和张文芳(2020)的表述，将“学龄前儿童”统一修改为“学前儿童”。修改稿中，我们改为“可见，学前与学龄字母文字儿童……” (见 P11~12)

**审稿人 2 意见:**

修改稿相较于初稿有了非常明显的进步。少量文字表述上可以做进一步的修改。

**意见:** 例如：“2 文字阅读学习的神经元再利用假设及其相关证据”部分的第二段给出了一些支持“文字阅读学习的神经元再利用假设”的证据。证据分成 4 个部分，每一个部分都是直接给证据而没有给出概括性内容。建议在每一个证据前先做概括，再分述各个相关证据。

**回应:** 根据您的建议，将支持证据分成 4 个部分，每个部分的第一句话都给出了概括性表述。修改内容详见 P3~4。

---

### 第三轮

**审稿人 1 意见:**

稿件可以接受。还有一个小问题，作者没有理解：

**意见 1:** “可见，学龄前与学龄字母文字儿童……”不是非要改成学前，而是说“字母文字的儿童”的表述有问题，应该为“学习字母文字的儿童”……。还请作者全文核查修改。

回应：感谢审稿专家指出的问题。“字母文字儿童”的表述确实欠妥，未将“在学前期开始学习字母文字的儿童”等意思表述明白。

接受审稿专家的建议，修改稿中具体修改如下：将“学前字母儿童”改为“学前期开始学习字母文字的儿童”(P11)；为了与这一修改对应，也将“学前汉语儿童”改为“学前期开始学习汉字的儿童”(P11)。

将“可见，学前与学龄字母文字儿童的表现是一致的，”改为“可见，学前与学龄儿童学习字母文字所引起的表现是一致的，”(P11)；将“在汉语学前儿童中出现的……”改为“在学前儿童中汉字阅读学习所引起的……”(P12)。

---

#### 第四轮

编委 1 意见：同意发表。

编委 2 意见：这篇稿件有较好的发表价值，建议接受。

意见 1：有一处小建议：引言第一段中，关于 VWFA 和 FFA 的三维坐标，似乎可以删去；这可能是所引文献中的结果，不过，毕竟这两块是脑区，给出某一具体的坐标点并无实质性意义。供参考。

回应：接受编委专家的建议，修改稿中删除了引言第一段中 VWFA 和 FFA 的三维坐标(P1)。主要基于以下考虑：

其一，文中 VWFA 的三维坐标(Talairach coordinates)( $x = -43$ 、 $y = -54$ 、 $z = -12$ )来自 Cohen 等人(2000)对 5 名健康右利手者激活峰值坐标的平均值；FFA 的三维坐标(Talairach coordinates)( $x = 40$ 、 $y = -55$ 、 $z = -10$ )来自 Kanwisher 等人(1997)对 10 名健康右利手者激活峰值坐标的平均值。但是，其他 fMRI 研究(如：Cohen et al., 2003; Jonas et al., 2015)所报告的 VWFA 和 FFA 的三维坐标与此有细微差异。这可能与这些研究采用了不同的实验任务、材料及数据统计方法有关(Caffarra et al., 2021; Cohen and Dehaene, 2004)。

其二，新近研究(如：Lorenz et al., 2017; Weiner, Barnett, et al., 2017; Yeatman and White, 2021)表明，VWFA 和 FFA 沿腹侧视觉通路中 FG 的后-前轴和内-外轴可分为四个区域，即位于 FG2 中的 VWFA-1 和 FFA-1，以及 FG4 中的 VWFA-2 和 FFA-2。本文集中阐述了文字与面孔识别半球偏侧化互补模式的发展与这四个区域之间关系的认知神经加工机制。因此，仅基于较早的研究结果分别标注 VWFA 和 FFA 的三维坐标位置，是不太合适的。

为了体现科学性和严谨性，参考编委专家意见和一些英文综述(如：Dehaene et al.,2015; Behrmanns and Plaut, 2020)对 VWFA 和 FFA 的表述方式（一般不标注三维坐标），删除了引言中对 VWFA 和 FFA 三维坐标的标注。

**主编意见：** 同意发表。