

语言距离和任务需求共同调节双语者词汇加工的脑机制

齐芸 蔡文琦 李智林 杨剑峰 王小娟

(陕西师范大学心理学院, 西安 710062)

摘要 双语者加工母语(L1)和二语(L2)是否共享相同的脑机制是研究者广泛关注的问题, 现有研究积累了大量的证据同时也存在分歧。造成结果不一致的主要原因在于双语者母语和二语间的语言距离以及实验任务差异。本研究利用元分析的优势, 考察了不同任务(语音、语义)下两类双语者(语言距离远的汉-英双语者、语言距离近的拼音文字双语者)加工 L1 和 L2 词汇时的大脑激活。结果发现, 在语音任务中, 语言距离远的汉-英双语者 L2 更多激活了负责形-音转换的左侧顶下小叶/缘上回; 而语言距离近的拼音文字双语者 L1 和 L2 共享了相同的脑机制。在语义任务中, 汉-英双语者 L1 更多激活了左侧额中回和左侧楔前叶来完成形-义转换; 拼音文字双语者 L1 更多激活了左侧颞上回中部来进行音-义转换, L2 更多激活了左侧额中回/额下回、脑岛和顶下小叶等语言控制脑区。进一步在语言切换任务中对比两类双语者的脑区激活也发现语言距离近的拼音文字双语者需要更多执行控制脑区参与激活。结果表明, 双语者加工 L1 和 L2 的脑区激活差异是在语言距离和任务需求共同驱动下潜在认知加工的差异。

关键词 双语脑机制, 元分析, 语言距离, 任务需求

分类号 B842; B845

收稿日期: 2025-10-14

*国家科技创新 2030(2021ZD0200500)资助

通信作者: 杨剑峰, E-mail: yangjf@snnu.edu.cn; 王小娟, E-mail: wangxj@snnu.edu.cn

1 引言

双语者的大脑如何阅读两种语言的词汇是研究者广泛关注和争论的问题。有研究者认为双语者共享了相同的神经网络来加工母语(L1)和第二语言(L2)(Brignoni-Perez et al., 2020; Hernandez et al., 2015), 也有研究者认为双语者需要发展出第二语言特异的神经网络(Kim et al., 2016; Nichols & Joanisse, 2016)。研究结果的长期分歧一方面是因为 L1 与 L2 的语言距离(语言相似性)影响了双语者是否共享相同的脑机制(Cargnelutti et al., 2022; Dong et al., 2021; Kim et al., 2016; Li et al., 2021; Shen & Del Tufo, 2022)。另一方面, 现有研究都是在特定加工任务下得到的结果, 双语者在完成语音、语义以及执行控制任务时需要不同的神经网络(Comstock & Oliver, 2021; Sulpizio et al., 2020)。因此, 有必要在不同加工任务下, 考察不同语言距离的双语者是否共享神经网络来完成两种语言的词汇加工。而这一复杂问题很难通过具体的实验研究来解决, 本研究利用元分析的优势对此展开深入探讨。

语言距离是指两种语言之间的正字法深度差异, 反映了两种语言的相似程度。双语之间的正字法深度不同, 其涉及的潜在加工可能也不相同(Oliver et al., 2017)。汉字是表义文字(morphogram), 其字形与语音的对应不规则, 正字法深度较深, 属于不透明文字; 而西班牙语、英语等拼音文字是表音文字(phonogram), 正字法深度相对较浅, 其中西班牙语可由字形直接拼读得到语音, 属于透明文字。以往研究发现, 正字法深度会影响词汇加工中的语音、语义通达(Mei et al., 2014; Yang et al., 2013)。汉字等深层正字法文字, 在语音加工中更依赖词汇通路, 倾向于通过字形通达语义(Han & Bi, 2009; Tan et al., 2005); 而西班牙语、英语等浅层正字法文字, 在语音加工中更依赖亚词汇通路, 倾向于通过语音通达语义(Braun et al., 2009; Mei et al., 2015)。上述研究较为一致地发现了正字法深度对语言加工的影响, 但两种语言之间的正字法深度差异(即语言距离)如何影响双语加工还需要进一步的探究。

为了探讨语言距离对双语加工的影响, 研究者通常将双语者分为语言距离远的汉-英双语者和语言距离近的拼音文字双语者, 对比两类双语者的脑区激活。例如, 研究者采用元分析方法在阅读任务上发现, 语言距离远的汉-英双语者在左侧额中回、额下回、颞上回、顶下小叶和右侧梭状回上出现了双语激活差异, 而语言距离近的拼音文字双语者仅在左侧额下回、脑岛和顶下小叶上出现了双语激活差异, 从而研究者认为语言距离能够调节双语的脑区激活差异(Li et al., 2021)。又如, 另一项元分析将语言距离的影响聚焦到第二语言上, 分别对比了母语是汉语和拼音文字的两组双语者的 L2 英语脑区激活, 结果发现汉语母语组更多激活了左侧顶下小叶和额下回, 而拼音文字母语组更多激活了左侧脑岛, 研究者认为两组之

间的脑区激活差异反映了语言距离对语言控制脑区的影响(Cargnelutti et al., 2022)。但是现有研究很少区分任务需求, 导致其内在的影响机制还不清楚。

研究发现, 任务需求可以调节双语的激活网络, 双语者在完成语音、语义以及执行控制任务时激活了不同的神经网络(Comstock & Oliver, 2021; Sulpizio et al., 2020)。相同双语在不同的任务需求下激活模式也会不同(Ding et al., 2003; Vingerhoets et al., 2003)。例如, 汉-英双语者在完成字形任务时, 两种语言在双侧顶下小叶和双侧中央后回等脑区上存在差异; 在完成语义任务时, 两种语言在左侧额中回、颞中回、右侧额下回等脑区上存在差异(Ding et al., 2003)。特殊计算需求假说认为, 第二语言引起的大脑激活区域与母语的激活区域相同, 第二语言与母语的激活差异只涉及到不同的计算需求(Perani & Abutalebi, 2005)。双语在特定任务下出现的激活差异与相应的计算需求有关, 这种计算需求同时受到自下而上的语言属性和自上而下的任务需求影响(党敏 等, 2024)。因此, 有必要结合任务需求来详细探讨语言距离影响双语加工的内在机制。

有研究者尝试在语音任务下探讨语言距离对双语者词汇加工神经机制的影响, 结果发现 L1 和 L2 的语言距离越近, 双语的脑区激活差异越小。例如, 韩-汉-英三语者在完成视觉词汇押韵判断任务时, 语言距离近的韩语和英语仅在左侧额下回出现了差异激活, 而语言距离远的韩语和汉语涉及了额叶、颞叶、顶叶等多处脑区的差异激活, 从而研究者认为语言距离能够影响语音加工中的双语激活差异(Kim et al., 2016)。语言距离小的两种语言倾向于使用相同的语音加工通路, 激活的语音加工脑区也会更相似。该解释得到了表征相似性分析研究的支持, 维-汉-英三语者在完成视觉词汇命名任务时, 语言距离近的维语和英语在语音加工脑区上的表征相似性要显著大于语言距离远的维语和汉语(Dong et al., 2021)。上述研究表明, 在语音任务中, 语言距离近的双语使用了相似的语音加工通路, 激活的脑区也更相似。

目前, 尚未有研究在语义任务中系统考察语言距离对双语者大脑激活模式的影响。已有研究发现, 在语义任务需求下, L1 会激活更多语义加工相关脑区, 而 L2 会激活更多执行控制脑区(Comstock & Oliver, 2021; Sulpizio et al., 2020)。这一差异可能与双语者 L1 和 L2 的正字法深度及语言距离有关。根据正字法深度假说, 浅层正字法文字(如英语、西班牙语等拼音文字)因其字形-语音对应规则性较强, 读者更倾向于通过语音中介通达语义(Braun et al., 2009; Tan & Perfetti, 1999); 而深层正字法文字(如汉字)由于字形-语义映射更为直接, 读者可能优先依赖字形信息进行语义加工(Han & Bi, 2009; Law et al., 2006)。故而, 双语之间的语言距离可能会影响双语者在语义加工任务中涉及的语义神经通路, 语言距离可能成为影响双语者加工 L1 和 L2 脑区激活差异的重要因素。

语言控制加工是双语研究者广泛关注的问题。语言距离如何影响双语者的语言控制还存在着争论，形成了两种对立的假说。一种是跨语言干扰假说(Coderre & van Heuven, 2014; Radman et al., 2021)，认为双语者的 L1 和 L2 语言距离越小，双语之间的干扰作用越强，就需要更多的语言控制资源。研究者对比了不同语言距离双语者在执行控制任务上的行为和脑电反应，结果发现语言距离近的双语者反应时更短、脑电波幅更大，表明语言距离近的双语者有更强的执行控制参与(Coderre & van Heuven, 2014; Radman et al., 2021)。另一种相反的观点是跨语言促进假说(Costa et al., 2008; Finkbeiner et al., 2006)，该假说认为语言距离越小，共享的语言表征就越多，从而促进了语言选择过程，需要的语言控制资源越少。例如，研究者发现语言距离远的双语者需要更多的注意控制和语言切换资源(Linck et al., 2008)。

但是，通过实证研究很难在一个具体的实验设计中考察语言距离与实验任务的共同作用。而元分析方法可以整合多项研究数据，同时考察多个变量的影响，能够有效解析多因素交互作用下的复杂科学问题(Eickhoff et al., 2009)。同时，元分析通过对大量研究报告的脑区激活坐标进行定量统计分析，识别空间模式的一致性，进而减少研究间异质性，提高结论的稳健性和可重复性(Fox & Parsons, 1998; Wager et al., 2005)。已有研究尝试使用元分析方法考察了语言距离对双语加工的影响。例如，Li 等人(2021)考察了语言距离对双语者阅读脑区激活的调节作用。另一项元分析考察了语言距离影响语言控制脑区的激活(Cargnelutti et al., 2022)。然而，上述研究没有区分任务需求，导致语言距离影响双语加工的内在机制还不清楚。研究表明，任务需求可以调节双语激活的神经网络(Sulpizio et al., 2020)。最近的多变量分析研究也发现，任务需求会引起双语神经激活模式的变化，表明在探讨双语加工的神经机制时，任务需求是需要关注的重点变量(Li et al., 2023)。

因此，本研究使用元分析方法同时考察语言距离和任务需求对双语者词汇加工脑区激活的影响。具体通过对比语言距离远的汉-英双语者和语言距离近的拼音文字双语者在语音、语义和语言切换任务上的脑区激活，深入揭示语言距离和任务需求影响双语加工的内在机制。结合不同任务的加工需求以及 L1 与 L2 的语料属性差异，可以预期：(1)在语音任务中，语言距离近的拼音文字双语者由于 L1 和 L2 都依赖形-音转换加工，两种语言在语音加工脑区上的激活差异较小，而语言距离远的汉-英双语者会表现出更大的脑区激活差异。(2)在语义任务中，语言距离远的双语者加工 L1 和 L2 涉及不同的加工通路，从而在语义加工脑区上会表现出更大的差异。(3)在语言切换任务中，通过对比两类双语者在语言控制相关脑区的激活差异，尤其是在额叶和顶叶等认知控制脑区上的差异，考察 L1 和 L2 的语言相似性究竟是起到了促进还是干扰作用，从而进一步检验跨语言干扰假说与跨语言促进假说。

2 方法

2.1 文献筛选

使用“bilingual、双语者”和“neuroimaging、神经成像”为关键词在数据库中(Web of science, PubMed, CNKI)对发表在 2023 年 5 月之前的研究进行检索。

元分析的研究文献经过纳入和排除两个步骤进行筛选。检索纳入文献的标准：(1)研究的发表时间在 1990~2023 年之间；(2)实验任务关注语音、语义或语言控制加工。(3)实验材料限定为词汇；(4)被试为没有阅读障碍的健康双语者。经过对脑成像结果的浏览，按以下标准进一步排除文献：(1)被试是双模态双语者；(2)激活坐标报告不完整(如兴趣区分析)或没有报告；(3)条件对比不符合我们的研究兴趣。最后筛选出了 74 篇符合要求的研究文献。

2.2 质量评估

为了评估纳入研究的文献质量，我们根据神经影像学领域的最佳实践报告标准(COBIDAS 报告; <https://www.humanbrainmapping.org/i4a/pages/index.cfm?pageid=3728>), 建立了一套包含 4 个维度、12 个条目的质量评估标准。该标准涵盖：(1)实验设计(样本量报告、任务控制、组间匹配)；(2)数据处理与预处理(流程透明度、空间标准化、头动控制)；(3)统计分析(多重比较校正、软件报告、模型合理性)；(4)结果报告与透明度(坐标完整性、空间一致性、数据共享声明)。每条标准的满足情况以“是/否”记录。结果显示，绝大多数文献(81.1%，60/74)为高质量(得分 ≥ 10)，其余(18.9%，14/74)为中等质量(得分 7~9)。该结果从方法学层面为本元分析结论的稳健性提供了支持。

2.3 文献分类

我们主要关注双语者完成语音、语义加工以及语言切换三种实验任务的脑机制。语音加工主要聚焦于对词汇语音信息的提取和分析，包括押韵判断、出声阅读、同音词匹配等任务(Wu et al., 2012)；语义加工主要聚焦于对词汇语义的提取和分析，包括语义判断、词汇判断、语义产生等任务(Vigneau et al., 2006)；双语切换任务主要关注双语切换过程涉及的执行控制成分，因此研究任务相对固定，主要是语言切换任务(Tao et al., 2021)。

根据双语者的母语和二语情况，我们主要对比两类双语者：语言距离远的汉-英双语者和语言距离近的拼音文字双语者(Cargnelutti et al., 2022; Li et al., 2021)。拼音文字双语者不限定特定的语言，只要母语和二语同属于拼音文字系统即可，虽然英语与透明文字(西班牙语)相比，属于更深层的正字法，但是它们都具有系统的形-音对应规则，这里也将掌握这两种语言的双语者划分为语言距离更近的双语者。

根据实验任务和被试类型的划分,进一步将 74 篇文献分为六组:18 篇汉-英双语者的语音加工,12 篇拼音文字双语者的语音加工;12 篇汉-英双语者的语义加工,13 篇拼音文字双语者的语义加工;9 篇汉-英双语者的语言切换加工;14 篇拼音文字双语者的语言切换加工(附表 1)。其中,有 4 篇文献因其研究设计的多重属性,被同时归入了两个相关但不同的组别:Kim 等人(2017)同时属于汉-英双语者的语音加工组和拼音文字双语者的语音加工组;Wang, Y. 等人(2007)同时属于汉-英双语者的语音加工组和汉-英双语者的语义加工组;Klein 等人(1995)和 Jung 等人(2018)同时属于拼音文字双语者的语音加工组和拼音文字双语者的语义加工组。

2.4 数据分析

本研究采用基于坐标的元分析方法。所有分析均使用 GingerALE 3.0.2 软件(获取途径:<http://www.brainmap.org/ale>)完成。该软件通过激活似然估计算法,探测多项独立研究中功能激活坐标在空间上的收敛性,从而识别在不同研究中稳定激活的脑区(Eickhoff et al., 2012; Eickhoff et al., 2009)。我们从纳入的文献中提取了被试量与激活坐标。在 ALE 算法中,各研究的被试量用于加权,以调整其对最终概率分布图的影响;而激活坐标则被映射至标准脑空间的具体体素上。为确保所有坐标处于统一空间,对于原始报告为 MNI 坐标的研究,我们使用 GingerALE 3.0.2 软件内置的“MNI to Talairach”工具将其统一转换为 Talairach 坐标体系。参考 ALE 元分析软件使用手册(<http://www.brainmap.org/ale/manual.pdf>)和前人文献(Cargnelutti et al., 2022; Li et al., 2021),具体的元分析包括以下两部分:

首先,我们进行了条件激活分析。条件激活可以计算特定条件下的功能激活(如汉-英双语者在语音加工中的 L1 激活和 L2 激活)。本研究分别计算了两类双语者在语音、语义任务下的 L1 和 L2 的激活体素簇,以及两类双语者在语言切换任务下的激活体素簇。条件激活的阈限设置在簇水平的 FWE 校正 $p < 0.05$ (置换次数为 1000 次,体素水平 $p < 0.005$)。

然后,我们进行了对比分析。对比分析旨在比较两种条件下的激活脑图,可以得到两种条件的共同激活脑区和差异激活脑区(如汉-英双语者在语音任务中 L1 和 L2 共同激活的脑区、L1 更多激活的脑区和 L2 更多激活的脑区)。对比分析的阈限设置在体素水平 $p < 0.05$,置换次数为 10,000 次,簇体积要求在 100mm^3 以上。

元分析的结果使用 BrainNet Viewer 软件(获取途径:<http://www.nitrc.org/projects/bnv>)和 xjview 软件(获取途径:<https://www.alivelearn.net/xjview>)绘制可视化的激活脑图,BrainNet Viewer 中使用的模板是 the BrainMesh_ICBM152_smoothed_tal.nv(Xia et al., 2013)。

3 结果

3.1 语音任务

语音加工任务的元分析脑区激活如图 1 所示，两类双语者加工 L1 和 L2 词汇的脑区激活对比分析结果详见表 1。

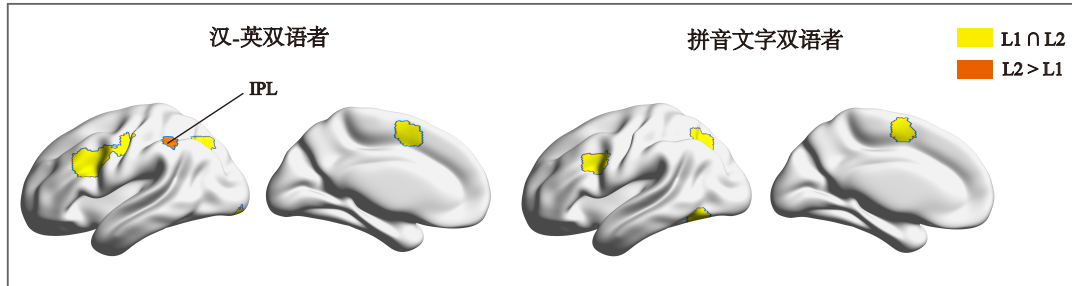


图 1 语音任务中两类双语者的双语激活脑图

注：图为语音任务中两类双语者的双语激活脑区，图中所激活的脑区达到了显著激活水平。左边是汉-英双语者，右边是拼音文字双语者。黄色区域代表 L1 与 L2 共同激活的脑区，橙色区域代表 L2 比 L1 多激活的脑区。IPL: inferior parietal lobule, 顶下小叶。

表 1 语音任务中的双语激活脑区

激活类型	脑区	半球	BA区	中心坐标			体积 /mm ³	ALE值(×10 ⁻²)
				X	Y	Z		
汉-英双语者								
L1 ∩ L2	中央前回/额中回/额下回	左	9/6	-43.1	6.4	31.1	3520	1.81
	楔前叶/顶上小叶	左	39/19/7	-27.8	-60.3	37.3	2224	2.26
	额内侧回/额上回	左/右	6	-3.3	4.6	51.9	1984	2.05
	舌回/枕中回	右	18/17	18.6	-85.2	-6.8	1256	1.93
	枕下回/枕中回	左	18	-25.5	-86.7	-6.5	248	1.00
L2 > L1	顶下小叶/缘上回	左	40	-42.8	-41.8	39.9	1040	2.19
拼音文字双语者								
L1 ∩ L2	额下回/中央前回	左	9/6	-44.2	7.7	28.4	1448	1.39
	额内侧回	左/右	6	-2.9	-2.6	55.6	1344	1.75
	梭状回	左	37/19	-43.5	-61.7	-11.5	1232	1.37
	顶上小叶	左	7	-25.6	-63.3	43	904	1.40

汉-英双语者加工汉语与英语词汇激活的脑区交集主要有五个簇：左侧的中央前回/额中回/额下回、楔前叶/顶上小叶、枕下回/枕中回，双侧额内侧/额上回、以及右侧舌回/枕中回。结果没有发现汉语比英语更多激活的脑区，而加工英语比加工汉语词汇更多激活了左侧顶下小叶/缘上回，该脑区被报告为负责拼音文字的形-音对应转换加工(Mei et al., 2015)。

拼音文字双语者加工母语与二语词汇共同激活了左侧大脑的四个簇：额下回/中央前回、额内侧回、梭状回、以及顶上小叶。没有发现加工母语和二语词汇独特激活的脑区。

3.2 语义任务

语义加工任务的元分析脑区激活如图 2 所示，两类双语者加工 L1 和 L2 词汇的脑区激活对比分析结果详见表 2。

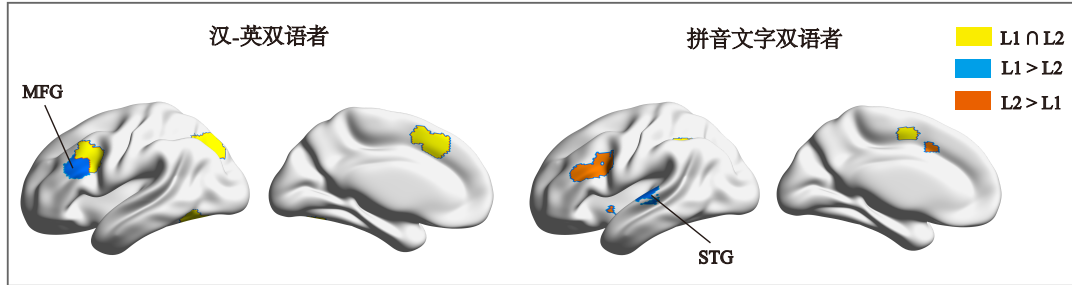


图 2 语义任务中两类双语者的双语激活脑图

注：图为语义任务中两类双语者的双语激活脑区，图中所激活的脑区达到了显著激活水平。左边是汉-英双语者，右边是拼音文字双语者。黄色区域代表 L1 与 L2 共同激活的脑区，蓝色区域代表 L1 比 L2 多激活的脑区，橙色区域代表 L2 比 L1 多激活的脑区。MFG: middle frontal gyrus, 额中回；STG: superior temporal gyrus, 颞上回。

表 2 语义任务中的双语激活脑区

激活类型	脑区	半球	BA区	中心坐标			体积 /mm ³	ALE值(×10 ⁻²)
				X	Y	Z		
汉-英双语者								
L1 ∩ L2	额上回/扣带回/额内侧回	左/右	8/32/6	-1.5	20.7	44.1	2888	2.19
	楔前叶/顶上小叶	左	19/7	-27	-67.4	40.4	1704	1.24
	中央前回/额中回/额下回	左	9	-38.2	10.2	30.9	1384	1.47
	梭状回	左	37/19	-42.6	-58.8	-13.2	944	1.30
	额内侧回	左	32	-2	6	46	8	0.77
L1 > L2	额中回	左	9/46	-43.6	21.4	26.3	1608	2.49
	楔前叶	左	7	-23.8	-66.8	37	104	1.82
拼音文字双语者								
L1 ∩ L2	额内侧回	左/右	6	-3.4	-4	51.6	528	1.37
	顶下小叶	左	40	-30.8	-48.9	37.5	520	1.01
L1 > L2	颞上回	左	41/42	-55.4	-18.6	6.8	656	2.33
L2 > L1	额下回/额中回	左	9/46	-46.4	16.2	26.5	1176	2.19
	顶下小叶	左	40	-42.4	-44.3	39.7	320	2.34
	脑岛/额下回	左	13/47	-42.1	9.9	-3.5	240	1.77
	额内侧回	左	32	-13.3	13.5	41.9	128	2.11

汉-英双语者在加工汉语和英语词汇的语义信息时，共同激活了左侧大脑的五个簇：额上回、楔前叶/顶上小叶、中央前回/额中回/额下回、梭状回、以及额内侧回。加工汉语词汇的语义比英语多激活了左侧的额中回与楔前叶，而加工英语词汇语义没有比加工汉语更多激活的脑区。

拼音文字双语者在加工语义任务时，L1 与 L2 共同激活了左侧额内侧回和顶上小叶；母语词汇要比 L2 词汇的语义加工更多激活左侧颞上回，而 L2 词汇要比母语词汇的语义加工更多激活左侧额中回/额下回、顶下小叶、脑岛/额下回、以及额内侧回。

3.3 语言切换任务

汉-英双语者与拼音文字双语者的共同激活脑区以及两类双语者的独特激活脑区如图 3 所示，具体激活脑区详见表 3。

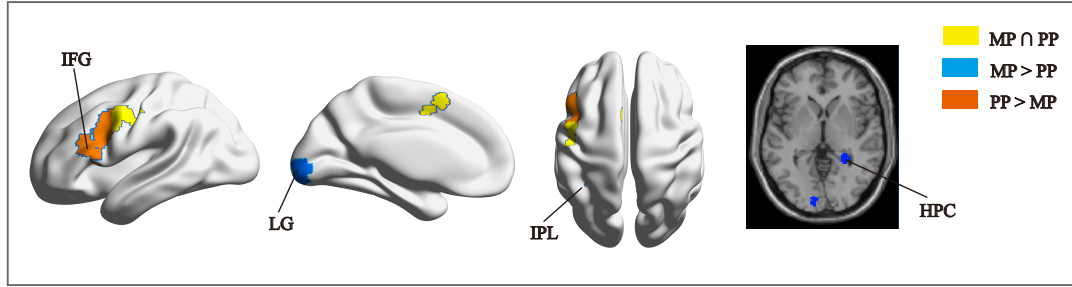


图 3 语言切换任务中两类双语者的脑区激活对比

注：图为语言切换任务中两类双语者的激活对比，图中所激活的脑区达到了显著激活水平。MP 是指汉-英双语者(morphogram & phonogram)，PP 是指拼音文字双语者(phonogram & phonogram)。黄色区域代表两类双语者共同激活的脑区，蓝色区域代表汉-英双语者更多激活的脑区，橙色区域代表拼音文字双语者更多激活的脑区。IFG: inferior frontal gyrus, 额下回；LG: lingual gyrus, 舌回；IPL: inferior parietal lobule, 顶下小叶；HPC: hippocampus, 海马。

表 3 语言切换任务中汉-英双语者与拼音文字双语者的激活对比

激活类型	脑区	半球	BA区	中心坐标			体积/mm ³	ALE值(×10 ⁻²)
				X	Y	Z		
MP ∩ PP	中央前回/额中回	左	6/4	-47.6	-2.6	39.4	648	1.07
	额上回/额内侧回	左/右	6	-2.4	7.8	50.8	520	0.97
	扣带回	左	24	-10.7	-0.3	46.6	48	0.83
MP > PP	尾状核/海马	右	19	27	-42.6	4.2	1632	2.59
	舌回	左	17	-12.9	-93.7	-4.8	848	1.96
PP > MP	额中回/额下回	左	9/6	-42.1	8.4	31.3	2408	2.93
	额下回/额中回	左	45/44/46	-46	23	16.4	720	2.11
	顶下小叶	左	40	-33.5	-47.6	36.5	184	1.77

两类双语者在完成双语切换任务时共同激活左侧大脑的中央前回/额中回、额上回/额内侧回和扣带回。汉-英双语者更多激活了右侧海马和左侧舌回，而拼音文字双语者要更多激活左侧额中回/中央前回、额下/额中回和顶下小叶。

4 讨论

本研究使用元分析方法，考察了不同实验任务下双语者 L1 和 L2 的语言距离对于双语词汇加工脑机制共享程度的影响。结果发现双语者 L2 与 L1 的语言距离越接近，共享的脑区激活越多，而实验任务会调节共享程度。具体表现为语音任务中，语言距离远的汉-英双语者加工 L2 要比 L1 激活更多的左侧顶下小叶/缘上回；语言距离近的拼音文字双语者 L1 和 L2 激活了相同的神经网络。在语义任务中，汉-英双语者 L1 相较 L2 更多激活了左侧额中回和左侧楔前叶；拼音文字双语者 L1 更多激活了左侧颞上回中部，L2 更多激活了左侧额下回/额中回、脑岛和顶下小叶等语言控制脑区。语言切换任务也发现拼音文字双语者需要更多的执行控制脑区参与激活。结果表明：任务需求自上而下地调节了神经网络的激活，语言距离自下而上地影响了语言加工和语言控制，深入分析揭示任务需求和语言距离共同调控了潜在的加工需求，因此，实质上是潜在的加工需求动态调节了双语者词汇加工的脑机制。下面进行详细讨论：

4.1 语音任务中的双语脑区激活

本研究在语音任务中发现，语言距离远的汉-英双语者 L2 更多激活了左侧顶下小叶/缘上回；语言距离近的拼音文字双语者 L1 和 L2 激活了相同的神经网络。这与以往发现相一致，Kim 等人(2016)对比了语言距离近的韩语和英语以及语言距离远的韩语和汉语在视觉词汇押韵判断任务上的脑区激活，结果发现语言距离近的韩语和英语，其脑区激活差异也更小。本研究也发现语言距离近的拼音文字双语者 L1 和 L2 激活了相同的神经网络。结果说明在语音任务上，语言距离越近，双语使用的语音加工通路越相似，从而激活的脑区差异也更小。

Mei 等人的研究发现左侧顶下小叶/缘上回是背侧语音通路的重要脑区，主要负责亚词汇形-音转换，对英语等拼音文字的语音加工很重要(Mei et al., 2015; Mei et al., 2014)。汉-英双语者在加工母语语音时，受汉字表义属性的影响，倾向于使用词汇通路来直接提取整字语音(Tan et al., 2005)；但是在加工英语这类表音文字时，就需要更多使用亚词汇通路来进行形-音转换(Tham et al., 2005)。故而，汉-英双语者在加工 L2 语音时会更多激活负责亚词汇形-音转换的左侧顶下小叶/缘上回(Xue et al., 2017; You et al., 2011)。

4.2 语义任务中的双语脑区激活

在语义任务中，汉-英双语者相较于 L2，在加工 L1 时更多激活了左侧额中回和左侧楔前叶；拼音文字双语者的 L1 加工更多激活了左侧颞上回中部，L2 更多激活了左侧额下回/额中回、脑岛和顶下小叶等语言控制脑区。Sulpizio 等人(2020)的元分析研究也发现，语音

任务中的双语激活差异较小,而语义任务中的双语激活差异较大。具体来说,在语义任务中L1更多激活了语义加工脑区,L2更多激活了语言控制脑区,本研究的结果也支持这一发现。

对于左侧额中回的功能,有研究发现其对应于语义加工(Tan et al., 2000)或字形通达语义的加工(Tan et al., 2001; Wu et al., 2012),而左侧楔前叶负责字形加工(Liu & Cao, 2016; Sun et al., 2015)。本研究在汉-英双语者加工母语时发现左侧楔前叶与左侧额中回的共同激活,支持了此脑区回路负责字形通达语义的功能。汉字作为表义文字,形-义映射更为突出,更依赖字形通达语义的加工通路(Han & Bi, 2009),所以汉-英双语者的L1会更多激活与形-义映射有关的左侧额中回和与字形加工有关的左侧楔前叶。左侧颞上回中部连接了负责初级语音分析的颞上回后部和语义枢纽脑区前颞叶,因此有研究认为左侧颞上回中部可能参与语音-语义转换(Hickok, 2022)。拼音文字的形-音映射更规则,更多使用语音通达语义(Braun et al., 2009),因而拼音文字双语者的L1加工会更多激活负责语音-语义转换的左侧颞上回中部。

值得注意的是,在语义任务中还发现拼音文字双语者的L2更多激活了左侧额下回/额中回、脑岛和顶下小叶等执行控制脑区。左侧额下回对任务难度敏感(Abutalebi et al., 2008),左侧额中回负责冲突解决和注意调整(Badre & Wagner, 2004),左侧脑岛参与干扰抑制(Wager et al., 2005),左侧顶下小叶与基于刺激的语言冲突有关(van Heuven et al., 2008)。相关研究也发现非优势语言L2需要更多的执行控制资源来保障语言理解和语言产出的顺利进行(Abutalebi et al., 2008; Hou et al., 2024)。本研究发现,相比于语音任务,语义任务中L2引起了执行控制网络的更强激活,可能与任务难度有关(Dräger et al., 2004)。本研究的语音任务主要是出声阅读、押韵判断等,任务难度相对较低,需要的执行控制资源较少;而语义任务主要是词汇判断、语义判断等,被试需要调用更多的执行控制资源来完成决策过程,激活的语言控制脑区(如额顶控制网络)也更广泛。

4.3 语言切换任务中两类双语者的脑区激活对比

更重要的是,本研究还在语言切换任务中发现了语言属性对双语执行控制的影响,表现为语言距离近的拼音文字双语者更多激活了包括左侧额下回、额中回、顶下小叶在内的额顶控制网络。这一结果进一步支持了语义任务上拼音文字双语者L2更多激活语言控制脑区的发现,表明语言距离近的拼音文字双语者需要更多的执行控制资源。

以往研究对比了不同语言距离双语者在执行控制任务上的行为和脑电反应,结果发现语言距离近的双语者反应时更短、脑电波幅更大,表明语言距离近的双语者有更强的执行控制参与(Coderre & van Heuven, 2014; Radman et al., 2021)。本研究在神经影像学层面发现拼音文字双语者激活了更多额顶控制脑区,这一结果与前人结果共同支持了跨语言干扰假说,表

明语言距离近的双语者面临的跨语言干扰更强，需要的执行控制资源更多。

此外，本研究还发现汉-英双语者在语言切换任务中更多激活了左侧舌回和右侧海马/尾状核。Sun 等人(2015)的研究发现左侧舌回参与了视觉正字法分析，汉-英双语者在这个脑区的更强激活可能反映了两种语言间较大的正字法差异。而海马与陈述性记忆有关(Ullman, 2001)，尾状核与语言选择和监控有关(Crinion et al., 2006)，前人研究发现当 L2 的熟练度较低时，左侧尾状核的激活更强，表现为对两种语言加工切换的更努力的选择与监控功能(Abutalebi et al., 2013; Mouthon et al., 2020)。本研究发现语言距离较远的汉-英双语者在右侧尾状核的激活，同样反映了其对于两种语言更多的切换监控(Luk et al., 2011)。

需要提及的是，本研究发现的语言距离效应并不能完全排除熟练度的潜在影响。虽然本研究通过语言距离分组(Cargnelutti et al., 2022; Li et al., 2021)，观察到两组双语者的脑区激活差异。但由于缺乏统一的熟练度评估标准来对两组双语者进行直接比较，这一结果无法完全排除熟练度的潜在影响。熟练度反映了学习者对目标语言的知识掌握和运用能力，语言距离则反映的是两种语言的相似性程度。目前，熟练度对双语加工的影响形成了相对共识。研究表明，与高熟练双语者相比，低熟练双语者需要的注意、选择资源更多(Cargnelutti et al., 2019; Grant et al., 2015; Sebastian et al., 2011)。本研究在语义任务和语言切换任务中均发现拼音文字双语者更多地激活了左侧额下回、额中回、顶下小叶。以往研究发现，左侧额下回和额中回对语音竞争敏感(Hsieh et al., 2017; Matsuo et al., 2010)，左侧顶下小叶与基于刺激的语言冲突有关(van Heuven et al., 2008)。因此，本研究的发现可能更多反映了拼音文字双语者因较近的语言距离导致的跨语言干扰更强，而非低熟练度导致的注意和选择资源增加。未来研究可以区分被试的熟练度，以进一步理清两变量对双语脑机制的独立及交互影响。

4.4 潜在加工需求动态调节了双语者词汇加工的脑机制

本研究发现双语在词汇加工中的脑区激活差异与特定任务中的潜在加工需求不同有关。如，负责亚词汇形-音转换的左侧顶下小叶/缘上回(Mei et al., 2015)，对英语等拼音文字的语音加工极为重要，因而在语音任务中汉-英双语者加工 L2 时更多激活了该脑区。又如，左侧额中回与汉字的形-义映射有关(Wu et al., 2012)，对汉字的语义通达十分关键。故而在语义任务中汉-英双语者的 L1 更多地激活了该脑区。由此可见，实质上是潜在的加工需求动态调节了双语者词汇加工的脑机制。

同时，潜在的加工需求受到了加工任务和刺激属性的共同调控，表现为阅读相关脑区的激活同时受到加工任务和刺激属性的交互作用的影响(Pattamadilok et al., 2017; Yang et al., 2012)。如，语言控制脑区的激活受到了任务需求和语言距离的共同影响，因此仅在语义任

务和语言切换任务中发现了语言距离近的拼音文字双语者在额顶控制脑区有更强的激活。结果表明，双语词汇加工的神经机制是动态适应任务需求和刺激属性的结果，受到加工任务和刺激属性的共同调节。

综上，本研究从语言属性与加工任务交互的角度探讨了双语词汇加工的神经机制，发现双语者的词汇加工既表现出跨语言的普遍性，又存在语言特异性。这种动态激活的核心在于任务需求和语言属性的交互作用，二者共同影响了潜在的加工需求，导致双语之间出现了动态的激活差异。近年来，采用多变量分析方法(如 MVPA、RSA 等)的研究也发现，双语激活了重叠的大脑区域，但在更细致的体素表征模式上是相互独立的(Brignoni-Perez et al., 2020; Xu et al., 2017)，并且这种表征模式是动态变化的，受到语言属性(Dong et al., 2021; Hou et al., 2024; Lin et al., 2024)、任务需求(Li et al., 2023)等因素的调节。本研究从脑区激活层面揭示了双语共享相同的神经基础，双语之间的激活差异受潜在加工需求的动态调节。

4.5 本研究理论贡献

本研究结合元分析方法，探讨了语言距离与任务需求对双语者词汇加工神经机制的影响，研究结果为特殊计算需求假说(Perani & Abutalebi, 2005)提供了证据支持。该假说指出，第二语言引起的大脑激活区域与母语的激活区域相同，第二语言与母语的激活差异只涉及到不同的计算需求。本研究发现语音任务中拼音文字双语者的两种语言激活了相同的大脑区域，表明潜在的加工需求相同时，双语激活的大脑区域也相同。并且，本研究还发现汉-英双语者在语音任务中 L2 更多激活了与形音转换有关的左侧缘上回(Mei et al., 2015)，在语义任务中 L1 更多激活了负责形-义映射的左侧额中回(Wu et al., 2012)，说明双语之间的激活差异与不同语言在特定任务中的计算需求有关。

研究结果还为理解语言普遍观(Feng et al., 2020; Nakamura et al., 2012; Rueckl et al., 2015)和语言特异观(Brennan et al., 2013; Zhan et al., 2023; Zhao et al., 2014)提供了双语层面的见解。语言普遍观认为不同书写系统的文字存在一种普遍性的阅读机制，本研究发现双语者的两种语言激活了典型的语言加工脑区，表明不同语言涉及的神经基础相同。语言特异观则认为不同书写系统的文字会发展出特异性的阅读机制，本研究发现汉-英双语者会激活特定的脑区来适应文字的独特属性。最近的一项研究也指出，尽管存在所有书写系统共有的加工原则，但不同书写系统的读者会自然地适应特定的文字，以便高效地理解书面文本(Li et al., 2022)。本研究为此观点提供了神经层面的证据，丰富了对语言加工的认识。

4.6 局限与展望

本研究还存在以下问题需要深入探讨：

首先，我们发现了语言距离与任务需求存在交互作用，但 ALE 元分析本质上是一种对条件激活进行估计和对比的方法，无法像实验研究那样在统一的统计模型中直接估计“语言距离×任务需求”的交互效应。我们关于交互作用的推论，主要基于对不同条件的对比分析，而后进行间接的逻辑整合与解释。未来研究可以通过更精细的实验设计，结合多因素方差分析来进行更直接的实证检验，从而推动该领域走向更深入的研究阶段。

其次，ALE 元分析只能提供脑区激活层面的信息，无法进一步探讨脑区间的功能协作。近年来，脑网络分析研究发现，双语经验可能伴随着更高效、更灵活的大脑网络重组与配置 (Feng et al., 2015; Wu et al., 2019)。例如，有研究发现，虽然双语者和单语者激活了相同的脑区，但在功能连接层面，双语者在左侧颞上回与左侧舌回、左侧额中回与左侧前扣带回之间有更强的功能连接 (Brignoni-Pérez et al., 2022)。此外，还有研究发现双语经验带来了语言脑区内部 (Oliver et al., 2017)、语言脑区与执行控制脑区 (Gurunandan et al., 2019) 之间功能连接的变化。未来研究可以将本研究发现的受潜在加工需求调节的脑区作为重点关注脑区，进一步探讨潜在加工需求对脑区间功能协作的影响。

再者，本研究主要关注的是词汇层面的加工，研究结论是否能推广到句子、篇章水平还有待验证。以往研究发现，随着阅读单位由词汇向更自然的句子、篇章过渡，读者会更重视大单元的语义、语法整合，词汇等小单元的语音、语义通达则会更加自动化，从而跨语言的差异会变小 (Wang et al., 2015)。未来研究可以通过对比不同阅读单位的双语激活来进一步展开研究，对双语加工的神经机制进行更加细致的探讨。

最后，双语执行控制是研究者广泛关注的问题 (Abutalebi et al., 2008; Liu et al., 2020; Tao et al., 2021)，虽然本研究为语言距离影响双语执行控制提供了初步证据，但受限于实验范式的单一性，研究结论的普适性有待验证。未来研究可以结合熟练度以及不同的实验范式 (如注意选择、干扰抑制) 对此问题进行更加深入、全面的分析。同时，语言切换与语音、语义等语言属性的相关较低，该任务上发现的跨语言差异究竟反映了何种需求值得我们反思。

5 结论

本研究同时关注语言距离和任务需求，使用元分析方法详细探讨了汉-英双语者和拼音文字双语者在语音、语义和语言切换中的脑区激活。通过对比两类双语者在不同任务需求下的双语激活，我们发现语言距离越近，双语者在语音、语义等语言加工脑区上的激活差异越小，但面临的执行控制需求更高。研究结果为语言距离和任务需求共同影响双语加工的神经机制提供了新的研究证据。

参考文献

(*为纳入元分析文献)

- *Abou-Ghazaleh, A., Khateb, A., & Nevat, M. (2020). Language Control in Diglossic and Bilingual Contexts: An Event-Related fMRI Study Using Picture Naming Tasks. *Brain Topography*, 33(1), 60–74.
- *Abutalebi, J., Annoni, J. M., Zimine, I., Pegna, A. J., Seghier, M. L., Lee-Jahnke, H., Lazeyras, F., Cappa, S. F., & Khateb, A. (2008). Language control and lexical competition in bilinguals: An event-related fMRI study. *Cerebral Cortex*, 18(7), 1496–1505.
- Abutalebi, J., Della Rosa, P. A., Ding, G. S., Weekes, B., Costa, A., & Green, D. W. (2013). Language proficiency modulates the engagement of cognitive control areas in multilinguals. *Cortex*, 49(3), 905–911.
- *Abutalebi, J., Della Rosa, P. A., Green, D. W., Hernandez, M., Scifo, P., Keim, R., Cappa, S. F., & Costa, A. (2012). Bilingualism Tunes the Anterior Cingulate Cortex for Conflict Monitoring. *Cerebral Cortex*, 22(9), 2076–2086.
- Badre, D., & Wagner, A. D. (2004). Selection, integration, and conflict monitoring: Assessing the nature and generality of prefrontal cognitive control mechanisms. *Neuron*, 41(3), 473–487.
- *Bartolotti, J., Bradley, K., Hernandez, A. E., & Marian, V. (2017). Neural signatures of second language learning and control. *Neuropsychologia*, 98, 130–138.
- *Boukrina, O., Hanson, S. J., & Hanson, C. (2014). Modeling Activation and Effective Connectivity of VWFA in Same Script Bilinguals. *Human Brain Mapping*, 35(6), 2543–2560.
- Braun, M., Hutzler, F., Ziegler, J. C., Dambacher, M., & Jacobs, A. M. (2009). Pseudohomophone Effects Provide Evidence of Early Lexico-Phonological Processing in Visual Word Recognition. *Human Brain Mapping*, 30(7), 1977–1989.
- Brennan, C., Cao, F., Pedroarena-Leal, N., McNorgan, C., & Booth, J. R. (2013). Reading Acquisition Reorganizes the Phonological Awareness Network Only in Alphabetic Writing Systems. *Human Brain Mapping*, 34(12), 3354–3368.
- Brignoni-Pérez, E., Jamal, N., & Eden, G. F. (2022). Functional neuroanatomy of English word reading in early bilingual and monolingual adults. *Human Brain Mapping*, 43(14), 4310–4325.
- Brignoni-Perez, E., Jamal, N. I., & Eden, G. F. (2020). An fMRI study of English and Spanish word reading in bilingual adults. *Brain and Language*, 202, 104725.
- *Buchweitz, A., Shinkareva, S. V., Mason, R. A., Mitchell, T. M., & Just, M. A. (2012). Identifying bilingual semantic neural representations across languages. *Brain and Language*, 120(3), 282–289.
- *Cao, F., Khalid, K., Lee, R., Brennan, C., Yang, Y. H., Li, K. C., Bolger, D. J., & Booth, J. R. (2011). Development of brain networks involved in spoken word processing of Mandarin Chinese. *Neuroimage*, 57(3), 750–759.
- *Cao, F., Tao, R., Liu, L., Perfetti, C. A., & Booth, J. R. (2013). High Proficiency in a Second Language is Characterized by Greater Involvement of the First Language Network: Evidence from Chinese Learners of English. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 25(10), 1649–1663.
- Cargnelutti, E., Tomasino, B., & Fabbro, F. (2019). Language Brain Representation in Bilinguals With Different Age of Appropriation and Proficiency of the Second Language: A Meta-Analysis of Functional Imaging Studies. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13, 445658.
- Cargnelutti, E., Tomasino, B., & Fabbro, F. (2022). Effects of Linguistic Distance on Second Language Brain Activations in Bilinguals: An Exploratory Coordinate-Based Meta-Analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, 744489.
- *Chan, A. H. D., Luke, K. K., Li, P., Yip, V., Li, G., Weekes, B., & Tan, L. H. (2008). Neural Correlates of Nouns and Verbs in Early Bilinguals. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1145(1), 30–40.
- *Chee, M. W. L., Hon, N., Lee, H. L., & Soon, C. S. (2001). Relative language proficiency modulates BOLD signal

change when bilinguals perform semantic judgments. *Neuroimage*, 13(6), 1155–1163.

- *Chee, M. W. L., Weekes, B., Lee, K. M., Soon, C. S., Schreiber, A., Hoon, J. J., & Chee, M. (2000). Overlap and dissociation of semantic processing of Chinese characters, English words, and pictures: Evidence from fMRI. *Neuroimage*, 12(4), 392–403.
- *Chen, X. Z., Zhou, L. J., Yang, Q., Xu, S. J., Wang, X. Y., Zhao, C., Lu, J., & Li, K. C. (2012). Functional MRI analysis of semantics processing in skilled Mongolian-Chinese bilingual people. *Chinese Journal of Medical Imaging Technology*, 28(08), 1475–1478.
- *[陈学志, 周连军, 杨倩, 宿淑君, 王晓怡, 赵澄, 卢洁, 李坤成. (2012). 熟练蒙汉双语者语义加工脑机制的 fMRI 分析. *中国医学影像技术*, 28(08), 1475–1478.]
- *Coderre, E. L., Smith, J. F., Van Heuven, W. J. B., & Horwitz, B. (2016). The functional overlap of executive control and language processing in bilinguals. *Bilingualism-Language and Cognition*, 19(3), 471–488.
- Coderre, E. L., & van Heuven, W. J. B. (2014). The effect of script similarity on executive control in bilinguals. *Frontiers in Psychology*, 5, 1070.
- Comstock, L., & Oliver, B. (2021). A meta-analysis of task-based differences in bilingual L1 and L2 language networks. *bioRxiv*, 2021–12.
- Costa, A., Albareda, B., & Santesteban, M. (2008). Assessing the presence of lexical competition across languages: Evidence from the Stroop task. *Bilingualism-Language and Cognition*, 11(1), 121–131.
- Crinion, J., Turner, R., Grogan, A., Hanakawa, T., Noppeney, U., Devlin, J. T., Aso, T., Urayama, S., Fukuyama, H., Stockton, K., Usui, K., Green, D. W., & Price, C. J. (2006). Language control in the bilingual brain. *Science*, 312(5779), 1537–1540.
- Dang, M., Cai, W. Q., Chen, F. K., Wang, X. J., & Yang, J. F. (2024). Dynamic collaboration of reading neural pathways driven by the processing demands. *Advances in Psychological Science*, 32(01), 118–130.
- [党敏, 蔡文琦, 陈发坤, 王小娟, 杨剑峰. (2024). 加工需求驱动下词汇阅读神经通路的动态协作机制. *心理科学进展*, 32(01), 118–130.]
- *Das, T., Padakannaya, P., Pugh, K. R., & Singh, N. C. (2011). Neuroimaging reveals dual routes to reading in simultaneous proficient readers of two orthographies. *Neuroimage*, 54(2), 1476–1487.
- *De Baene, W., Duyck, W., Brass, M., & Carreiras, M. (2015). Brain Circuit for Cognitive Control Is Shared by Task and Language Switching. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 27(9), 1752–1765.
- *de Bruin, A., Roelofs, A., Dijkstra, T., & Fitzpatrick, I. (2014). Domain-general inhibition areas of the brain are involved in language switching: fMRI evidence from trilingual speakers. *Neuroimage*, 90, 348–359.
- *De Grauwe, S., Willems, R. M., Rueschemeyer, S. A., Lemhöfer, K., & Schriefers, H. (2014). Embodied language in first- and second-language speakers: Neural correlates of processing motor verbs. *Neuropsychologia*, 56, 334–349.
- *Ding, G. S., Perry, C., Peng, D. L., Ma, L., Li, D. J., Xu, S. Y., Luo, Q., Xu, D., & Yang, J. (2003). Neural mechanisms underlying semantic and orthographic processing in Chinese-English bilinguals. *Neuroreport*, 14(12), 1557–1562.
- Dong, J., Li, A. Q., Chen, C. S., Qu, J., Jiang, N., Sun, Y., Hu, L. Y., & Mei, L. L. (2021). Language distance in orthographic transparency affects cross-language pattern similarity between native and non-native languages. *Human Brain Mapping*, 42(4), 893–907.
- *Dong, Q., Xue, G., Jin, Z., & Zeng, Y. W. (2004). Brain Response is Shaped by Language Experience : Evidence from an fMRI Study on Beginning Second Language Learners. *Acta Psychologica Sinica*, 36(04), 448–454.
- *[董奇, 薛贵, 金真, 曾亚伟. (2004). 语言经验对大脑激活的影响:来自第二语言初学者的证据(英文). *心理学报*(04), 448–454.]
- Dräger, B., Jansen, A., Bruchmann, S., Förster, A. F., Pleger, B., P'Zwitzerlood, & Knecht, S. (2004). How does the

brain accommodate to increased task difficulty in word finding?: A functional MRI study. *Neuroimage*, 23(3), 1152–1160.

Eickhoff, S. B., Bzdok, D., Laird, A. R., Kurth, F., & Fox, P. T. (2012). Activation likelihood estimation meta-analysis revisited. *Neuroimage*, 59(3), 2349–2361.

Eickhoff, S. B., Laird, A. R., Grefkes, C., Wang, L. E., Zilles, K., & Fox, P. T. (2009). Coordinate-Based Activation Likelihood Estimation Meta-Analysis of Neuroimaging Data: A Random-Effects Approach Based on Empirical Estimates of Spatial Uncertainty. *Human Brain Mapping*, 30(9), 2907–2926.

Feng, G. Y., Chen, H. C., Zhu, Z. D., He, Y., & Wang, S. P. (2015). Dynamic brain architectures in local brain activity and functional network efficiency associate with efficient reading in bilinguals. *Neuroimage*, 119, 103–118.

Feng, X. X., Altarelli, I., Monzalvo, K., Ding, G. S., Ramus, F., Shu, H., Dehaene, S., Meng, X. Z., & Dehaene-Lambertz, G. (2020). A universal reading network and its modulation by writing system and reading ability in French and Chinese children. *Elife*, 9, e54591.

*Ferreira, R. A., Vinson, D., Dijkstra, T., & Vigliocco, G. (2021). Word learning in two languages: Neural overlap and representational differences. *Neuropsychologia*, 150, 107703.

Finkbeiner, M., Gollan, T. H., & Caramazza, A. (2006). Lexical access in bilingual speakers: What's the (hard) problem? *Bilingualism-Language and Cognition*, 9(2), 153–166.

Fox, P. T., & Parsons, L. M. (1998). Beyond the single study: function/location metanalysis in cognitive neuroimaging. *Current Opinion in Neurobiology*, 8(2), 178–187.

*Frenck-Mestre, C., Anton, J. L., Roth, M., Vaid, J., & Viallet, F. (2005). Articulation in early and late bilinguals' two languages: evidence from functional magnetic resonance imaging. *Neuroreport*, 16(7), 761–765.

*Fu, Y. B., Lu, D., Kang, C. Y., Wu, J. J., Ma, F. Y., Ding, G. S., & Guo, T. M. (2017). Neural correlates for naming disadvantage of the dominant language in bilingual word production. *Brain and Language*, 175, 123–129.

*Gao, Y., Wei, N., Wang, Z. K., Jian, J., Ding, G. S., Meng, X. Z., & Liu, L. (2015). Interaction between Native and Second Language Processing: Evidence From A Functional Magnetic Resonance Imaging Study of Chinese-English Bilingual Children. *Acta Psychologica Sinica*, 47(12), 1419–1432.

*[高悦, 魏娜, 王正科, 简洁, 丁国盛, 孟祥芝, 刘丽. (2015). 汉-英儿童双语者母语和二语加工的相互作用: 来自神经机制方面的证据. *心理学报*, 47(12), 1419–1432.]

*Garbin, G., Costa, A., Sanjuan, A., Forn, C., Rodriguez-Pujadas, A., Ventura, N., Belloch, V., Hernandez, M., & Avila, C. (2011). Neural bases of language switching in high and early proficient bilinguals. *Brain and Language*, 119(3), 129–135.

*Golestani, N., Alario, F. X., Meriaux, S., Le Bihan, D., Dehaene, S., & Pallier, C. (2006). Syntax production in bilinguals. *Neuropsychologia*, 44(7), 1029–1040.

Grant, A. M., Fang, S. Y., & Li, P. (2015). Second language lexical development and cognitive control: A longitudinal fMRI study. *Brain and Language*, 144, 35–47.

*Guo, T. M., Liu, H. Y., Misra, M., & Kroll, J. F. (2011). Local and global inhibition in bilingual word production: fMRI evidence from Chinese-English bilinguals. *Neuroimage*, 56(4), 2300–2309.

Gurunandan, K., Carreiras, M., & Paz-Alonso, P. M. (2019). Functional plasticity associated with language learning in adults. *Neuroimage*, 201, 116040.

Han, Z. Z., & Bi, Y. C. (2009). Reading comprehension without phonological mediation: Further evidence from a Chinese aphasic individual. *Science in China Series C-Life Sciences*, 52(5), 492–499.

*Hernandez, A. E. (2009). Language switching in the bilingual brain: What's next? *Brain and Language*, 109(2-3), 133–140.

*Hernandez, A. E., Dapretto, M., Mazziotta, J., & Bookheimer, S. (2001). Language switching and language representation in Spanish-English bilinguals: An fMRI study. *Neuroimage*, 14(2), 510–520.

- *Hernandez, A. E., Woods, E. A., & Bradley, K. A. L. (2015). Neural correlates of single word reading in bilingual children and adults. *Brain and Language*, *143*, 11–19.
- Hickok, G. (2022). The dual stream model of speech and language processing. *Handbook of clinical neurology*, *185*, 57–69.
- Hou, Z. Q., Li, H. H., Gao, L., Ou, J., & Xu, M. (2024). Differential neural representations of syntactic and semantic information across languages in Chinese-English bilinguals. *Neuroimage*, *303*, 120928.
- Hsieh, M. C., Jeong, H., Kawata, K. H. D., Sasaki, Y., Lee, H. C., Yokoyama, S., Sugiura, M., & Kawashima, R. (2017). Neural correlates of bilingual language control during interlingual homograph processing in a logogram writing system. *Brain and Language*, *174*, 72–85.
- *Jiang, M., Jia, W. X., & Yang, L. X. (2010). Cerebral Activation Patterns of fMRI in Uyghur-Chinese Bilinguals. *Journal of Clinical Radiology*, *29*(12), 1688–1692.
- *[姜梅, 贾文霄, 杨利霞, 亚热·艾拜都拉, 朱丽娜, 王红, 石鑫. (2010). 维吾尔族熟练维-汉双语者语言活动区的功能磁共振成像. *临床放射学杂志*, *29*(12), 1688–1692.]
- *Jung, J., Nam, K., Cho, H., & Kim, S. (2018). Mapping the Neural Dynamics of Korean-English Bilinguals With Medium Proficiency During Auditory Word Processing. *Frontiers in Psychology*, *9*, 983.
- *Kang, C. Y., Fu, Y. B., Wu, J. J., Ma, F. Y., Lu, C. M., & Guo, T. M. (2017). Short-Term Language Switching Training Tunes the Neural Correlates of Cognitive Control in Bilingual Language Production. *Human Brain Mapping*, *38*(12), 5859–5870.
- *Kim, S. Y., Liu, L., & Cao, F. (2017). How does first language (L1) influence second language (L2) reading in the brain? Evidence from Korean-English and Chinese-English bilinguals. *Brain and Language*, *171*, 1–13.
- Kim, S. Y., Qi, T., Feng, X. X., Ding, G. S., Liu, L., & Cao, F. (2016). How does language distance between L1 and L2 affect the L2 brain network? An fMRI study of Korean-Chinese-English trilinguals. *Neuroimage*, *129*, 25–39.
- *Klein, D., Milner, B., Zatorre, R. J., Meyer, E., & Evans, A. C. (1995). The neural substrates underlying word generation: a bilingual functional-imaging study. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *92*(7), 2899–2903.
- *Klein, D., Milner, B., Zatorre, R. J., Zhao, V., & Nikelski, J. (1999). Cerebral organization in bilinguals: a PET study of Chinese-English verb generation. *Neuroreport*, *10*(13), 2841–2845.
- *Klein, D., Watkins, K. E., Zatorre, R. J., & Milner, B. (2006). Word and nonword repetition in bilingual subjects: A PET study. *Human Brain Mapping*, *27*(2), 153–161.
- *Köpke, B., Howells, R. K. R., Cortelazzo, F., Péran, P., de Boissezon, X., & Lubrano, V. (2021). Functional and structural differences in brain networks involved in language processing and control in highly proficient early and late bilinguals. *Journal of Neurolinguistics*, *59*, 100988.
- *Koyama, M. S., Stein, J. F., Stoodley, C. J., & Hansen, P. C. (2013). Cerebral mechanisms for different second language writing systems. *Neuropsychologia*, *51*(11), 2261–2270.
- *Kumar, U., Das, T., Bapi, R. S., Padakannaya, P., Joshi, R. M., & Singh, N. C. (2010). Reading different orthographies: an fMRI study of phrase reading in Hindi-English bilinguals. *Reading and Writing*, *23*(2), 239–255.
- Law, S. P., Wong, W., & Kong, A. (2006). Direct access from meaning to orthography in Chinese: A case study of superior written to oral naming. *Aphasiology*, *20*(6), 565–578.
- Li, H. H., Zhang, J., & Ding, G. S. (2021). Reading across writing systems: A meta-analysis of the neural correlates for first and second language reading. *Bilingualism-Language and Cognition*, *24*(3), 537–548.
- Li, H. L., Cao, Y., Chen, C. S., Liu, X. Y., Zhang, S., & Mei, L. L. (2023). The depth of semantic processing modulates cross-language pattern similarity in Chinese-English bilinguals. *Human Brain Mapping*, *44*(5),

2085–2098.

- Li, X. S., Huang, L. J. Q., Yao, P. P., & Hyönä, J. (2022). Universal and specific reading mechanisms across different writing systems. *Nature Reviews Psychology, 1*(3), 133–144.
- Lin, Z. L., Li, X. J., Qi, G. Q., Yang, J. J., Sun, H. Z., Guo, Q. Y., Wu, J. L., & Xu, M. (2024). Phonological properties of logographic words modulate brain activation in bilinguals: a comparative study of Chinese characters and Japanese Kanji. *Cerebral Cortex, 34*(4), bhae 150.
- Linck, J. A., Hoshino, N., & Kroll, J. F. (2008). Cross-language lexical processes and inhibitory control. *The mental lexicon, 3*(3), 349–374.
- Liu, H. H., Kong, C., de Bruin, A., Wu, J. J., & He, Y. Y. (2020). Interactive influence of self and other language behaviors: Evidence from switching between bilingual production and comprehension. *Human Brain Mapping, 41*(13), 3720–3736.
- Liu, H. S., & Cao, F. (2016). L1 and L2 processing in the bilingual brain: A meta-analysis of neuroimaging studies. *Brain and Language, 159*, 60–73.
- *Liu, L. Y., Margoni, F., He, Y. Y., & Liu, H. H. (2021). Neural substrates of the interplay between cognitive load and emotional involvement in bilingual decision making. *Neuropsychologia, 151*, 107721.
- Luk, G., Green, D. W., Abutalebi, J., & Grady, C. (2011). Cognitive control for language switching in bilinguals: A quantitative meta-analysis of functional neuroimaging studies. *Language and cognitive processes, 27*(10), 1479–1488.
- *Luke, K. K., Liu, H. L., Wai, Y. Y., Wan, Y. L., & Tan, L. H. (2002). Functional anatomy of syntactic and semantic processing in language comprehension. *Human Brain Mapping, 16*(3), 133–145.
- *Ma, H. F., Hu, J. H., Xi, J., Shen, W., Ge, J. Q., Geng, F., Wu, Y. T., Guo, J. J., & Yao, D. Z. (2014). Bilingual Cognitive Control in Language Switching: An fMRI Study of English-Chinese Late Bilinguals. *Plos One, 9*(9), e106468.
- Matsuo, K., Chen, S. H. A., Hue, C. W., Wu, C. Y., Bagarinao, E., Tseng, W. Y. I., & Nakai, T. (2010). Neural substrates of phonological selection for Japanese character Kanji based on fMRI investigations. *Neuroimage, 50*(3), 1280–1291.
- Mei, L. L., Xue, G., Lu, Z. L., He, Q. H., Wei, M., Zhang, M. X., Dong, Q., & Chen, C. S. (2015). Native language experience shapes neural basis of addressed and assembled phonologies. *Neuroimage, 114*, 38–48.
- Mei, L. L., Xue, G., Lu, Z. L., He, Q. H., Zhang, M. X., Wei, M., Xue, F., Chen, C. S., & Dong, Q. (2014). Artificial Language Training Reveals the Neural Substrates Underlying Addressed and Assembled Phonologies. *Plos One, 9*(3), e93548.
- *Meng, X. Z., You, H. L., Song, M. X., Desroches, A. S., Wang, Z. K., Wei, N., Tian, M. Y., Gaab, N., & Ding, G. S. (2016). Neural deficits in auditory phonological processing in Chinese children with English reading impairment. *Bilingualism-Language and Cognition, 19*(2), 331–346.
- *Meschyan, G., & Hernandez, A. E. (2006). Impact of language proficiency and orthographic transparency on bilingual word reading: An fMRI investigation. *Neuroimage, 29*(4), 1135–1140.
- Mouthon, M., Khateb, A., Lazeyras, F., Pegna, A. J., Lee-Jahnke, H., Lehr, C., & Annoni, J. M. (2020). Second-language proficiency modulates the brain language control network in bilingual translators: an event-related fMRI study. *Bilingualism-Language and Cognition, 23*(2), 251–264.
- Nakamura, K., Kuo, W. J., Pegado, F., Cohen, L., Tzeng, O. J. L., & Dehaene, S. (2012). Universal brain systems for recognizing word shapes and handwriting gestures during reading. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 109*(50), 20762–20767.
- *Ni, C. B., Lu, G. M., Zhang, Z. Q., Wang, Z. Q., Xu, X. D., & Zhang, Z. Y. (2010). Brain Areas Activated and Cognitive Approaches Adopted in L2 Phonological Process. *Acta Psychologica Sinica, 42*(12), 1156–1165.

- *[倪传斌, 卢光明, 张志强, 王中秋, 徐晓东, 张智义. (2010). 二语语音的识别方式与激活脑区. *心理学报*, 42(12), 1156–1165.]
- Nichols, E. S., & Joanisse, M. F. (2016). Functional activity and white matter microstructure reveal the independent effects of age of acquisition and proficiency on second-language learning. *Neuroimage*, 143, 15–25.
- Oliver, M., Carreiras, M., & Paz-Alonso, P. M. (2017). Functional Dynamics of Dorsal and Ventral Reading Networks in Bilinguals. *Cerebral Cortex*, 27(12), 5431–5443.
- Pattamadilok, C., Chanoine, V., Pallier, C., Anton, J. L., Nazarian, B., Belin, P., & Ziegler, J. C. (2017). Automaticity of phonological and semantic processing during visual word recognition. *Neuroimage*, 149, 244–255.
- Perani, D., & Abutalebi, J. (2005). The neural basis of first and second language processing. *Current Opinion in Neurobiology*, 15(2), 202–206.
- *Pierce, L. J., Chen, J. K., Delcenserie, A., Genesee, F., & Klein, D. (2015). Past experience shapes ongoing neural patterns for language. *Nature Communications*, 6(1), 10073.
- *Pierce, L. J., Klein, D., Chen, J. K., Delcenserie, A., & Genesee, F. (2014). Mapping the unconscious maintenance of a lost first language. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(48), 17314–17319.
- *Price, C. J., Green, D. W., & von Studnitz, R. (1999). A functional imaging study of translation and language switching. *Brain*, 122(12), 2221–2235.
- Radman, N., Jost, L., Dorood, S., Mancini, C., & Annoni, J. M. (2021). Language distance modulates cognitive control in bilinguals. *Scientific Reports*, 11(1), 24131.
- *Rao, C., Mathur, A., & Singh, N. C. (2013). 'Cost in Transliteration': The neurocognitive processing of Romanized writing. *Brain and Language*, 124(3), 205–212.
- *Reverberi, C., Kuhlen, A., Abutalebi, J., Greulich, R. S., Costa, A., Seyed-Allaei, S., & Haynes, J. D. (2015). Language control in bilinguals: Intention to speak vs. execution of speech. *Brain and Language*, 144, 1–9.
- *Rodriguez-Fornells, A., Rotte, M., Heinze, H. J., Nösselt, T., & Münte, T. F. (2002). Brain potential and functional MRI evidence for how to handle two languages with one brain. *Nature*, 415(6875), 1026–1029.
- Rueckl, J. G., Paz-Alonso, P. M., Molfese, P. J., Kuo, W. J., Bick, A., Frost, S. J., Hancock, R., Wu, D. H., Mencl, W. E., Dunabeitia, J. A., Lee, J. R., Oliver, M., Zevin, J. D., Hoeft, F., Carreiras, M., Tzeng, O. J. L., Pugh, K. R., & Frost, R. (2015). Universal brain signature of proficient reading: Evidence from four contrasting languages. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(50), 15510–15515.
- *Sebastian, R., Kiran, S., & Sandberg, C. (2012). Semantic processing in Spanish-English bilinguals with aphasia. *Journal of Neurolinguistics*, 25(4), 240–262.
- Sebastian, R., Laird, A. R., & Kiran, S. (2011). Meta-analysis of the neural representation of first language and second language. *Applied Psycholinguistics*, 32(4), 799–819.
- Shen, Y., & Del Tufo, S. N. (2022). The influence of orthographic depth on multilinguals' neural networks. *Neuropsychologia*, 164, 108095.
- *Stasenko, A., Hays, C., Wierenga, C. E., & Gollan, T. H. (2020). Cognitive control regions are recruited in bilinguals' silent reading of mixed-language paragraphs. *Brain and Language*, 204, 104754.
- *Stein, M., Federspiel, A., Koenig, T., Wirth, M., Lehmann, C., Wiest, R., Strik, W., Brandeis, D., & Dierks, T. (2009). Reduced frontal activation with increasing 2nd language proficiency. *Neuropsychologia*, 47(13), 2712–2720.
- Sulpizio, S., Del Maschio, N., Fedeli, D., & Abutalebi, J. (2020). Bilingual language processing: A meta-analysis of functional neuroimaging studies. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 108, 834–853.
- Sun, Y. F., Peng, D. L., Ding, G. S., Qi, T., Desroches, A. S., & Liu, L. (2015). The Dynamic Nature of Assimilation and Accommodation Procedures in the Brains of Chinese-English and English-Chinese Bilinguals. *Human Brain Mapping*, 36(10), 4144–4157.

- Tan, L. H., Laird, A. R., Li, K., & Fox, P. T. (2005). Neuroanatomical correlates of phonological processing of Chinese characters and alphabetic words: A meta-analysis. *Human Brain Mapping, 25*(1), 83–91.
- Tan, L. H., Liu, H. L., Perfetti, C. A., Spinks, J. A., Fox, P. T., & Gao, J. H. (2001). The neural system underlying Chinese logograph reading. *Neuroimage, 13*(5), 836–846.
- Tan, L. H., & Perfetti, C. A. (1999). Phonological and associative inhibition in the early stages of English word identification: Evidence from backward masking. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 25*(1), 59.
- *Tan, L. H., Rajapakse, J., Hong, W. T., Lee, W. L., & Sitoh, Y. Y. (2004, December). Different hemodynamic responses in Chinese, Romanised Chinese and English reading tasks. In *IEEE International Workshop on Biomedical Circuits & Systems*, Singapore.
- *Tan, L. H., Spinks, J. A., Feng, C. M., Siok, W. T., Perfetti, C. A., Xiong, J. H., Fox, P. T., & Gao, J. H. (2003). Neural systems of second language reading are shaped by native language. *Human Brain Mapping, 18*(3), 158–166.
- Tan, L. H., Spinks, J. A., Gao, J. H., Liu, H. L., Perfetti, C. A., Xiong, J. H., Stofer, K. A., Pu, Y. L., Liu, Y. J., & 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.
- Tao, L., Wang, G. T., Zhu, M. M., & Cai, Q. (2021). Bilingualism and domain-general cognitive functions from a neural perspective: A systematic review. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 125*, 264–295.
- *Tham, W. W. P., Liow, S. J. R., Rajapakse, J. C., Leong, T. C., Ng, S. E. S., Lim, W. E. H., & Ho, L. G. (2005). Phonological processing in Chinese-English bilingual biculturals: An fMRI study. *Neuroimage, 28*(3), 579–587.
- *Tian, M. Y., Chen, B. G., Yang, H. Y., & Bi, H. Y. (2019). Chinese phonological consistency effect in native and second language learners of Chinese: An fMRI study. *Journal of Neurolinguistics, 49*, 202–213.
- Ullman, M. T. (2001). A neurocognitive perspective on language: The declarative/procedural model. *Nature Reviews Neuroscience, 2*(10), 717–726.
- van Heuven, W. J. B., Schriefers, H., Dijkstra, T., & Hagoort, P. (2008). Language Conflict in the Bilingual Brain. *Cerebral Cortex, 18*(11), 2706–2716.
- Vigneau, M., Beaucousin, V., Hervé, P. Y., Duffau, H., Crivello, F., Houdé, O., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2006). Meta-analyzing left hemisphere language areas: Phonology, semantics, and sentence processing. *Neuroimage, 30*(4), 1414–1432.
- *Vingerhoets, G., Van Borsel, J., Tesink, C., van den Noort, M., Deblaere, K., Seurinck, R., Vandemaele, P., & Achten, E. (2003). Multilingualism: an fMRI study. *Neuroimage, 20*(4), 2181–2196.
- Wager, T. D., Sylvester, C. Y. C., Lacey, S. C., Nee, D. E., Franklin, M., & Jonides, J. (2005). Common and unique components of response inhibition revealed by fMRI. *Neuroimage, 27*(2), 323–340.
- *Wang, Q. (2004). *Word Frequency Modulates BOLD Signal Change When Bilinguals Perform Semantic Judgments* (Unpublished master's thesis). Tianjin Medical University.
- *[王琦. (2004). 中英文双语者语义加工的词频相关性磁共振脑功能成像(硕士学位论文).天津医科大学.]
- *Wang, X. D., Wang, M. T., & Lee, D. J. (2010). Neuroimaging study of numbers, Chinese words, and English words reading in brain. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 41*(1), 73–80.
- Wang, X. J., Yang, J. F., Yang, J., Mencl, W. E., Shu, H., & Zevin, J. D. (2015). Language Differences in the Brain Network for Reading in Naturalistic Story Reading and Lexical Decision. *Plos One, 10*(5), e0124388.
- *Wang, Y., Lin, L., Kuhl, P., & Hirsch, J. (2007). Mathematical and Linguistic Processing Differs Between Native and Second Languages: An fMRI Study. *Brain Imaging and Behavior, 1*(3), 68–82.
- *Wang, Y. P., Kuhl, P. K., Chen, C. H., & Dong, Q. (2009). Sustained and transient language control in the bilingual

- brain. *Neuroimage*, 47(1), 414–422.
- *Wang, Y. P., Xue, G., Chen, C. S., Xue, F., & Dong, Q. (2007). Neural bases of asymmetric language switching in second-language learners: An ER-fMRI study. *Neuroimage*, 35(2), 862–870.
- *Weissberger, G. H., Gollan, T. H., Bondi, M. W., Clark, L. R., & Wierenga, C. E. (2015). Language and task switching in the bilingual brain: Bilinguals are staying, not switching, experts. *Neuropsychologia*, 66, 193–203.
- Wu, C. Y., Ho, M. H. R., & Chen, S. H. A. (2012). A meta-analysis of fMRI studies on Chinese orthographic, phonological, and semantic processing. *Neuroimage*, 63(1), 381–391.
- Wu, J. J., Yang, J., Chen, M., Li, S. H., Zhang, Z. Q., Kang, C. Y., Ding, G. S., & Guo, T. M. (2019). Brain network reconfiguration for language and domain-general cognitive control in bilinguals. *Neuroimage*, 199, 454–465.
- Xia, M. R., Wang, J. H., & He, Y. (2013). BrainNet Viewer: A Network Visualization Tool for Human Brain Connectomics. *Plos One*, 8(7), e68910.
- Xu, M., Baldauf, D., Chang, C. Q., Desimone, R., & Tan, L. H. (2017). Distinct distributed patterns of neural activity are associated with two languages in the bilingual brain. *Science Advances*, 3(7), e1603309.
- *Xue, G., Dong, Q., Jin, Z., Zhang, L., & Wang, Y. (2004). An fMRI study with semantic access in low proficiency second language learners. *Neuroreport*, 15(5), 791–796.
- Xue, H. L., Zhao, L. B., Wang, Y. P., Dong, Q., Chen, C. S., & Xue, G. (2017). Anodal transcranial direct current stimulation over the left temporoparietal cortex facilitates assembled phonology. *Trends in Neuroscience and Education*, 8, 10–17.
- Yang, J. F., Shu, H., McCandliss, B. D., & Zevin, J. D. (2013). Orthographic influences on division of labor in learning to read Chinese and English: Insights from computational modeling. *Bilingualism-Language and Cognition*, 16(2), 354–366.
- Yang, J. F., Wang, X. J., Shu, H., & Zevin, J. D. (2012). Task by stimulus interactions in brain responses during Chinese character processing. *Neuroimage*, 60(2), 979–990.
- *You, H. L., Gaab, N., Wei, N., Cheng-Lai, A., Wang, Z. K., Jian, J., Song, M. X., Meng, X. Z., & Ding, G. S. (2011). Neural deficits in second language reading: fMRI evidence from Chinese children with English reading impairment. *Neuroimage*, 57(3), 760–770.
- *Youn, Y. C., & Shim, J. (2011). The Differences of Cerebral Response to the Korean and English Word Stimuli. *The Jungang Journal of English Language and Literature*, 199–216.
- *Yu, A. Y., Chen, M. S. Y., Cherodath, S., Hung, D. L., Tzeng, O. J. L., & Wu, D. H. (2019). Neuroimaging evidence for sensitivity to orthography-to-phonology conversion in native readers and foreign learners of Chinese. *Journal of Neurolinguistics*, 50, 53–70.
- Zhan, M. Y., Pallier, C., Agrawal, A., Dehaene, S., & Cohen, L. (2023). Does the visual word form area split in bilingual readers? A millimeter-scale 7-T fMRI study. *Science Advances*, 9(14), eadf6140.
- *Zhang, Y., Huang, P. Y., Song, Z., Fang, L., Shen, T., Li, Y., Gong, Q. Y., & Xie, P. (2014). In-context language control with production tasks in bilinguals: An fMRI study. *Brain Research*, 1585, 131–140.
- *Zhang, Y., Wang, K. C., Yue, C., Gao, S., Huang, P. Y., Wang, T., Wen, X., Qiu, J., & Wu, Y. J. (2019). Prefrontal sensitivity to changes in language form and semantic content during speech production. *Brain and Language*, 194, 23–34.
- *Zhang, Y., Wang, T., Huang, P. Y., Li, D., Qiu, J., Shen, T., & Xie, P. (2015). Free Language Selection in the Bilingual Brain: An Event-Related fMRI Study. *Scientific Reports*, 5(1), 11704.
- *Zhao, J., Li, Q. L., Wang, J. J., Yang, Y., Deng, Y., & Bi, H. Y. (2012). Neural basis of phonological processing in second language reading: An fMRI study of Chinese regularity effect. *Neuroimage*, 60(1), 419–425.

Zhao, J. J., Wang, X. Y., Frost, S. J., Sun, W., Fang, S. Y., Mencl, W. E., Pugh, K. R., Shu, H., & Rueckl, J. G. (2014).
Neural division of labor in reading is constrained by culture: A training study of reading Chinese characters.
Cortex, 53, 90–106.

The Joint Modulation of Language Distance and Task Demands on the Neural Mechanisms Underlying Bilingual Lexical Processing

QI Yun, CAI Wenqi, LI Zhilin, YANG Jianfeng, WANG Xiaojuan

(School of Psychology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract

Whether bilinguals share the same neural mechanisms for processing their native language (L1) and second language (L2) is a long-standing question of debate. Extensive neuroimaging evidence has accumulated, yet substantial inconsistencies remain. These largely stem from linguistic distance between bilinguals' L1 and L2, as well as differences in experimental task demands.

The present study used an activation likelihood estimation (ALE) meta-analysis to examine how linguistic distance and task demands affect brain activation during bilingual lexical processing. Seventy-four studies met the inclusion criteria and were classified into six groups according to task type (phonological, semantic, language switching) and language distance (Chinese–English bilinguals vs. alphabetic bilinguals): 18 on phonological processing in Chinese–English bilinguals, 12 on phonological processing in alphabetic bilinguals, 12 on semantic processing in Chinese–English bilinguals, 13 on semantic processing in alphabetic bilinguals, 9 on language switching in Chinese–English bilinguals, and 14 on language switching in alphabetic bilinguals. We carried out ALE meta-analyses using GingerALE 3.0.2. All coordinates were converted to Talairach space. To visualize the activation patterns, we projected the coordinates onto a standard brain template using BrainNet Viewer and xjview.

Results showed that during phonological tasks, Chinese–English bilinguals with a large language distance recruited greater L2-related activation in the left inferior parietal lobule, extending into the supramarginal gyrus, which is responsible for grapho-phonological conversion; whereas bilinguals of alphabetic languages with a small language distance shared the same neural mechanisms for their L1 and L2. During semantic tasks, Chinese–English bilinguals showed greater activation in the left middle frontal gyrus and left precuneus for L1 processing to support grapho-to-meaning conversion; whereas alphabetic bilinguals recruited the middle part of the left superior temporal gyrus more for their L1 to achieve phonology-to-meaning conversion, and for their L2 they activated language control brain regions including the left middle frontal gyrus/inferior frontal gyrus, insula, and inferior parietal lobule. Further comparison of brain activation between the two types of bilinguals during language switching tasks also revealed that alphabetic bilinguals with a small language distance required greater involvement of executive control brain regions, including the left inferior frontal gyrus, middle frontal gyrus, and inferior parietal lobule.

In sum, the current meta-analysis demonstrated that differences in brain activation between bilinguals' L1 and L2 processing reflect underlying cognitive processes jointly driven by linguistic distance and task demands. These findings not only support the specific computational demands hypothesis but also provide bilingual perspectives for understanding the universality and specificity of language processing.

Keywords Bilingual Neural Mechanisms, Meta-Analysis, Language Distance, Task Demands

附表1 元分析文献基本信息

文献信息*	样本量	年龄	L1	L2	任务	基线	坐标数	
							L1	L2
语音加工：汉-英双语者								
Cao et al. (2011)	20	21.5	汉语	英语	押韵判断	声调判断	11	0
Cao et al. (2013)	20/26	22/21	汉语	英语	押韵判断	注视符	10	10
Kim et al. (2017)	20/17	21	汉语	英语	押韵判断	注视符	12	12
Meng et al. (2016)	13	9.9	汉语	英语	押韵判断	音调区分	0	16
Pierce et al. (2014)	12	13	汉语	法语	音节判断	非语音	4	0
Pierce et al. (2015)	12	13	汉语	法语	语音 1-back	休息	0	7
Tan et al. (2003)	12	29-39	汉语	英语	押韵判断	字体判断	6	6
Tan et al. (2004)	6	~	汉语	英语	默读	字体判断	15	13
Tham et al. (2005)	6	18-23	汉语	英语	同音判断	注视符	14	11
Tian et al. (2019)	15	22.5	汉语	英语	默读	注视符	9	0
Wang et al. (2010)	12	21-26	汉语	英语	默读	休息	27	40
Wang, Y. et al. (2007)	19	36	汉语	英语	押韵判断	休息	6	6
You et al. (2011)	16	10	汉语	英语	押韵判断	字母匹配	0	5
Yu et al. (2019)	12	18-22	汉语	英语	语音判断	颜色判断	9	0
Zhao et al. (2012)	15	22.5	汉语	英语	默读	注视符	11	0
董奇等 (2004)	12	11	汉语	英语	押韵判断	注视符	17	18
高悦等 (2015)	28	10	汉语	英语	押韵判断	星号	13	14
倪传斌等 (2010)	29	24.23	汉语	英语	押韵判断	字体判断	0	8
语音加工：拼音文字双语者								
Das et al. (2011)	14/10	~	印度语	英语	出声阅读	高频词汇	7	16
Frenck et al. (2005)	6/6	24/41	英语	法语	出声阅读	字符串	14	14
Golestani et al. (2006)	12	20-28	法语	英语	默读	休息	5	6
Hernandez et al. (2015)	20/21	21/10	西班牙语	英语	默读	注视符	6	10
Jung et al. (2018)	16	23.4	韩语	英语	语音判断	注视符	7	6
Kim et al. (2017)	13/16	21	韩语	英语	押韵判断	注视符	12	10
Klein et al. (1995)	12	22	英语	法语	产生押韵词	重复词汇	8	0
Klein et al. (2006)	10	22	英语	法语	重复词汇	休息	7	9
Koyama et al. (2013)	15/14	29/26	日语 Kana	英语	语音 1-back	视觉任务	18	18
Kumar et al. (2010)	12	28.4	印度语	英语	出声阅读	休息	9	8
Meschyan et al. (2006)	12	22.3	西班牙语	英语	默读	休息	12	6
Vingerhoets et al. (2003)	12	27.6	荷兰语	法语/英语	语音流畅性	数数字	12	25
语义加工：汉-英双语者								
Chan et al. (2008)	11	21-32	汉语	英语	词汇判断	注视符	37	27
Chee et al. (2000)	6	20-23	英语	汉语	语义判断	字体判断	4	4
Chee et al. (2001)	10/9	19-34	汉语	英语	语义判断	字体判断	9	11
Ding et al. (2003)	6	22.67	汉语	英语	语义判断	星号	4	5
Klein et al. (1999)	7	29	汉语	英语	产生同义词	重复词汇	10	10
Liu et al. (2021)	25	22.56	汉语	英语	词汇判断	低负荷	2	4
Xue et al. (2004)	12	11.6	汉语	英语	语义判断	注视符	18	18
Luke et al. (2002)	7	20-31	汉语	英语	语义判断	字体判断	23	23
Wang, Y. et al. (2007)	19	36	汉语	英语	奇偶判断	休息	7	6

陈学志等 (2012)	15	19	蒙语	汉语	语义判断	注视符	7	10
姜梅等 (2010)	20	25.1	维语	汉语	语义判断	注视符	17	21
王琦 (2004)	30	25.5	汉语	英语	语义判断	位置判断	18	20
语义加工：拼音文字双语者								
Bartolotti et al. (2017)	18	22.8	英语	西班牙语	图词匹配	休息	9	16
Boukrina et al. (2014)	11	24.08	西班牙语	英语	词汇判断	控制词	12	0
Buchweitz et al. (2012)	11	29.9	葡萄牙语	英语	语义思考	注视符	25	26
Coderre et al. (2016)	14	24	西班牙语	英语	语义判断	非词	0	4
De Grauwe et al. (2014)	18	24.44	德语	荷兰语	词汇判断	控制词	14	7
Ferreira et al. (2021)	20	28.6	西班牙语	英语	语义判断	休息	6	10
Jung et al. (2018)	16	23.4	韩语	英语	语义判断	注视符	6	8
Klein et al. (1995)	12	22	英语	法语	产生同义词	重复词汇	11	10
Rao et al. (2013)	15	18-27	印度语	英语	语义判断	休息	40	38
Rodriguez et al. (2002)	15	18-30	西班牙语	加泰罗尼亚语	词汇判断	字符串	7	4
Sebastian et al. (2012)	3	57	西班牙语	英语	语义判断	注视符	32	16
Stein et al. (2009)	10	17	英语	德语	语义判断	休息	23	50
Youn et al. (2011)	12	36.2	韩语	英语	语义判断	休息	6	4
语言控制：汉-英双语者								
Fu et al. (2017)	21	22	汉语	英语	图片命名	不切换		4
Guo et al. (2011)	12	22.1	汉语	英语	图片命名	不切换		51
Kang et al. (2017)	17	22.1	汉语	英语	图片命名	后测		5
Ma et al. (2014)	22	22.6	汉语	英语	图片命名	不切换		17
Wang et al. (2009)	15	20.5	汉语	英语	数字命名	不切换		17
Wang, Y. P. et al. (2007)	12	19.5	汉语	英语	图片命名	不切换		10
Zhang et al. (2014)	21	24.38	汉语	英语	交替说词汇	不切换		11
Zhang et al. (2015)	16	21.3	汉语	英语	数字命名	不切换		8
Zhang et al. (2019)	22	19.9	汉语	英语	图片命名	不切换		23
语言控制：拼音文字双语者								
Abou et al. (2020)	39	23.6	阿拉伯语	希伯来语	图片命名	不切换		4
Abutalebi et al. (2008)	12	25.4	德语	法语	图片命名	不切换		30
Abutalebi et al. (2012)	17	23.35	德语	意大利语	图片命名	不切换		2
De Baene et al. (2015)	22	22.4	西班牙语	巴斯克语/英语	图片命名	不切换		11
de Bruin et al. (2014)	17	21.82	荷兰语	英语/德语	图片命名	不切换		8
Garbin et al. (2011)	19	20.3	西班牙语	加泰罗尼亚语	图片命名	不切换		20
Hernandez (2009)	12	21.4	西班牙语	英语	图片命名	不切换		4
Hernandez et al. (2001)	6	21.7	西班牙语	英语	图片命名	不切换		4
Klein et al. (1995)	12	22	英语	法语	词汇翻译	不切换		20
Köpke et al. (2021)	20	26.7	法语	英语	图片命名	不切换		7
Price et al. (1999)	6	30.5	德语	英语	图片命名	不切换		3
Reverberi et al. (2015)	21	23.1	德语	英语	图片命名	不切换		8
Stasenko et al. (2020)	24	18~27	西班牙语	英语	故事翻译	不切换		5
Weissberger et al. (2015)	20	21	英语	西班牙语	图片命名	不切换		10

注：* 文献信息只列首作者和年份。