

刺激相似性对跨通道冲突中感觉主导效应的影响*

王爱君^{1,2} 黄杰^{1,2} 赵丹娜³ 李欣³ 张明^{4,5}

(¹广西师范大学教育学部心理学系; ²广西认知科学与心理健康重点实验室, 桂林 541004)

(³苏州大学心理学系, 苏州 215123)(⁴苏州科技大学心理学系, 苏州 215123)

(⁵日本国立冈山大学健康系统综合研究院, 冈山 7008530)

摘要 认知加工水平假说认为跨通道冲突中的感觉主导效应存在反应前水平的视觉主导效应以及反应水平的听觉主导效应, 但刺激在不同加工水平中的表征方式如何影响这一效应目前仍不清楚。研究采用 2-1 映射(2-1 mapping)范式, 将视听通道一致性条件分为一致、反应前不一致和反应不一致三种条件, 考察刺激相似性对反应前水平和反应水平跨通道冲突感觉主导效应的影响。实验 1 结果发现, 不相似条件在反应前水平的跨通道冲突表现为视觉主导效应、反应水平的跨通道冲突表现为听觉主导效应; 视觉相似条件显著减小了反应前水平的视觉主导效应和反应水平的听觉主导效应; 听觉相似条件显著增大了反应前水平的视觉主导效应。实验 2 采用经颅电刺激分别对左侧梭状回(实验 2a)和左侧顶下小叶(实验 2b)进行神经调控, 因果性地验证刺激相似性如何影响跨通道冲突中感觉主导效应。实验 2a 结果发现, 阳极刺激导致反应前水平的视觉主导效应减小; 实验 2b 结果发现, 阳极刺激导致反应前水平的视觉主导效应增大。研究表明, 刺激相似性能够影响跨通道冲突中的感觉主导效应, 视觉相似和听觉相似对反应前水平的感觉主导效应起到调控作用, 完善了认知加工假说对跨通道冲突感觉主导效应的解释。

关键词 跨通道冲突, 感觉主导效应, 刺激相似性, 认知控制

分类号 B842

1 引言

日常生活中, 个体需要整合多个感觉通道输入的信息, 当信息不一致时便引发跨通道冲突(Van Veen & Carter, 2006)。研究表明, 在视听觉客体识别任务中, 不一致的视听觉刺激(如狗的图片 + 猫的声音)会显著延长反应时(Yuval-Greenberg & Deouell, 2009; Diaconescu et al., 2011; Molholm et al., 2004), 该现象在跨通道 Stroop 任务和 Go/NoGo Flanker 任务中同样存在(Fitzhugh et al., 2019; Fong et al., 2018)。这种不一致视听刺激的反应时慢于一致刺激的现象被称为干扰效应或一致性效应(the congruency effect), 该效应通常以不一致条件与一致条件的反应时差值量化(即 $RT_{\text{incongruent}} - RT_{\text{congruent}}$), 差值越大表明效应越强(Mayer et al., 2016)。值得注意的是, 一致性效应在跨通道间冲突中存在不对称

性: 当视觉干扰刺激对听觉目标的一致性效应量显著大于听觉干扰刺激对视觉目标的效应量时, 表现为视觉主导效应; 反之则表现为听觉通道主导效应(Hecht & Reiner, 2009; Hirst et al., 2019)。

认知加工水平假说为解释跨通道冲突中的感觉通道主导效应提供了理论框架(Chen & Zhou 2013)。该假说源于维度重叠模型(Kornblum, 1990), 后者将冲突加工分为知觉阶段(刺激冲突)和反应阶段(反应冲突), 认为冲突效应源于任务相关维度与任务无关维度在特定加工阶段的重叠。Chen 和 Zhou (2013)采用跨通道 2-1 映射(mapping)范式, 通过操纵视听觉输入在知觉/反应阶段的一致性分离了这两个阶段。具体而言, 一致条件(congruent, C), 非注意通道呈现的干扰刺激与注意通道呈现的目标刺激相同, 且双通道映射到相同的响应键(如红的汉字和红的声音); 反应前不一致条件(incongruent

收稿日期: 2025-04-27

* 广西自然科学基金(2025JJA141041)、教育部人文社科基金(25YJA190014)和广西哲学社会科学基金(25YYB539)资助。

通信作者: 王爱君, E-mail: wangaj@gxnu.edu.cn; 黄杰, E-mail: psy_hj@gxnu.edu.cn

pre-response, PRIC), 非注意通道呈现的干扰刺激是非目标刺激的另外两个文字, 且不映射任何响应键(如红的汉字和蓝(或绿)的声音); 反应不一致条件(incongruent response, RIC), 非注意通道呈现的干扰刺激是注意通道呈现的目标刺激中的另一个, 双通道映射到不同的响应键(如红的汉字和绿的声音)。反应前水平和反应水平的一致性效应分别通过不同条件下反应时差异 $RT_{PRIC} - RT_C$ 和 $RT_{RIC} - RT_{PRIC}$ 计算。三个实验的行为结果一致发现, 反应前水平视觉信息对听觉加工造成的干扰更大(即视觉主导优势), 反应水平听觉信息对视觉加工造成的干扰更大(即听觉主导优势), 且该模式不受任务类型、刺激属性或通道信息加工速度差异的影响, 表明加工阶段决定了感觉主导效应的方向。Hirst 等人(2019)在 Chen 和 Zhou 的基础上进一步探讨了跨通道冲突在不同年龄阶段的表现, 结果发现单通道和跨通道冲突在发展和衰老过程中表现出不同的轨迹, 进一步证实了加工阶段对跨通道冲突中感觉通道主导效应的关键作用。总之, 这些研究支持认知加工水平假说反应前水平视觉占据主导, 反应水平听觉占据主导的观点。

然而, 以往研究仅关注了认知加工水平中的知觉阶段和反应阶段, 忽略中间水平的加工阶段如何影响跨通道冲突中的感觉主导。以往研究认为, 客体类别加工发生在介于早期知觉加工水平和晚期反应加工水平之间的中间加工水平(Martin, 2007)。因此, 近期周衡等人(2025)的研究采用 2-1 映射范式考察介于早期知觉和晚期反应水平之间的客体类别表征如何影响跨通道冲突感觉主导效应。结果一方面验证了 Chen 和 Zhou (2013)的发现, 即不同客体类别信息加工的反应前水平是视觉通道占据主导, 反应水平是听觉通道占据主导; 另一方面揭示了客体类别差异调控跨通道冲突中的感觉主导, 即客体类别差异较小时, 反应水平表现为视觉主导; 客体类别差异较大时, 反应水平表现为听觉主导。并且, 这种行为结果模式与视觉刺激呈现方式无关, 受到左侧颞前叶活动的影响(周衡 等, 2025)。同时, 近期我们采用客体类别加工受损的精神分裂症患者完成相同的实验任务, 结果发现, 精神分裂症患者表现出与健康个体相反的结果模式, 即在反应前水平表现出听觉主导, 而在反应水平表现出视觉主导, 也因此进一步验证了客体类别表征能够影响跨通道冲突感觉主导效应(Zhou et al., 2025)。因此, 这些研究表明认知加工水平假说存在特定的边界,

客体类别表征这一“中间加工水平”能够有效调节跨通道冲突中的感觉主导效应。

根据类别学习的原型理论和样例理论(Ashby & Ell, 2001; Folstein et al., 2017), 客体类别差异程度一方面取决于刺激相似性的程度(Little & McDaniel, 2015; Zeithamova et al., 2008), 另一方面取决于刺激之间的规则属性(Little et al., 2011; Nosofsky et al., 1994)。以往研究表明, 个体通过比较与样例(Little & McDaniel, 2015)或原型的相似程度来分类(Ashby & Ell, 2001)。相似性可分为视觉相似性(即汉字在正字法特征上的重叠程度)和听觉相似性(单词之间共享的听觉可感知属性)(Abdel Rahman & Melinger, 2009; Liu et al., 2011; Yeh & Li, 2002)。以往研究发现, 刺激相似性能够影响刺激加工速度, 从而影响冲突效应的大小(Gerlach et al., 2015; Marmurek et al., 2006)。具体而言, 视觉相似性通过简化客体整体表征, 减少认知负载从而提高加工效率(Joseph & Gathers, 2003; Mate & Baqués, 2009; Quinlan & Cohen, 2012)。例如, Mate 和 Baqués (2009)采用汉字识别任务考察形状相似性对视觉工作记忆的影响, 结果发现高视觉辨别性的汉字提高了检索阶段的正确率, 而高相似性的汉字则提高了编码阶段的正确率。相反, 听觉相似性通过共享语音特征增强干扰, 从而扩大冲突效应(Bosworth et al., 2021; Marmurek et al., 2006)。例如, Marmurek 等人(2006)通过 Stroop 任务发现语音位置相似性差异会导致干扰效应强弱变化, 非颜色词与颜色词在初始音素重叠时(如“rock”对应“red”)干扰效应显著, 而末尾音素重叠(如“sad”)则无显著影响。

以往研究表明, 复杂的视觉刺激(如文字)的表征和相似性判断通常涉及广泛的腹侧视觉通路区域。例如, 下颞叶皮层(inferior temporal cortex)区域参与高级物体识别和类别表征(Grill-Spector & Weiner, 2014; Martin, 2007)。但一些研究也指出, 对于文字材料, 特别是其视觉结构相似性的特异性加工, 左侧梭状回被认为是核心枢纽, 其活动与个体对视觉相似性的敏感度密切相关(Dehaene & Cohen, 2011; Kho et al., 2023; Vinckier et al., 2007)。同样地, 语音信息的加工是一个层级过程, 初级听觉皮层和颞上回(特别是其颞上回后部)对声学特征分析和音素区分具有基础性作用(DeWitt & Rauschecker, 2012; Hickok & Poeppel, 2007)。然而, 对于涉及语音特征比较、相似性判断以及跨通道整合等更高级的认知加工, 左侧顶下小叶通常被认为是核心区

域。作为背侧注意网络枢纽,左侧顶下小叶整合了来自听觉和运动前区的信息(Hickok, 2009),并通过抑制无关听觉输入调节视听竞争,其 γ 波段活动与语音相似性干扰效应显著相关(Ciaramidaro et al., 2018)。鉴于客体类别差异程度取决于刺激相似性的程度,本研究探究基于刺激相似性的客体类别表征如何调控跨通道冲突中的感觉主导效应。

综上,本研究采用2-1映射范式考察基于相似性的客体表征如何调控跨通道冲突感觉主导效应。鉴于认知加工过程中个体对图片刺激和文字刺激的加工速度不同(Abdel Rahman & Melinger, 2009),视觉和听觉刺激均统一采用文字形式以消除刺激呈现方式的影响。为了保证刺激材料既能操纵视觉相似性又能操纵听觉相似性,实验1通过采用汉字材料探讨视觉和听觉相似性对跨通道冲突中感觉主导效应的影响。由于视觉相似性简化表征降低冲突而听觉相似性增强干扰扩大干扰效应,实验1假设视觉相似性削弱反应前水平的视觉主导效应,听觉相似性增强反应前水平的视觉主导效应。鉴于左侧梭状回(Dehaene & Cohen, 2011; Vinckier et al., 2007)和左侧顶下小叶(高悦等, 2015; Booth et al., 2002)分别在视觉相似性和听觉相似性加工中所起的关键作用,实验2在实验1的基础上采用高精度经颅直流电刺激技术(high definition transcranial direct current stimulation, HD-tDCS),分别对左侧梭状回(实验2a)和左侧顶下小叶(实验2b)进行神经调控。通过比较伪刺激、阳极刺激和阴极刺激三种不同条件下跨通道冲突感觉主导效应的差异,因果性地验证刺激相似性对跨通道冲突中感觉主导效应的影响。实验假设:伪刺激条件下的感觉主导效应与实验1的行为结果一致,阳极刺激条件下的感觉主导效应与实验1中视觉相似和听觉相似的感觉主导效应的变化一致,阴极刺激反之。

2 实验1: 刺激相似性对跨通道冲突感觉主导效应的影响

2.1 方法

2.1.1 被试

本实验样本量基于使用2-1映射范式的行为研究(周衡等, 2025; Zhou et al., 2025),其中预测2(注意通道:注意视觉通道 vs. 注意听觉通道) \times 3(视听通道一致性:一致 vs. 反应前不一致 vs. 反应不一致)的交互作用的effect size $f = 0.25$ 。因此,本实验的被试样本量通过G*Power 3.1.9进行计算。

设置参数 $\text{power}(1 - \beta \text{ err prob}) = 0.95$, $\alpha \text{ err prob} = 0.05$, $\text{effect size } f = 0.25$, 计算实验所需样本量至少为14名。因此,本实验共招募35名大学生被试,其中1名被试因其反应时超过3个标准差被剔除,因此共34名被试(男性14名,女性20名,年龄 20.12 ± 1.90 岁)纳入统计分析。所有被试视力(或矫正视力)和听力正常,均以普通话为第一语言或自我报告普通话流利(达到母语水平)。被试在实验前均不了解实验目的,并在实验结束后立刻获得一定的报酬。本实验通过了苏州大学伦理委员会的伦理审批。

2.1.2 实验仪器和材料

实验使用MATLAB 2019b(MathWorks, Natick, MA, USA)和Psychtoolbox(3.0.14)编程,并在27英寸液晶显示器(60 Hz,分辨率:1920 \times 1080)上呈现,背景为灰色(RGB: 127, 127, 127)。实验在隔音且光线昏暗的房间内进行。被试坐在显示器屏幕前,眼睛与显示器的距离为60 cm。如图1a所示,实验材料分为视觉和听觉均不相似(即不相似)、视觉相似但听觉不相似(即视觉相似)、听觉相似但视觉不相似(即听觉相似)三组。每组材料均为汉字独体字,均包含4个汉字。具体而言,以往研究将视觉相似性定义为汉字正字法特征重叠的程度(Liu et al., 2011; Yeh & Li, 2002),两个结构相同、有共同偏旁部首但其他偏旁部首的笔画有差异的汉字是视觉上高度相似的汉字(Yeh & Li, 2002)。因此,视觉相似组的视觉刺激(即“戊”、“戌”、“戌”和“戎”)均具有半包围结构和相似的笔画数,听觉刺激为每个汉字对应的口语发音(即“wù”、“xū”、“shù”和“róng”)。鉴于以往研究发现汉语听感相似度最大的一对韵母设计的分类器为(i, ü)(张家驷, 2005),听觉相似组的听觉刺激为(i, ü)分类的口语发音(“xi”、“qi”、“xü”和“qü”),视觉刺激为口语发音对应且结构和笔画有差异的文字(“系”、“弃”、“序”和“去”)。为了确保三组汉字两两之间没有语义上的直接联系且具有相似的笔画数,不相似组的视觉刺激包括4个汉字(“未”、“业”、“发”和“央”),听觉刺激为对应的口语发音(分别是“wèi”、“yè”、“fā”和“yāng”)。所有汉字在实验中的发音均固定为单一读音,且每个汉字均由一个音节(syllable)组成,每个音节由两个音素(phoneme)组成。其中,视觉相似组中的“戌”字在此实验中固定使用“xū”的读音(如“戌戌变法”),听觉相似组中的“系”字在此实验中固定使用“xi”的读音(如“关系”),不相似组中的“发”字在此实验中固定使用其“fā”的读音(如“发展”)。固定汉字发音是

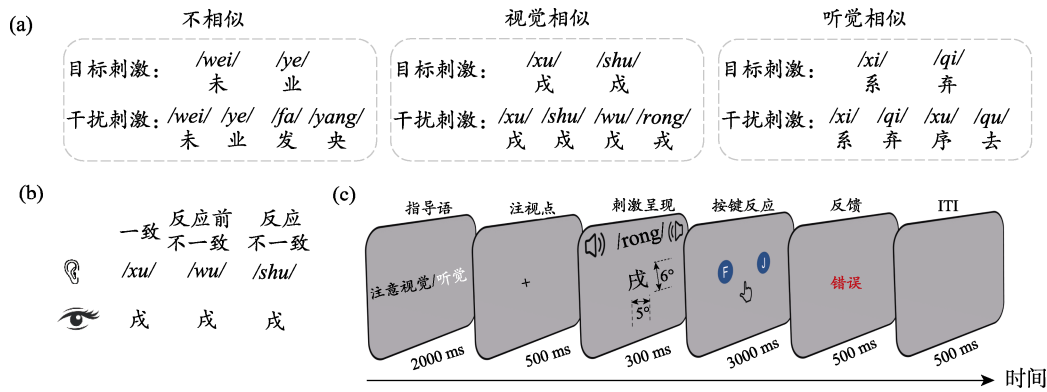


图 1 (a) 不同相似性条件下的刺激材料; (b) 视听一致性条件的示意图, 以视觉相似为例; (c) 2-1 mapping 实验流程图。

确保实验内部效度的必要条件, 并能有效排除多音字产生的多重语音表征对实验结果产生的潜在影响作用。因此, 保证了视觉刺激和听觉刺激在难度和复杂度上一致。所有视觉刺激以 5° (水平) \times 6° (垂直)的视角大小呈现 300 ms。所有声音刺激均由女性中文母语者进行普通话发音录制, 采样率均为 48000 Hz (16-bit)且振幅经过标准化, 并通过立体声耳机(型号: ATH-WS99)以约 60 dB 的强度双耳呈现 300 ms。

2.1.3 实验设计和流程

如图 1a 所示, 通过操纵刺激相似性(不相似 vs. 视觉相似 vs. 听觉相似)与通道注意(注意视觉 vs. 注意听觉), 考察客体类别形成中基于相似性客体表征如何调控跨通道冲突感觉主导效应。实验任务要求被试判断注意通道呈现的目标刺激, 同时忽略非注意通道呈现的干扰刺激。视听通道一致性条件如图 1b 所示, 在一致条件下(C), 非注意通道呈现的干扰刺激与注意通道呈现的目标刺激相同, 双通道映射到相同的响应键; 在反应前不一致条件下(PRIC), 非注意通道呈现的干扰刺激是非目标刺激的另外两个汉字, 且不映射任何响应键; 在反应不一致条件下(RIC), 非注意通道呈现的干扰刺激为注意通道目标刺激中的另一个, 双通道映射到不同的响应键。因此, 本实验为 3 (相似性: 不相似 vs. 视觉相似 vs. 听觉相似) \times 2 (注意通道: 注意视觉通道 vs. 注意听觉通道) \times 3 (视听通道一致性: 一致 vs. 反应前不一致 vs. 反应不一致)的三因素被试内设计。

三种相似性条件将正式实验分为 3 个部分, 每个部分的实验流程相同, 仅刺激材料不同。正式实验流程如图 1c 所示(以视觉相似组为例), 每个 block 开始前呈现 2000 ms 的指导语, 以告知被试关注特定感觉通道的目标刺激, 同时忽略非注意通道

呈现的干扰刺激。每个试次 500 ms 的中央注视点 ($1.5^\circ \times 1.5^\circ$ 视角)作为开始, 然后同步呈现 300 ms 的视听觉刺激, 被试需在 3000 ms 内根据目标刺激做出反应, 并按对应的反应键(F 键或 J 键, 按键被试间平衡)。按键结束后呈现 500 ms 的反馈(正确、错误或未反应), 并在呈现 500 ms 的试次间间隔后开始下一试次。为了排除刺激熟悉度对跨通道冲突感觉主导效应的影响(Napolitano & Sloutsky, 2004), 被试在实验开始前均需完成 60 个试次的练习实验以确保熟悉不同相似组中的汉字和语音。练习实验的任务要求与正式实验相同, 被试只有练习正确率超过 90% (表明其足够熟悉汉字和任务流程), 才能进行后续的正式实验。正式实验共包含 864 个试次, 每种实验条件含 48 个试次。除了刺激材料不同, 不相似组与听觉相似组的实验流程均与视觉相似组相同。每组实验均通过 block-by-block 形式呈现并包含 24 个 block, 每个 block 有 12 个试次, 且每种实验条件(一致、反应前不一致和反应不一致)的数量相同。注意视觉和注意听觉的 block 交替出现, block 呈现顺序和按键在被试间平衡。被试每完成 3 个 block 实验将被要求进行至少一分钟的休息, 以避免疲劳效应。

2.2 结果

由于所有条件下平均正确率均显著高于 95%, 且不同条件间的平均正确率均没有显著差异($p_s > 0.05$)。因此, 仅对正确条件下试次的平均反应时进行分析, 并剔除超过 ± 3 个标准差的极端反应时数据。根据以往研究(Chen & Zhou, 2013; Li et al., 2019), 采用视听通道不一致条件与视听通道一致条件的反应时差值衡量跨通道冲突的加工水平, 即一致性效应的大小。分别计算反应前水平跨通道冲突效应($RT_{PRIC} - RT_C$)与反应水平跨通道冲突效应($RT_{RIC} - RT_{PRIC}$), 以量化不同认知加工阶段的冲突

差异。此外,采用注意听觉通道与注意视觉通道的一致性效应量差值衡量感觉通道主导效应。通过计算注意听觉通道与注意视觉通道的一致性效应量差值(注意听觉条件_{一致性效应} - 注意视觉条件_{一致性效应}),评估视觉与听觉通道的主导性差异。正值表征视觉主导效应,负值表征听觉主导效应。所有指标均采用RStudio(4.2.0)和BruceR工具包进行分析。对于方差分析中未满足球形检验的数据,进行了Greenhouse-Geisser校正,效应量通过 η_p^2 和Cohen's d 报告。此外,事后比较均采用Bonferroni校正以控制多重比较带来的假阳性概率。后续实验均采用相同的数据处理和分析方法。

(1) 反应时

对反应时进行3(相似性:不相似 vs. 视觉相似 vs. 听觉相似)×2(注意通道:注意视觉通道 vs. 注意听觉通道)×3(视听通道一致性:一致 vs. 反应前不一致 vs. 反应不一致)的重复测量方差分析。结果发现,相似性主效应显著, $F(1.60, 52.63) = 23.42, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.42$ 。视听通道一致性主效应显著, $F(1.55, 51.14) = 151.54, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.82$ 。注意通道主效应显著, $F(1, 33) = 956.68, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.97$ 。相似性和视听通道一致性交互作用显著, $F(3.11, 102.73) = 7.84, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.19$ 。相似性和注意通道交互作用显著, $F(1.97, 65.12) = 71.78, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.69$ 。视听通道一致性和注意通道交互作用显著, $F(1.97, 63.71) = 63.85, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.66$ 。相似性、视听通道一致性和注意通道交互作用显著, $F(3.69, 121.86) = 13.01, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.28$ 。为了考察不同相似性条件的跨通道冲突的反应时,对三种相似性条件的反应时分别进行2(注意通道:注意视觉通道 vs. 注意听觉通道)×3(视听通道一致性:一致 vs. 反应前不一致 vs. 反应不一致)的重复测量方差分析。

首先,对于不相似条件(见图2a),结果发现注

意通道主效应显著, $F(1, 33) = 855.25, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.96$,注意听觉通道的反应时(581 ms)显著高于注意视觉通道(447 ms)。视听通道一致性主效应显著, $F(2, 66) = 55.61, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.63$,反应前不一致的反应时(523 ms)和反应不一致的反应时(526 ms)显著高于一致条件(492 ms)。注意通道和视听通道一致性交互作用显著, $F(2, 66) = 40.42, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.55$ 。简单效应分析结果发现,在注意视觉通道条件下,一致条件(439 ms)和反应前不一致条件(446 ms)的反应时差异不显著, $t(33) = 2.20, p = 0.104$;一致条件(439 ms)和反应不一致条件(455 ms)的反应时差异显著, $t(33) = 3.13, p = 0.011$,Cohen's $d = 0.50, 95\% CI = [0.10, 0.89]$;反应前不一致条件(446 ms)和反应不一致条件(455 ms)的反应时差异不显著, $t(33) = 2.01, p = 0.157$ 。在注意听觉通道条件下,一致条件(545 ms)和反应前不一致条件(601 ms)的反应时差异显著, $t(33) = 9.78, p < 0.001$,Cohen's $d = 1.78, 95\% CI = [1.32, 2.24]$;一致条件(545 ms)和反应不一致条件(597 ms)的反应时差异显著, $t(33) = 11.56, p < 0.001$,Cohen's $d = 1.64, 95\% CI = [1.28, 2.00]$;反应前不一致条件(601 ms)和反应不一致条件(597 ms)的反应时差异不显著, $t < 1$ 。

其次,对于视觉相似条件(见图2b),结果发现注意通道主效应显著, $F(1, 33) = 324.85, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.91$,注意听觉通道的反应时(537 ms)显著高于注意视觉通道(425 ms), $t(33) = 18.02, p < 0.001$,Cohen's $d = 3.20, 95\% CI = [2.84, 3.56]$ 。视听通道一致性主效应显著, $F(2, 66) = 17.68, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.35$,反应前不一致(486 ms)和反应不一致的反应时(486 ms)显著高于一致条件(471 ms)。注意通道和视听通道一致性交互作用显著, $F(2, 66) = 7.10, p = 0.002, \eta_p^2 = 0.18$ 。简单效应分析结果发现,在注意视觉通道条件下,一致条件(421 ms)和反应前不一致条件(428 ms)的反应时差异显著, $t(33) = 2.74, p = 0.030$,

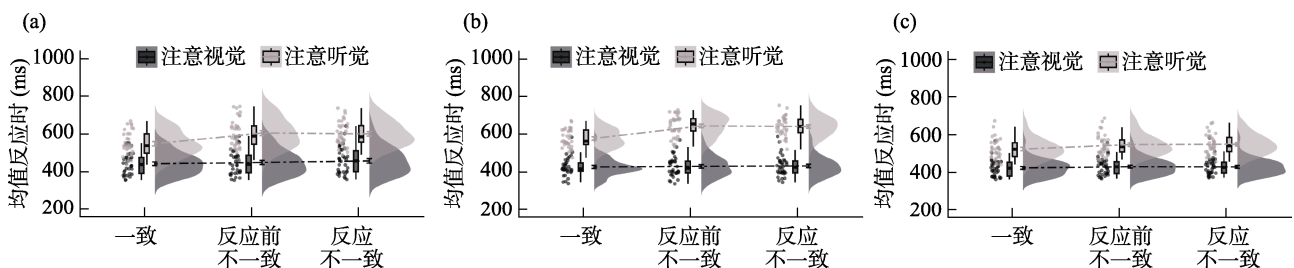


图2 三种相似性条件下的反应时结果。(a) 不相似组;(b) 视觉相似组;(c) 听觉相似组。

注:云雨图的形状代表反应时数据的分布,每个点代表每个被试的反应时,箱体代表反应时的四分位距,箱体内部的线代表反应时的中位数。

Cohen's $d = 0.20$, 95% CI = [0.02, 0.38]; 一致条件(421 ms)和反应不一致条件(427 ms)的反应时差异不显著, $t(33) = 2.50$, $p = 0.053$; 反应前不一致条件(428 ms)和反应不一致条件(427 ms)的反应时差异不显著, $t < 1$ 。在注意听觉通道条件下, 一致条件(521 ms)和反应前不一致条件(544 ms)的反应时差异显著, $t(33) = 4.36$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 0.66$, 95% CI = [0.28, 1.04]; 一致条件(521 ms)和反应不一致条件(546 ms)的反应时差异显著, $t(33) = 4.81$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 0.71$, 95% CI = [0.34, 1.08]; 反应前不一致条件(544 ms)和反应不一致条件(546 ms)的反应时差异不显著, $t < 1$ 。

最后, 对于听觉相似条件(见图 2c), 结果发现注意通道主效应显著, $F(1, 33) = 690.92$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.95$, 注意听觉通道的反应时(623 ms)显著高于注意视觉通道(433 ms)。视听通道一致性主效应显著, $F(2, 66) = 101.62$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.76$, 反应前不一致(539 ms)和反应不一致的反应时(539 ms)显著高于一致条件(505 ms)。注意通道和视听通道一致性交互作用显著, $F(2, 66) = 58.67$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.64$ 。简单效应分析结果发现, 在注意视觉通道条件下, 一致条件(430 ms)和反应前不一致条件(433 ms)的反应时差异不显著, $t(33) = 1.04$, $p = 0.924$; 一致条件(430 ms)和反应不一致条件(435 ms)的反应时差异不显著, $t(33) = 1.44$, $p = 0.476$; 反应前不一致条件(433 ms)和反应不一致条件(435 ms)的反应时差异不显著, $t < 1$ 。在注意听觉通道条件下, 一致条件(580 ms)和反应前不一致条件(646 ms)的反应时差异显著, $t(33) = 12.38$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 1.67$, 95% CI = [1.33, 2.01]; 一致条件(580 ms)和反应不一致条件(642 ms)的反应时差异显著, $t(33) = 12.97$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 1.59$, 95% CI = [1.28, 1.90]; 反应前不一致条件(646 ms)和反应不一致条件(642 ms)的反应时差异不显著, $t < 1$ 。

(2) 一致性效应

为了考察不同认知加工阶段的冲突差异, 对一致性效应指标进行 3 (相似性: 不相似 vs. 视觉相似 vs. 听觉相似) \times 2 (注意通道: 注意视觉通道 vs. 注意听觉通道) \times 2 (认知加工水平: 反应前水平 vs. 反应水平)的重复测量方差分析。结果发现, 相似性主效应显著, $F(1.69, 55.91) = 12.85$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.28$ 。认知加工水平主效应显著, $F(1, 33) = 89.53$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.73$ 。注意通道主效应显著, $F(1, 33) = 69.86$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.68$ 。相似性和认知加工水平交互作用显著, $F(1.55, 50.99) = 3.53$, $p = 0.048$, $\eta_p^2 = 0.10$ 。相似性和注意通道交互作用显著, $F(1.96, 64.81) = 16.25$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.33$ 。认知加工水平和注意通道交互作用显著, $F(1, 33) = 55.14$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.63$ 。相似性、认知加工水平和注意通道的三因素交互作用显著, $F(2.00, 65.96) = 10.47$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.24$ 。为了考察不同相似性条件之间的感觉主导效应是否存在质的差异, 分别对不同相似性条件进行 2 (注意通道: 注意视觉通道 vs. 注意听觉通道) \times 2 (认知加工水平: 反应前水平 vs. 反应水平)的重复测量方差分析。

首先, 不相似条件下的结果发现(见图 3a), 注意通道主效应显著, $F(1, 33) = 39.50$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.55$, 注意听觉通道的一致性效应(25.87 ms)显著高于注意视觉通道(7.80 ms)。认知加工水平主效应显著, $F(1, 33) = 25.14$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.43$, 反应前水平的一致性效应(31.47 ms)显著高于反应水平(2.20 ms)。两者之间交互效应显著, $F(1, 33) = 41.39$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.56$ 。简单效应分析结果发现, 在反应前水平条件下, 注意听觉通道条件的一致性效应量(56.09 ms)显著高于注意视觉通道条件(6.85 ms), $t(33) = 8.92$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 1.28$, 95% CI = [0.98, 1.57]。在反应水平条件下, 注意听觉通道条件的一致性效应量(-4.36 ms)显著低于注意视觉通

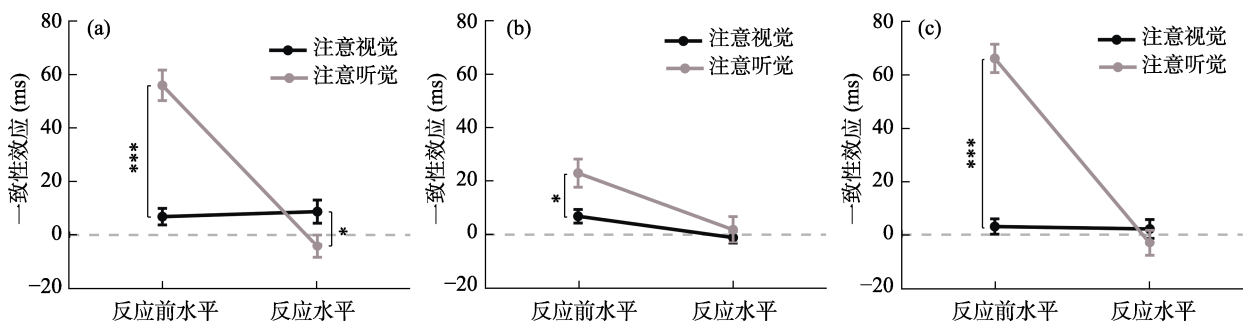


图 3 不同相似性条件下的一致性效应结果。(a) 不相似组; (b) 视觉相似组; (c) 听觉相似组。

注: *** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$, 下同。

道条件(8.76 ms), $t(33) = 2.28, p = 0.029$, Cohen's $d = 0.34$, 95% CI = [0.04, 0.64]。这些结果说明, 不相似条件下的反应前水平表现为视觉主导效应, 而反应水平表现为听觉主导效应。

其次, 视觉相似条件下的结果发现(见图 3b), 注意通道主效应显著, $F(1, 33) = 11.32, p = 0.002, \eta_p^2 = 0.26$, 注意听觉通道的一致性效应(12.39 ms)显著高于注意视觉通道(2.87 ms)。认知加工水平主效应显著, $F(1, 33) = 7.77, p = 0.009, \eta_p^2 = 0.19$, 反应前水平的一致性效应(15.02 ms)显著高于反应水平(0.25 ms)。注意通道和认知加工水平交互作用不显著, $F(1, 33) = 2.15, p = 0.152$ 。虽然交互作用不显著, 但为了探究不同认知加工水平下注意通道的一致性效应量是否存在差异, 分别对反应前水平和反应水平的一致性效应量进行配对样本 t 检验。结果发现在反应前水平条件下, 注意听觉通道条件的一致性效应量(23.09 ms)显著高于注意视觉通道条件(6.95 ms), $t(33) = 3.13, p = 0.004$, Cohen's $d = 0.76$, 95% CI = [0.26, 1.25]。这一结果表明, 视觉的一致性效应大于听觉的一致性效应。在反应水平条件下, 注意视觉通道条件(-1.20 ms)与注意听觉通道条件(1.70 ms)的一致性效应量无显著差异, $t < 1$, 这说明视觉干扰听觉目标与听觉干扰视觉目标均会产生干扰效应, 但两者无显著差异。这些结果说明, 视觉相似条件下反应前水平表现为视觉主导效应, 而反应水平无感觉主导效应。

最后, 听觉相似条件下的结果发现(见图 3c), 注意通道主效应显著, $F(1, 33) = 79.88, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.71$, 注意听觉通道的一致性效应(31.35 ms)显著高于注意视觉通道(2.56 ms)。认知加工水平主效应显著, $F(1, 33) = 53.13, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.62$, 反应前水平的一致性效应(34.51 ms)显著高于反应水平(0.59 ms)。两者之间交互效应显著, $F(1, 33) = 37.53, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.53$ 。简单效应分析结果发现, 在反应前水平条件下, 注意视觉通道条件的一致性

效应量(2.99 ms)显著低于注意听觉通道条件(66.02 ms), $t(33) = 10.70, p < 0.001$, Cohen's $d = 1.65$, 95% CI = [1.33, 1.96]。在反应水平条件下, 注意视觉通道条件(2.13 ms)与注意听觉通道条件(-3.32 ms)的一致性效应量无显著差异, $t < 1$, 这说明视觉干扰听觉目标与听觉干扰视觉目标均会产生干扰效应, 但两者无显著差异。这些结果说明, 听觉相似条件下反应前水平表现为视觉主导效应, 而反应水平无感觉主导效应。

(3) 感觉主导效应

为了比较视觉相似性和听觉相似条件与不相似条件的感觉主导效应是否存在差异, 分别将视觉相似和听觉相似条件下的感觉主导效应指标(注意听觉条件_{-一致性效应} - 注意视觉条件_{-一致性效应})与不相似条件进行配对样本 t 检验(见图 4a)。视觉相似和不相似条件下的结果发现, 在反应前水平条件下, 视觉相似条件的视觉主导效应(16.14 ms)显著低于不相似条件(49.24 ms), $t(33) = 4.71, p < 0.001$, Cohen's $d = 1.14$, 95% CI = [0.63, 1.65]。在反应水平条件下, 视觉相似条件的听觉主导效应(2.90 ms)显著高于不相似条件(-13.11 ms), $t(33) = 2.11, p = 0.043$, Cohen's $d = 0.51$, 95% CI = [0.03, 0.99]。这一结果表明, 与不相似条件相比, 视觉相似条件显著减少了反应前水平的视觉主导效应, 同时显著减少了反应水平的听觉主导效应(即不相似条件下存在听觉主导, 而视觉相似条件下无感觉主导)。听觉相似条件和不相似条件下的结果发现(见图 4b), 在反应前水平条件下, 听觉相似条件的视觉主导效应(63.03 ms)显著高于不相似条件(49.24 ms), $t(33) = 2.21, p = 0.034$, Cohen's $d = 0.54$, 95% CI = [0.51, 1.02]。在反应水平条件下, 听觉相似条件(-5.45 ms)与不相似条件(-13.11 ms)的听觉主导效应无显著差异, $t < 1$ 。这一结果表明, 与不相似条件相比, 听觉相似条件显著增加了反应前水平的视觉主导效应, 同时使反应水平的听觉主导效应消失。

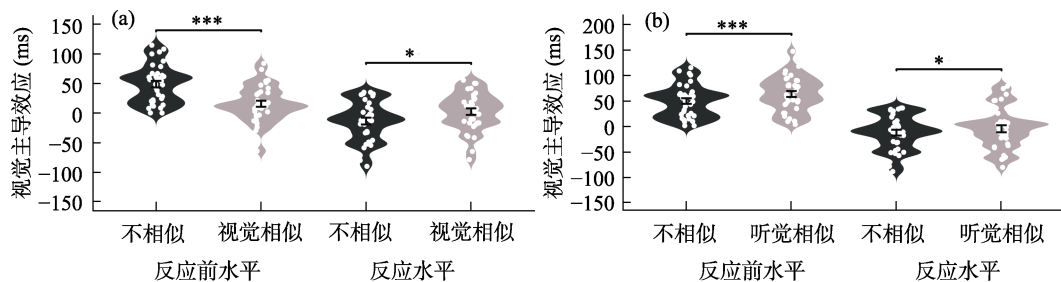


图4 不同相似性条件在反应前水平和反应水平的视觉主导效应差异; (a) 视觉相似组与不相似组; (b) 听觉相似组与不相似组。

3 实验 2: tDCS 调控不同大脑皮层对跨通道冲突中感觉主导效应的影响

实验 1 的结果发现视觉相似性导致反应前水平的视觉主导效应降低,听觉相似性导致反应前水平的视觉主导效应增加。鉴于大量研究揭示左侧梭状回和左侧顶下小叶分别作为视觉相似性和听觉相似性加工的关键脑区(Booth et al., 2002; Cao et al., 2010; Gerlach et al., 2015), 实验 2 采用 HD-tDCS 技术靶向调控左侧梭状回(实验 2a)和左侧顶下小叶(实验 2b), 通过比较伪刺激、阳极刺激和阴极刺激三种不同条件下跨通道冲突感觉主导效应的差异, 从而因果性地验证刺激相似性对跨通道冲突中感觉主导效应的影响。实验 2a 假设: 与伪刺激条件相比, 阳极刺激神经调控左侧梭状回能够减小反应前水平的视觉主导效应, 阴极刺激神经调控左侧梭状回能够增加反应前水平的视觉主导效应。实验 2b 假设: 与伪刺激条件相比, 阳极刺激神经调控左侧顶下小叶能够增加反应前水平的视觉主导效应, 阴极刺激神经调控左侧顶下小叶能够减小反应前水平的视觉主导效应。

3.1 方法

3.1.1 被试

本实验样本量基于使用 2-1 映射范式的行为研究(Zhou et al., 2025), 其中预测 2 (注意通道: 注意视觉通道 vs. 注意听觉通道) \times 3 (视听通道一致性: 一致 vs. 反应前不一致 vs. 反应不一致) 的交互作用的 effect size $f = 0.25$ 。因此, 本实验的被试样本量通过 G*Power 3.1.9.7 进行计算。设置参数 power ($1 - \beta$ err prob) = 0.95, α err prob = 0.05, effect size $f = 0.25$, 计算得出样本量为 14 名。其中, 实验 2a 招募了 26 名被试(男性 19 名, 女性 7 名, 年龄 22 ± 1.92 岁), 实验 2b 招募 24 名被试(男性 7 名, 女性 17 名, 年龄 20.88 ± 1.62 岁)。所有被试视力(或矫正视力)和听力正常, 且均不了解本实验的目的。被试进行电刺激前需填写 tDCS 的被试筛查表(见附录 1)和知情同意书(见附录 2)。实验后所有被试获得了一定的报酬。

3.1.2 实验仪器和材料

行为实验的实验仪器和材料与实验 1 视觉相似组(Group2)相同。高精度经颅直流电刺激(high-definition transcranial direct current stimulation, HD-tDCS)的实验仪器采用无线系统控制的电流设

备(NeuStim NSS14, Neuracle, Changzhou, China)。HD-tDCS 使用 5 个导电 Ag/AgCl 环状电极(4 \times 1 电极位点), 其中 1 个电极点作为阳极(或阴极), 其他 4 个电极点作为阴极(或阳极)和返回电极。

3.1.3 实验设计和流程

根据国际 10-20EEG 系统以及以往磁共振和 HD-tDCS 的相关研究(Phillipou et al., 2019; Wu et al., 2021), 实验 2a 对于左侧梭状回采用 P9 (1.5 mA) 作为阳极电极(或阴极电极), P3 (-0.15 mA)、CP5 (-1.04 mA)、AF7 (-0.18 mA)和 FT10 (-0.13 mA)作为阴极电极(或阳极电极)和返回电极; 实验 2b 对于左侧顶下小叶应采用 P3 (1.5 mA)作为阳极电极(或阴极电极), CP3 (-0.375 mA)、P1 (-0.375 mA)、P5 (-0.375 mA)和 PO3 (-0.375 mA)作为阴极电极(或阳极刺激)和返回电极。实验过程中 HD-tDCS 的电流强度均为 1.5 mA, 符合现行的安全指南(Nitsche et al., 2001; Nikolin et al., 2018; Parkin et al., 2015; Poreisz et al., 2007)。因此, 实验 2a 和实验 2b 均为 3 (电极类型: 伪刺激 vs. 阳极刺激 vs. 阴极刺激) \times 2 (注意通道: 注意视觉通道 vs. 注意听觉通道) \times 3 (视听通道一致性: 一致 vs. 反应前不一致 vs. 反应不一致)的三因素被试内设计。因变量为被试判断注意通道的目标刺激的反应时。

如图 5 所示, 所有被试均需要先完成练习实验, 然后再进行 HD-tDCS 刺激, 最后进行证实实验, 正式实验流程与实验 1 相同, 实验 2a 的设计同实验 1 中视觉相似性组, 实验 2b 的设计同实验 1 中听觉相似组。具体而言, 被试需要先进行 10 分钟的练习实验以确保熟悉任务流程, 且正确率需要达到 90%以上才能进行 HD-tDCS 刺激。为了避免被试头部不适以及可能产生的疼痛感, HD-tDCS 在实验开始后和结束前电流有 30 s 的淡入淡出时间。对于伪刺激, 电极点放置与阳极刺激和阴极刺激一致, 实验开始时电流在 30 s 内渐升至 1.5 mA, 随后在 30 s 内渐降至 0 mA, 以确保被试不知道接受的是哪种刺激。阴极和阳极刺激均以 1.5 mA 电流强度刺激左侧梭状回/左侧顶下小叶 20 分钟。电刺激结束后被试需要完成 15 分钟左右的正式试验, 实验 2a 采用的是视觉相似性的刺激材料, 实验 2b 采用的是听觉相似性的刺激材料。为了保证 HD-tDCS 实验间隔至少 50 分钟的影响(Boggio et al., 2009; Ragert et al., 2008), 要求被试分成三天完成三次 HD-tDCS 实验(伪刺激、阳极刺激和阴极刺激)。为了避免练习效应, 本实验对伪刺激、阳极刺激和阴极刺激进行被试内平衡。

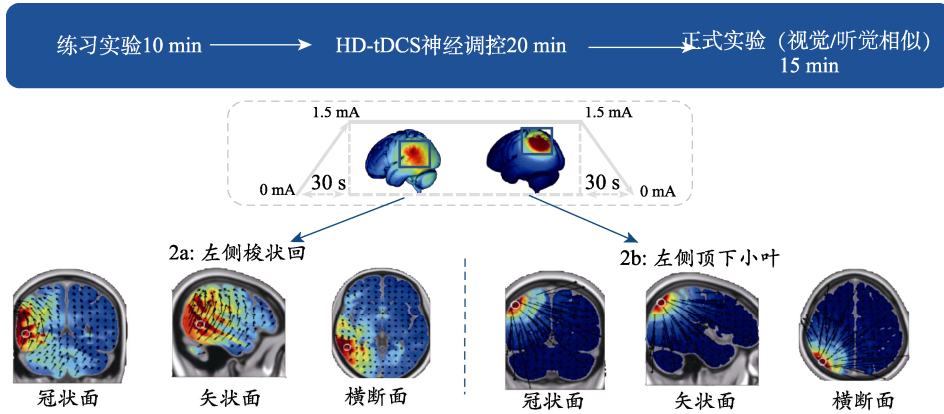


图 5 HD-explore 软件模拟的 1.5 mA 的 HD-tDCS 刺激左侧梭状回和左侧顶下小叶的电场强度和电流走向图

3.1.4 结果

与实验 1 相同, 实验 2a 和实验 2b 中所有条件下平均正确率均显著高于 96%, 且不同条件间的平均正确率均没有显著差异($p > 0.05$)。因此, 仅对正确条件下试次的平均反应时进行分析, 并剔除超过 ± 3 个标准差的极端值数据。此外, 同样采用一致性效应指标值衡量跨通道冲突的加工水平, 以及视觉主导效应指标量化不同认知加工阶段的冲突差异。

实验 2a

(1) 反应时

为了考察 HD-tDCS 的调控作用, 分别对不同电刺激类型的均值反应时进行 2 (注意通道: 视觉 vs. 听觉) \times 3 (视听通道一致性: 一致 vs. 反应前不一致 vs. 反应不一致) 的重复测量方差分析。伪刺激条件下的结果发现(见图 6a), 注意通道主效应显著, $F(1, 25) = 384.92, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.94$, 注意听觉通道的反应时(552 ms)显著高于注意视觉通道(438 ms)。视听通道一致性主效应显著, $F(2, 50) = 19.06, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.43$, 反应前不一致(498 ms)和反应不一致的反应时(504 ms)显著高于一致条件(483 ms)。注意通道和视听通道一致性交互作用显著, $F(2, 50) = 19.40, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.44$ 。简单效应分析结果发现, 在注意视觉通道条件下, 一致条件(437 ms)和反应前不一致条件(439 ms)的反应时差异不显著, $t < 1$; 一致条件(437 ms)和反应不一致条

件(439 ms)的反应时差异不显著, $t < 1$; 反应前不一致条件(439 ms)和反应不一致条件(439 ms)的反应时差异不显著, $t < 1$ 。在注意听觉通道条件下, 一致条件(528 ms)和反应前不一致条件(557 ms)的反应时差异显著, $t(25) = 4.86, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 0.90, 95\% \text{ CI} = [0.43, 1.38]$; 一致条件(528 ms)和反应不一致条件(570 ms)的反应时差异显著, $t(25) = 5.13, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.31, 95\% \text{ CI} = [0.65, 1.96]$; 反应前不一致条件(557 ms)和反应不一致条件(570 ms)的反应时差异显著, $t(25) = 2.87, p = 0.025, \text{Cohen's } d = 0.40, 95\% \text{ CI} = [0.04, 0.77]$ 。

阳极刺激条件下的结果发现(见图 6b), 注意通道主效应显著, $F(1, 25) = 300.05, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.92$, 注意听觉通道的反应时(535 ms)显著高于注意视觉通道(434 ms)。视听通道一致性主效应显著, $F(2, 50) = 33.70, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.57$, 反应前不一致(487 ms)和反应不一致的反应时(495 ms)显著高于一致条件(471 ms)。注意通道和视听通道一致性交互作用显著, $F(2, 50) = 12.07, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.33$ 。简单效应分析结果发现, 在注意视觉通道条件下, 一致条件(427 ms)和反应前不一致条件(438 ms)的反应时差异显著, $t(25) = 3.55, p = 0.005, \text{Cohen's } d = 0.35, 95\% \text{ CI} = [0.10, 0.60]$; 一致条件(427 ms)和反应不一致条件(436 ms)的反应时差异不显著, $t(25) = 2.27, p = 0.096$; 反应前不一致条件(438 ms)

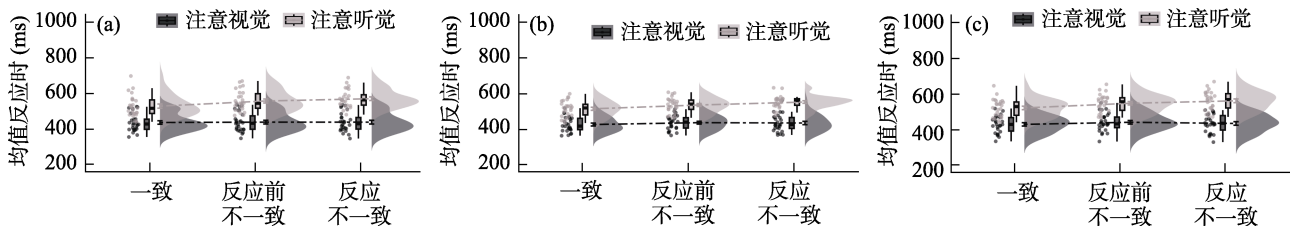


图 6 不同实验条件的反应时结果。(a) 伪刺激; (b) 阳极刺激; (c) 阴极刺激。

和反应不一致条件(436 ms)的反应时差异不显著, $t < 1$ 。在注意听觉通道条件下, 一致条件(515 ms)和反应前不一致条件(537 ms)的反应时差异显著, $t(25) = 7.98, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 0.70, 95\% \text{ CI} = [0.48, 0.93]$; 一致条件(515 ms)和反应不一致条件(553 ms)的反应时差异显著, $t(25) = 6.33, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.26, 95\% \text{ CI} = [0.75, 1.78]$; 反应前不一致条件(537 ms)和反应不一致条件(553 ms)的反应时差异显著, $t(25) = 3.29, p = 0.009, \text{Cohen's } d = 0.56, 95\% \text{ CI} = [0.12, 0.99]$ 。

阴极刺激条件下的结果发现(见图 6c), 注意通道主效应显著, $F(1, 25) = 325.02, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.93$, 注意听觉通道的反应时(542 ms)显著高于注意视觉通道(434 ms)。视听通道一致性主效应显著, $F(2, 50) = 36.11, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.59$, 反应前不一致(493 ms)和反应不一致的反应时(497 ms)显著高于一致条件(474 ms)。注意通道和视听通道一致性交互作用显著, $F(2, 50) = 20.13, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.45$ 。简单效应分析结果发现, 在注意视觉通道条件下, 一致条件(428 ms)和反应前不一致条件(440 ms)的反应时差异显著, $t(25) = 3.11, p = 0.014, \text{Cohen's } d = 0.39, 95\% \text{ CI} = [0.07, 0.72]$; 一致条件(428 ms)和反应不一致条件(433 ms)的反应时差异不显著, $t(25) = 2.12, p = 0.133$; 反应前不一致条件(440 ms)和反应不一致条件(433 ms)的反应时差异不显著, $t(25) = 1.77, p = 0.268$ 。在注意听觉通道条件下, 一致条件(520 ms)和反应前不一致条件(546 ms)的反应时差异显著, $t(25) = 5.76, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 0.88, 95\% \text{ CI} = [0.49, 1.26]$; 一致条件(520 ms)和反应不一致条件(560 ms)的反应时差异显著, $t(25) = 8.24, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.34, 95\% \text{ CI} = [0.92, 1.75]$; 反应前不一致条件(546 ms)和反应不一致条件(560 ms)的反应时差异显著, $t(25) = 3.43, p = 0.006, \text{Cohen's } d = 0.46, 95\% \text{ CI} = [0.12, 0.81]$ 。

(2) 一致性效应

对三种电极类型的一致性效应分别进行了 2 (注意通道: 视觉 vs. 听觉) \times 2 (认知加工水平: 反应前水平 vs. 反应水平)的重复测量方差分析。伪刺激条件下的结果发现(见图 7a), 注意通道主效应显著, $F(1, 25) = 26.00, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.51$, 注意听觉通道的一致性效应(20.82 ms)显著高于注意视觉通道(0.98 ms)。认知加工水平主效应显著, $F(1, 25) = 5.90, p = 0.023, \eta_p^2 = 0.19$, 反应前水平的一致性效应(15.42 ms)显著高于反应水平(6.38 ms)。注意通道和认知加工水平交互作用不显著, $F(1, 25) = 2.61, p = 0.119$ 。虽然交互作用不显著, 但为了探究不同认知加工水平下注意通道的一致性效应量是否存在差异, 分别对反应前水平和反应水平的一致性效应量进行配对样本 t 检验。结果发现在反应前水平条件下, 注意视觉通道条件的一致性效应量(2.09 ms)显著低于注意听觉通道条件(28.75 ms), $t(25) = 3.96, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.10, 95\% \text{ CI} = [0.51, 1.68]$ 。在反应水平条件下, 注意视觉通道条件的一致性效应量(-0.13 ms)显著低于注意听觉通道条件(12.89 ms), $t(25) = 2.86, p = 0.008, \text{Cohen's } d = 0.79, 95\% \text{ CI} = [0.22, 1.36]$ 。以上结果说明, 对于伪刺激条件, 反应前水平和反应水平均表现为视觉主导效应。

此外, 为了比较本实验视觉相似条件的伪刺激实验和行为实验的差异, 对一致性效应进行了 2 (实验类型: 行为实验 vs. 伪刺激实验) \times 2 (注意通道: 注意视觉通道 vs. 注意听觉通道) \times 2 (认知加工水平: 反应前水平 vs. 反应水平)的混合方差分析。结果发现实验类型主效应不显著, $F(1, 58) = 1.58, p = 0.213$ 。认知加工水平主效应显著, $F(1, 58) = 11.96, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.17$ 。注意通道主效应显著, $F(1, 58) = 39.13, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.40$ 。实验类型与认知加工水平交互作用不显著, $F < 1$ 。认知加工水平

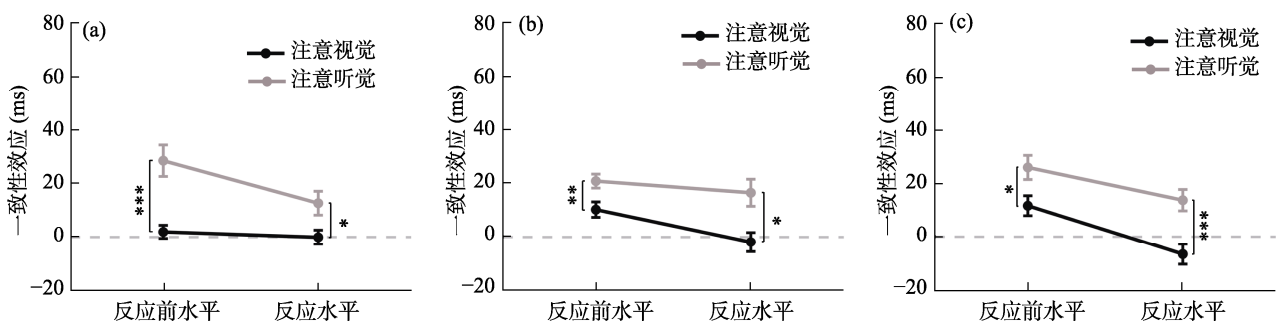


图 7 三种电极类型所有实验条件的一致性效应结果。(a) 伪刺激; (b) 阳极刺激; (c) 阴极刺激。

与注意通道交互作用显著, $F(1, 58) = 4.47, p = 0.039, \eta_p^2 = 0.07$ 。实验类型与注意通道交互作用显著, $F(1, 58) = 4.84, p = 0.032, \eta_p^2 = 0.08$ 。实验类型、注意通道与认知加工水平交互作用不显著, $F < 1$ 。对实验类型与注意通道交互作用进行简单效应分析, 结果发现在行为实验条件下, 注意视觉通道条件的一致性效应量(2.87 ms)显著低于注意听觉通道条件(12.39 ms), $t(58) = 3.08, p = 0.003, \text{Cohen's } d = 0.29, 95\% \text{ CI} = [0.10, 0.48]$; 在伪刺激条件下, 注意视觉通道条件的一致性效应量(0.98 ms)显著低于注意听觉通道条件(20.82 ms), $t(58) = 3.08, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 0.61, 95\% \text{ CI} = [0.39, 0.83]$ 。这表明, 无论哪种实验类型, 两种注意通道的一致性效应量均存在显著差异。本实验也对交互作用的另一方向进行了分析, 结果发现, 在注意视觉通道下, 行为实验(2.87 ms)与伪刺激实验(0.98 ms)的一致性效应量无显著差异, $t(58) = 1.05, p = 0.298$; 在注意听觉通道下, 行为实验(12.39 ms)与伪刺激实验(20.82 ms)的一致性效应量无显著差异, $t(58) = 1.83, p = 0.073$ 。这表明, 无论哪种注意通道, 两种实验类型的一致性效应量均无显著差异。

阳极刺激结果发现(见图 7b), 注意通道主效应显著, $F(1, 25) = 17.17, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.41$, 注意听觉通道的一致性效应(18.88 ms)显著高于注意视觉通道(4.28 ms)。认知加工水平主效应显著, $F(1, 25) = 5.49, p = 0.027, \eta_p^2 = 0.18$, 反应前水平的一致性效应(15.71 ms)显著高于反应水平(7.45 ms)。注意通道和认知加工水平交互作用不显著, $F < 1$ 。为了获取更多信息, 分别对反应前水平和反应水平的一致性效应量进行配对样本 t 检验。结果发现在反应前水平条件下, 注意视觉通道条件的一致性效应量(10.35 ms)显著低于注意听觉通道条件(21.06 ms), $t(25) = 3.25, p = 0.003, \text{Cohen's } d = 0.92, 95\% \text{ CI} = [0.33, 1.50]$ 。在反应水平条件下, 注意视觉通道条件的一致性效应量(-1.80 ms)显著低于注意听觉通道条件(16.70 ms), $t(25) = 2.67, p = 0.013, \text{Cohen's } d = 0.76, 95\% \text{ CI} = [0.18, 1.50]$ 。以上结果说明, 对于阳极刺激条件, 反应前水平和反应水平均表现为视觉主导效应。

阴极刺激结果发现(见图 7c), 注意通道主效应显著, $F(1, 25) = 36.55, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.59$, 注意听觉通道的一致性效应(19.90 ms)显著高于注意视觉通道(2.56 ms)。认知加工水平主效应显著, $F(1, 25) = 8.01, p = 0.009, \eta_p^2 = 0.24$, 反应前水平的一致性效

应(18.89 ms)显著高于反应水平(3.58 ms)。注意通道和认知加工水平交互作用不显著, $F < 1$ 。为了获取更多信息, 分别对反应前水平和反应水平的一致性效应量进行配对样本 t 检验。结果发现在反应前水平条件下, 注意听觉通道条件的一致性效应量(26.07 ms)显著高于注意视觉通道条件(11.70 ms), $t(25) = 2.43, p = 0.023, \text{Cohen's } d = 0.69, 95\% \text{ CI} = [0.11, 1.25]$ 。在反应水平条件下, 注意听觉通道条件的一致性效应量(13.73 ms)显著高于注意视觉通道条件(-6.57 ms), $t(25) = 4.29, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.21, 95\% \text{ CI} = [0.60, 1.81]$ 。以上结果说明, 对于阴极刺激条件, 反应前水平和反应水平均表现为视觉主导效应。

(3) 感觉主导效应

为了综合比较不同电极类型之间的感觉主导效应差异, 首先, 对两个认知加工水平的阳极刺激条件和伪刺激条件的感觉主导效应进行配对样本 t 检验(见图 8a)。结果发现, 在反应前水平条件下, 阳极刺激条件的视觉主导效应(10.71 ms)显著低于伪刺激条件(26.66 ms), $t(25) = 2.18, p = 0.039, \text{Cohen's } d = 0.62, 95\% \text{ CI} = [0.05, 1.18]$ 。在反应水平条件下, 阳极刺激条件(18.50 ms)和伪刺激条件(13.02 ms)的听觉主导效应无显著差异, $t < 1$ 。结果表明, 与伪刺激条件相比, 阳极刺激条件显著减少了反应前水平的视觉主导效应。其次, 对两个认知加工水平的阴极刺激条件和伪刺激条件的感觉主导效应进行配对样本 t 检验(见图 8b)。结果发现, 在反应前水平条件下, 阴极刺激条件(14.38 ms)和伪刺激条件(26.66 ms)的视觉主导效应无显著差异, $t(25) = 2.04, p = 0.052$ 。在反应水平条件下, 阴极刺激条件(20.30 ms)和伪刺激条件(13.02 ms)的听觉主导效应无显著差异, $t(25) = 1.16, p = 0.256$ 。结果表明, 与伪刺激条件相比, 阴极刺激条件没有产生效果。

实验 2b

剔除错误试次和超过 ± 3 个标准差的反应时数据后, 对 24 名被试的数据进行分析。由于被试的平均正确率较高(伪刺激: 96.69%; 阳极刺激: 96.35%; 阴极刺激: 96.73%), 平均漏报率较低(伪刺激: 0.03%; 阳极刺激: 0.01%; 阴极刺激: 0.01%), 因此本实验不再对正确率和漏报率进行分析。数据分析软件和校正方式与实验 1 相同。

(1) 反应时

对三种电刺激类型的反应时分别进行了 2 (注意通道: 视觉 vs. 听觉) \times 3 (视听通道一致性: 一

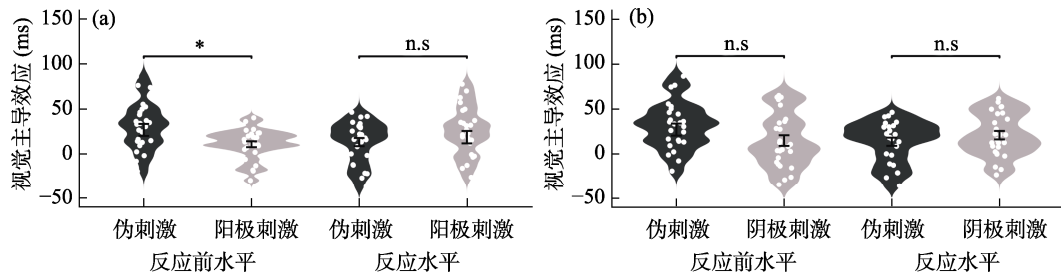


图 8 不同电极类型在反应前水平和反应水平的感觉主导效应差异。(a) 阳极刺激与伪刺激; (b) 阴极刺激与伪刺激。

致 vs. 反应前不一致 vs. 反应不一致)的重复测量方差分析。伪刺激结果发现(见图 9a), 注意通道主效应显著, $F(1, 23) = 512.31, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.96$, 注意听觉通道的反应时(654 ms)显著高于注意视觉通道(486 ms)。视听通道一致性主效应显著, $F(2, 46) = 46.71, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.67$, 反应前不一致(582 ms)和反应不一致的反应时(583 ms)显著高于一致条件(545 ms)。注意通道和视听通道一致性交互作用显著, $F(2, 46) = 26.44, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.54$ 。简单效应分析结果发现, 在注意视觉通道条件下, 一致条件(476 ms)和反应前不一致条件(493 ms)的反应时差异显著, $t(23) = 2.67, p = 0.041, \text{Cohen's } d = 0.45, 95\% \text{ CI} = [0.02, 0.88]$; 一致条件(476 ms)和反应不一致条件(489 ms)的反应时差异显著, $t(23) = 2.72, p = 0.037, \text{Cohen's } d = 0.32, 95\% \text{ CI} = [0.02, 0.63]$; 反应前不一致条件(493 ms)和反应不一致条件(489 ms)的反应时差异不显著, $t(23) = 1.00, p = 0.981$ 。在注意听觉通道条件下, 一致条件(614 ms)和反应前不一致条件(671 ms)的反应时差异显著, $t(23) = 7.86, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.51, 95\% \text{ CI} = [1.01, 2.00]$; 一致条件(614 ms)和反应不一致条件(677 ms)的反应时差异显著, $t(23) = 9.29, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.67, 95\% \text{ CI} = [1.20, 2.13]$; 反应前不一致条件(671 ms)和反应不一致条件(677 ms)的反应时差异不显著, $t(23) = 1.38, p = 0.540$ 。

阳极刺激结果发现(见图 9b), 注意通道主效应显著, $F(1, 23) = 313.33, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.93$, 注意听觉通道的反应时(646 ms)显著高于注意视觉通道

(482 ms)。视听通道一致性主效应显著, $F(2, 46) = 65.41, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.74$, 反应前不一致(580 ms)和反应不一致的反应时(576 ms)显著高于一致条件(537 ms)。注意通道和视听通道一致性交互作用显著, $F(2, 46) = 33.99, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.60$ 。简单效应分析结果发现, 在注意视觉通道条件下, 一致条件(475 ms)和反应前不一致条件(488 ms)的反应时差异显著, $t(23) = 2.74, p = 0.035, \text{Cohen's } d = 0.31, 95\% \text{ CI} = [0.02, 0.61]$; 一致条件(475 ms)和反应不一致条件(483 ms)的反应时差异不显著, $t(23) = 1.52, p = 0.429$; 反应前不一致条件(488 ms)和反应不一致条件(483 ms)的反应时差异不显著, $t(23) = 1.30, p = 0.618$ 。在注意听觉通道条件下, 一致条件(599 ms)和反应前不一致条件(671 ms)的反应时差异显著, $t(23) = 10.13, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.65, 95\% \text{ CI} = [1.23, 2.07]$; 一致条件(599 ms)和反应不一致条件(669 ms)的反应时差异显著, $t(23) = 9.30, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.60, 95\% \text{ CI} = [1.15, 2.04]$; 反应前不一致条件(671 ms)和反应不一致条件(669 ms)的反应时差异不显著, $t < 1$ 。

阴极刺激结果发现(见图 9c), 注意通道主效应显著, $F(1, 23) = 584.35, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.96$, 注意听觉通道的反应时(638 ms)显著高于注意视觉通道(466 ms)。视听通道一致性主效应显著, $F(2, 46) = 43.82, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.66$, 反应前不一致(564 ms)和反应不一致的反应时(567 ms)显著高于一致条件(525 ms)。注意通道和视听通道一致性交互作用显著, $F(2, 46) = 35.67, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.61$ 。简单效应

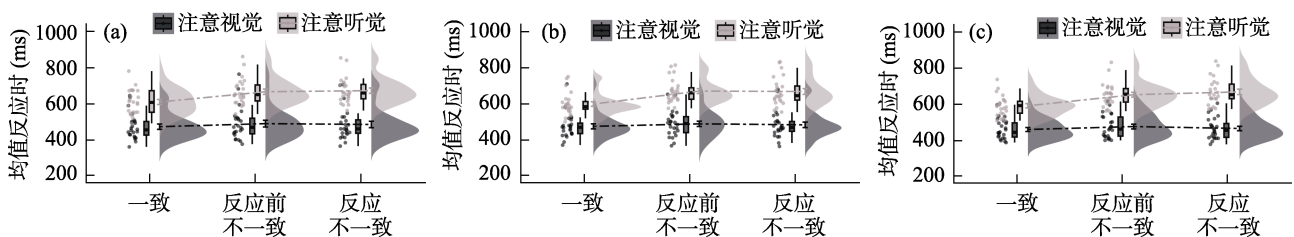


图 9 三种电刺激类型所有实验条件的反应时结果。(a) 伪刺激; (b) 阳极刺激; (c) 阴极刺激。

分析结果发现, 在注意视觉通道条件下, 一致条件(459 ms)和反应前不一致条件(475 ms)的反应时差异显著, $t(23) = 3.06, p = 0.017, \text{Cohen's } d = 0.42, 95\% \text{ CI} = [0.07, 0.77]$; 一致条件(459 ms)和反应不一致条件(464 ms)的反应时差异不显著, $t(23) = 1.07, p = 0.884$; 反应前不一致条件(475 ms)和反应不一致条件(464 ms)的反应时差异显著, $t(23) = 2.96, p = 0.021, \text{Cohen's } d = 0.28, 95\% \text{ CI} = [0.04, 0.52]$ 。在注意听觉通道条件下, 一致条件(591 ms)和反应前不一致条件(653 ms)的反应时差异显著, $t(23) = 7.09, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.56, 95\% \text{ CI} = [0.99, 2.13]$; 一致条件(591 ms)和反应不一致条件(669 ms)的反应时差异显著, $t(23) = 9.83, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.97, 95\% \text{ CI} = [1.45, 2.48]$; 反应前不一致条件(653 ms)和反应不一致条件(669 ms)的反应时差异不显著, $t(23) = 2.22, p = 0.110$ 。

(2) 一致性效应

对三种电极类型的一致性效应分别进行了 2 (注意通道: 注意视觉通道 vs. 注意听觉通道) \times 2 (认知加工水平: 反应前水平 vs. 反应水平) 的重复测量方差分析。伪刺激结果发现(见图 10a), 注意通道主效应显著, $F(1, 23) = 52.87, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.70$, 注意听觉通道的一致性效应(31.63 ms)显著高于注意视觉通道(6.12 ms)。认知加工水平主效应显著, $F(1, 23) = 23.35, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.50$, 反应前水平的一致性效应(37.11 ms)显著高于反应水平(0.64 ms)。注意通道和认知加工水平交互作用显著, $F(1, 23) = 4.79, p = 0.039, \eta_p^2 = 0.17$ 。简单效应分析结果发现, 在反应前水平条件下, 注意听觉通道条件的一致性效应量(57.20 ms)显著高于注意视觉通道条件(17.01 ms), $t(23) = 4.75, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 0.94, 95\% \text{ CI} = [0.53, 1.35]$ 。在反应水平条件下, 注意听觉通道条件(6.05 ms)与注意视觉通道条件(-4.76 ms)的一致性效应量无显著差异, $t(23) = 1.65, p = 0.113$ 。这一结果表明, 视觉干扰听觉目标与听觉干

扰视觉目标均会产生干扰效应, 但两者无显著差异。以上结果说明, 对于伪刺激条件, 反应前水平表现为视觉主导效应, 而反应水平无感觉主导效应。

此外, 为了比较本实验听觉相似条件的伪刺激实验和行为实验的差异, 对一致性效应进行了 2 (实验类型: 行为实验 vs. 伪刺激实验) \times 2 (注意通道: 注意视觉通道 vs. 注意听觉通道) \times 2 (认知加工水平: 反应前水平 vs. 反应水平) 的混合方差分析。结果发现实验类型主效应不显著, $F < 1$ 。认知加工水平主效应显著, $F(1, 56) = 70.23, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.56$ 。注意通道主效应显著, $F(1, 56) = 126.00, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.69$ 。实验类型与认知加工水平交互作用不显著, $F < 1$ 。认知加工水平与注意通道交互作用显著, $F(1, 56) = 31.48, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.36$ 。实验类型与注意通道交互作用不显著, $F < 1$ 。实验类型、注意通道与认知加工水平交互作用显著, $F(1, 56) = 5.03, p = 0.029, \eta_p^2 = 0.08$ 。简单效应分析结果发现, 在反应前水平, 注意视觉通道条件下, 行为实验(2.99 ms)与伪刺激实验(17.01 ms)的一致性效应量无显著差异, $t(56) = 2.21, p = 0.188$; 在反应前水平, 注意听觉通道条件下, 行为实验(66.02 ms)与伪刺激实验(57.20 ms)的一致性效应量无显著差异, $t < 1$; 在反应水平, 注意视觉通道条件下, 行为实验(2.14 ms)与伪刺激实验(-4.76 ms)的一致性效应量无显著差异, $t < 1$; 在反应水平, 注意听觉通道条件下, 行为实验(-3.32 ms)与伪刺激实验(6.05 ms)的一致性效应量无显著差异, $t < 1$ 。这表明, 无论哪种认知加工水平和注意通道, 两种实验类型的一致性效应量均无显著差异。

阳极刺激结果发现(见图 10b), 注意通道主效应显著, $F(1, 23) = 41.96, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.65$, 注意听觉通道的一致性效应(34.86 ms)显著高于注意视觉通道(4.19 ms)。认知加工水平主效应显著, $F(1, 23) = 53.76, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.70$, 反应前水平的一致性效应(42.83 ms)显著高于反应水平(-3.78 ms)。

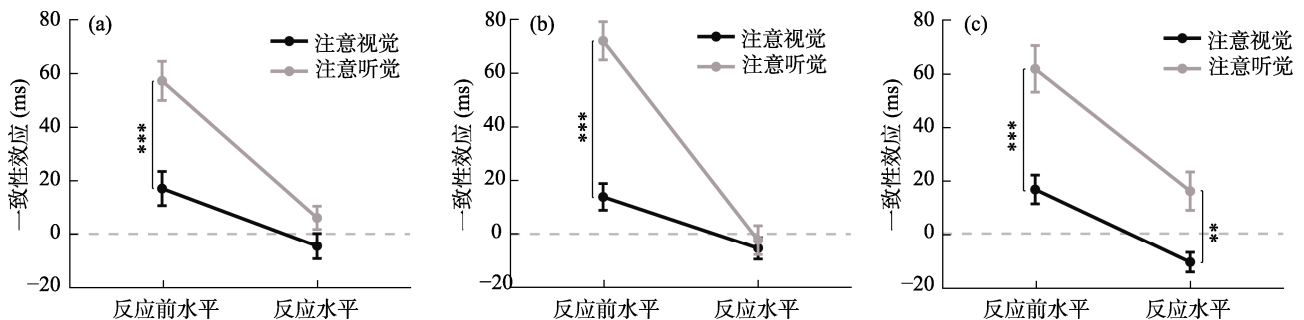


图 10 三种电极类型所有实验条件的一致性效应结果。(a) 伪刺激; (b) 阳极刺激; (c) 阴极刺激。

注意通道和认知加工水平交互作用显著, $F(1, 23) = 19.95, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.46$ 。简单效应分析结果发现, 在反应前水平条件下, 注意听觉通道条件的一致性效应量(71.96 ms)显著高于注意视觉通道条件(13.69 ms), $t(23) = 6.97, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.45, 95\% \text{ CI} = [1.02, 1.88]$ 。在反应水平条件下, 注意听觉通道条件(-2.24 ms)与注意视觉通道条件(-5.32 ms)的一致性效应量无显著差异, $t < 1$ 。这一结果表明, 视觉干扰听觉目标与听觉干扰视觉目标均会产生干扰效应, 但两者无显著差异。以上结果说明, 对于阳极刺激条件, 反应前水平表现为视觉主导效应, 而反应水平无感觉主导效应。

阴极刺激结果发现(见图 10c), 注意通道主效应显著, $F(1, 23) = 111.77, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.83$, 注意听觉通道的一致性效应(38.75 ms)显著高于注意视觉通道(2.83 ms)。认知加工水平主效应显著, $F(1, 23) = 27.57, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.55$, 反应前水平的一致性效应(39.05 ms)显著高于反应水平(2.53 ms)。注意通道和认知加工水平交互作用不显著, $F(1, 23) = 1.09, p = 0.307$ 。为了获取更多信息, 分别对反应前水平和反应水平的一致性效应量进行配对样本 t 检验。结果发现在反应前水平条件下, 注意听觉通道条件的一致性效应量(61.57 ms)显著高于注意视觉通道条件(16.52 ms), $t(23) = 4.40, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.27, 95\% \text{ CI} = [0.64, 1.89]$ 。在反应水平条件下, 注意听觉通道条件的一致性效应量(15.93 ms)显著高于注意视觉通道条件(-10.87 ms), $t(23) = 3.19, p = 0.004, \text{Cohen's } d = 0.92, 95\% \text{ CI} = [0.32, 1.51]$ 。这一结果表明, 视觉的一致性效应大于听觉的一致性效应。以上结果说明, 对于阴极刺激条件, 两个认知加工水平均表现为视觉主导效应。与伪刺激条件相比, 阴极刺激条件使反应水平出现了视觉主导效应。

(3) 感觉主导效应

为了比较不同电刺激类型之间的感觉主导效应差异, 首先, 对两种认知加工水平的阳极刺激条件和伪刺激条件的感觉主导效应进行配对样本 t 检验(见图 11a)。结果发现, 在反应前水平条件下, 阳极刺激条件的视觉主导效应(58.26 ms)显著高于伪刺激条件(40.19 ms), $t(23) = 2.31, p = 0.030, \text{Cohen's } d = 0.67, 95\% \text{ CI} = [0.08, 1.25]$ 。在反应水平条件下, 阳极刺激条件(3.08 ms)和伪刺激条件(10.81 ms)的听觉主导效应无显著差异, $t < 1$ 。以上结果表明, 与伪刺激条件相比, 阳极刺激条件显著增加了反应前水平的视觉主导效应。其次, 对两种认知加工水平的阴极刺激条件和伪刺激条件的感觉主导效应进行配对样本 t 检验(见图 11b)。结果发现, 在反应前水平条件下, 阴极刺激条件(45.05 ms)和伪刺激条件(40.19 ms)的视觉主导效应无显著差异, $t < 1$ 。在反应水平条件下, 阴极刺激条件(26.80 ms)和伪刺激条件(10.81 ms)的听觉主导效应无显著差异, $t(23) = 1.51, p = 0.145$ 。以上结果表明, 与伪刺激条件相比, 阴极刺激条件没有改变视觉主导效应的大小。

4 总讨论

本研究采用 2-1 映射范式, 通过行为实验(实验 1)与神经调控实验(实验 2)考察了刺激相似性对跨通道冲突中的感觉主导效应的调控机制。实验 1 发现刺激相似性差异调节了反应前水平和反应水平的感觉主导效应, 具体表现为视觉相似性显著降低了反应前水平的视觉主导效应和反应水平的听觉主导效应, 听觉相似性显著增强了反应前水平的视觉主导效应以及消除了反应水平的听觉主导效应。实验 2 进一步通过 tDCS 靶向调控视觉相似性(左侧梭状回)和听觉相似性(左侧顶下小叶)加工的关键脑区, 结果发现阳极刺激左侧梭状回削弱反应前水

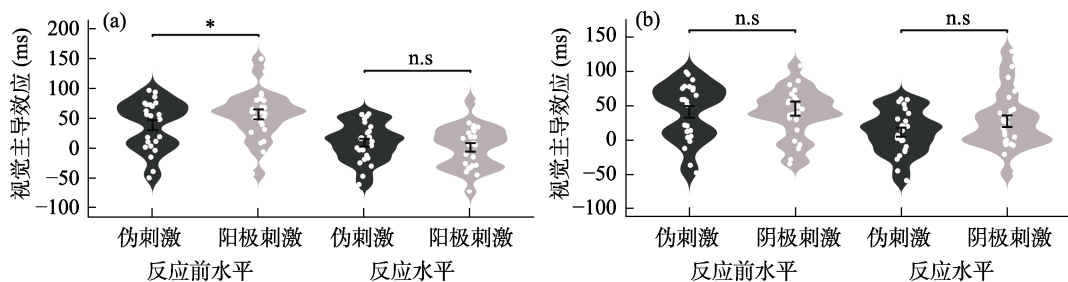


图 11 不同电极类型在反应前水平和反应水平的感觉主导效应差异。(a) 阳极刺激与伪刺激;(b) 阴极刺激与伪刺激。

平的视觉主导效应, 阳极刺激左侧顶下小叶增强反应前水平视觉主导效应, 这些发现因果性地验证了左侧梭状回和顶下小叶在两类相似性加工中的特异性作用。

与以往研究结果一致, 本研究发现反应前水平视觉通道占据主导地位, 而反应水平听觉通道占据主导地位(Chen & Zhou, 2013; Huang et al., 2015; Li et al., 2019)。采用 2-1 映射范式的研究认为, 从一致条件到反应前不一致条件再到反应不一致条件, 反应时逐渐增加(Chen & Zhou, 2013; De Houwer, 2003; Zhang & Kornblum, 1998)。本研究同样发现, 无论注意分配至视觉还是听觉通道, 不一致条件下的反应时均显著长于一致条件, 这进一步验证了跨通道冲突中的一致性效应的稳定性(Diaconescu et al., 2011; Donohue et al., 2013; Misselhorn et al., 2019)。并且, 不相似条件下, 反应前水平注意听觉通道条件的一致性效应量显著高于注意视觉通道条件, 而反应水平注意听觉通道条件的一致性效应量显著低于注意视觉通道条件。这一结果支持了认知加工水平假说, 即视觉信息在反应前水平更易获得注意资源, 从而在反应前水平占据主导, 而听觉信息由于与运动系统连接更为紧密, 更容易在反应水平引发冲突(Chikazoe et al., 2009; Swick et al., 2008; Zatorre et al., 2007)。

重要的是, 研究发现刺激相似性能够有效调节反应前水平和反应水平的感觉主导效应。具体而言, 相比不相似条件, 视觉相似性减小了反应前水平的视觉主导效应, 这可能源于视觉相似性提高了目标刺激的加工效率, 降低了视觉干扰信息的竞争程度(Gerlach et al., 2015; Joseph & Gathers, 2003)。以往研究表明, 视觉相似的对象比不相似对象的类别分类速度更快(Gale et al., 2006)是源自视觉相似性能够有效简化整体表征, 降低被试的知觉负载, 从而提升目标的识别效率(Quinlan & Cohen, 2012)。因此本研究发现, 当注意听觉通道时, 视觉相似干扰刺激简化整体表征, 致使一致性效应降低, 进而使得视觉主导效应相较于不相似条件减小。此外, 视觉相似性减小反应水平的听觉主导效应, 源于认知加工的连续性, 早期的认知加工能够影响晚期的认知加工(周衡等, 2025)。相反, 相比不相似条件, 听觉相似性则显著增强了反应前水平的视觉主导效应并消除了反应水平的听觉主导效应, 这可能是由于语音相似性增大了干扰效应, 导致目标编码与干扰信息的竞争性加强(Bosworth et al., 2021; Montgomery,

1995; Storkel et al., 2014)。这些结果支持了以往研究的发现, 表明了刺激相似性能够显著影响认知加工的效率(Bosworth et al., 2021; Gerlach et al., 2015)。从行为机制角度分析, 这种现象可能源于语音相似性引发的词汇和语音表征连接强度变化(Breining et al., 2016)。例如, 在学习场景中仅有两个听觉相似的词汇(“cat”-“cap”), 当对一个项目进行命名后, 目标编码与语音水平之间的联系加强, 其他共同激活的语音相关词汇与语音水平的联系则减弱, 进而在命名与语音相关项目时, 干扰效应增大(Qu et al., 2021)。在本研究听觉相似条件下, 当被试注意听觉刺激时, 目标刺激编码与语音水平联系增强, 干扰刺激与语音水平联系减弱, 最终导致一致性效应增加。在 Stroop 任务中的研究也为语音相似干扰效应提供了证据, 其发现共享初始音素或末尾音素的单词会产生干扰效应, 且初始音素干扰效应更大(Dalrymple-Alford, 1972)。同样地, Bosworth 等人(2021)采用不同听觉相似程度材料进行 Stroop 颜色命名任务, 同样证实听觉相似性越高, 干扰效应越大。总之, 这些结果均支持本研究的发现, 表明听觉相似性能够增强反应前水平的视觉主导效应。

本研究进一步明确了左侧梭状回和左侧顶下小叶分别参与视觉和听觉相似性的认知加工。具体而言, 实验 1 发现视觉相似性显著削弱了反应前水平的视觉主导效应, 但阳极刺激左侧梭状回后, 反应前水平的视觉主导效应显著减弱, 这说明左侧梭状回在视觉相似信息加工中发挥抑制干扰效应的作用。以往研究表明, 左侧梭状回常被视为处理文字相似性和字形特征的关键脑区, 其激活程度与视觉相似性呈正相关(Dehaene & Cohen, 2011; Guo et al., 2022; Vinckier et al., 2007)。本研究这一结果与此前研究认为梭状回参与视觉信息特征表征的功能定位一致。此外, 也有研究指出下颞叶皮层作为腹侧视觉通路的重要组成部分, 在复杂图形和文字识别过程中同样具有重要作用, 尤其涉及到语义表征和模式识别(Grill-Spector & Weiner, 2014; Martin, 2007)。另一方面, 实验 1 发现听觉相似条件显著增大了反应前水平的视觉主导效应, 但阳极刺激左侧顶下小叶后, 反应前水平的视觉主导效应显著增强, 这说明顶下小叶在听觉相似性信息的加工中发挥了促进干扰效应的作用(Mummery et al., 1998; Younger et al., 2016)。已有研究表明, 左侧顶下小叶作为背侧注意网络的枢纽, 更多地参与了对语音特

征比较、相似性判断以及跨通道整合等高级加工,其 γ 波段活动与语音相似性干扰效应显著相关 (Ciaramidaro et al., 2018; Hickok, 2009)。因此,本研究这一发现支持并验证了以往研究中顶下小叶参与语音相似性和语义加工的结果。然而,语音信息的加工是一个层级过程,除了左侧顶下小叶外,初级听觉皮层和颞上回在较低级的声学特征分析和音素区分中起关键性作用 (DeWitt & Rauschecker, 2012; Hickok & Poeppel, 2007)。其中,颞上回后部被认为在语音感知中的音位处理和声学-语音映射中扮演重要角色 (DeWitt & Rauschecker, 2012; Hickok & Poeppel, 2007)。

然而,对相似性加工区域进行阴极刺激并未显著影响感觉主导效应。具体而言,阴极刺激左侧梭状回(14.38 ms)并未使在反应前水平的视觉主导效应量和伪刺激条件(26.66 ms)之间达到统计学水平上的显著差异($p = 0.052$),但阴极刺激条件的视觉主导效应量几乎与阳极刺激条件下(16.14 ms)产生的效果一致;阴极刺激左侧顶下小叶(45.05 ms)时反应前水平的视觉主导效应量和伪刺激条件(40.19 ms)之间没有显著差异。这一结果可能是由于 tDCS 调控效应受到个体差异和皮层兴奋抑制(E/I)平衡的影响,导致阴极刺激未能显著改变脑区的兴奋性,从而表现出效应的不稳定 (Krause et al., 2013; Weiss & Lavidor, 2012)。例如, Wu 等人(2021)通过 HD-tDCS 技术调控左侧梭状回,发现阳极刺激后的变化程度取决于初始表现,初始表现较差者增益更大,而阴极刺激无显著变化,这与本研究结果相一致。已有研究表明,个体大脑皮层兴奋和抑制之间的最佳平衡(excitation and inhibition, E/I 平衡)因人而异 (Krause et al., 2013)。阳极刺激虽然能提升目标脑区兴奋性,但可能引发过度兴奋和非最佳表现 (Floyer-Lea et al., 2006)。有研究者认为,个体大脑皮层的最佳兴奋-抑制平衡存在一个倒 U 形曲线,较低的兴奋性条件可能更加有利于当前任务的完成 (Krause & Cohen Kadosh, 2014)。值得注意的是,不同脑区对刺激极性的响应存在显著差异,例如对健康的成年人的前额叶区域施加阴极刺激可以明显提高注意集中程度,这可能是由于阴极刺激增强了前额叶对无关信息的过滤功能 (Weiss & Lavidor, 2012)。

总的来说,本研究通过聚焦客体类别表征这一“中间加工水平”对感觉主导效应的调节作用,进一步揭示了基于刺激相似性的客体表征如何调控跨

通道冲突中的感觉主导效应。当视觉相似性增大时,反应前冲突的视觉主导效应显著减弱;当听觉相似性增大时,视觉主导效应则显著增强。这表明跨通道冲突中的感觉主导效应并固定不变,不仅受到自上而下的客体类别表征的影响 (周衡 等, 2025),还受到自下而上的刺激相似性特征及其相关神经区域活动的动态调控。因此,本研究从基于刺激相似性的客体类别表征角度,进一步丰富了认知加工水平假说对于跨通道冲突影响的理论机制。然而,本研究仍存在不足,虽然实验明确了左侧梭状回与左侧顶下小叶在视听觉相似性加工中的重要作用,但目前并不清楚其他重要脑区(如腹侧视觉通路中的下颞叶皮层、听觉通路中的颞上回后部)是否也参与跨通道相似性判断与干扰效应的调节。此外,仅采用行为学和 tDCS 神经调控,并未厘清不同脑区在加工过程中可能存在的动态交互机制及其时程机制。未来研究可采用高空间分辨率(fMRI)或高时间分辨率(MEG/EEG)的相关技术,进一步深入探究视觉相似性加工(如梭状回与下颞叶皮层)和听觉相似性加工(如顶下小叶与颞上回后部)中不同脑区之间的动态交互模式,从而系统地揭示认知加工水平假说下的“中间加工水平”加工调控跨通道冲突的认知神经机制。

5 结论

(1) 在反应前水平,视觉相似性减小了视觉主导效应,与左侧梭状回的神经活动有关;听觉相似性增大了视觉主导效应,与左侧顶下小叶的神经活动有关。

(2) 基于刺激相似性的客体类别表征能够影响跨通道冲突中的感觉主导效应,进一步完善认知加工水平假说下跨通道冲突中感觉主导效应的理论解释。

参 考 文 献

- Abdel Rahman, R., & Melinger, A. (2009). Semantic context effects in language production: A swinging lexical network proposal and a review. *Language and Cognitive Processes*, 24(5), 713-734.
- Ashby, F. G., & Ell, S. W. (2001). The neurobiology of human category learning. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(5), 204-210.
- Boggio, P. S., Zaghi, S., & Fregni, F. (2009). Modulation of emotions associated with images of human pain using anodal transcranial direct current stimulation (tDCS). *Neuropsychologia*, 47(1), 212-217.
- Booth, J. R., Burman, D. D., Meyer, J. R., Gitelman, D. R., Parrish, T. B., & Mesulam, M. M. (2002). Functional anatomy of intra- and cross-modal lexical tasks. *NeuroImage*, 16(1), 7-22.

- Bosworth, R. G., Binder, E. M., Tyler, S. C., & Morford, J. P. (2021). Automaticity of lexical access in deaf and hearing bilinguals: Cross-linguistic evidence from the color Stroop task across five languages. *Cognition*, 212, 104659.
- Breining, B., Nozari, N., & Rapp, B. (2016). Does segmental overlap help or hurt? Evidence from blocked cyclic naming in spoken and written production. *Psychonomic Bulletin & Review*, 23(2), 500–506.
- Cao, F., Lee, R., Shu, H., Yang, Y., Xu, G., Li, K., & Booth, J. R. (2010). Cultural constraints on brain development: Evidence from a developmental study of visual word processing in mandarin Chinese. *Cerebral Cortex*, 20(5), 1223–1233.
- Chen, Q., & Zhou, X. L. (2013). Vision dominates at the pre-response level and audition dominates at the response level in cross-modal interaction: Behavioral and neural evidence. *The Journal of Neuroscience*, 33(17), 7109–7121.
- Chikazoe, J., Jimura, K., Asari, T., Yamashita, K., Morimoto, H., Hirose, S., Miyashita, Y., & Konishi, S. (2009). Functional dissociation in right inferior frontal cortex during performance of go/no-go task. *Cerebral Cortex*, 19(1), 146–152.
- Ciaramidaro, A., Toppi, J., Casper, C., Freitag, C. M., Siniatchkin, M., & Astolfi, L. (2018). Multiple-brain connectivity during third party punishment: An EEG hyperscanning study. *Scientific Reports*, 8(1), 6822.
- Dalrymple-Alford, E. C. (1972). Sound similarity and color-word interference in the Stroop task. *Psychonomic Science*, 28(4), 209–210.
- Dehaene, S., & Cohen, L. (2011). The unique role of the visual word form area in reading. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(6), 254–262.
- De Houwer, J. (2003). On the role of stimulus-response and stimulus-stimulus compatibility in the Stroop effect. *Memory and Cognition*, 31(3), 353–359.
- DeWitt, I., & Rauschecker, J. P. (2012). Phoneme and word recognition in the auditory ventral stream. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(8), E505–E514.
- Diaconescu, A. O., Alain, C., & McIntosh, A. R. (2011). The co-occurrence of multisensory facilitation and cross-modal conflict in the human brain. *Journal of Neurophysiology*, 106(6), 2896–2909.
- Donohue, S. E., Appelbaum, L. G., Park, C. J., Roberts, K. C., & Woldorff, M. G. (2013). Cross-modal stimulus conflict: The behavioral effects of stimulus input timing in a visual-auditory Stroop task. *PLoS ONE*, 8(4), e62802.
- Fitzhugh, M. C., Whitehead, P. S., Johnson, L., Cai, J. M., Baxter, L. C., & Rogalsky, C. (2019). A functional MRI investigation of cross-modal interference in an audiovisual Stroop task. *PLoS ONE*, 14(1), e0210736.
- Floyer-Lea, A., Wylezinska, M., Kincses, T., & Matthews, P. M. (2006). Rapid modulation of GABA concentration in human sensorimotor cortex during motor learning. *Journal of Neurophysiology*, 95(3), 1639–1644.
- Folstein, J. R., Fuller, K., Howard, D., & DePatie, T. (2017). The effect of category learning on attentional modulation of visual cortex. *Neuropsychologia*, 104, 18–30.
- Fong, M. C. M., Hui, N. Y., Fung, E. S. W., Chu, P. C. K., & Wang, W. S. Y. (2018). Conflict monitoring in multi-sensory flanker tasks: Effects of cross-modal distractors on the N2 component. *Neuroscience Letters*, 670, 31–35.
- Gale, T. M., Laws, K. R., & Foley, K. (2006). Crowded and sparse domains in object recognition: Consequences for categorization and naming. *Brain and Cognition*, 60(2), 139–145.
- 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.
- Gerlach, C., Zhu, X., & Joseph, J. E. (2015). Structural similarity exerts opposing effects on perceptual differentiation and categorization: An fMRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 27(5), 974–987.
- Grill-Spector, K., & Weiner, K. S. (2014). The functional architecture of the ventral temporal cortex and its role in categorization. *Nature Reviews Neuroscience*, 15(8), 536–548.
- Guo, W., Geng, S., Cao, M., & Feng, J. (2022). Functional gradient of the fusiform cortex for Chinese character recognition. *eNeuro*, 9(3), 0495.
- Hecht, D., & Reiner, M. (2009). Sensory dominance in combinations of audio, visual and haptic stimuli. *Experimental Brain Research*, 193(2), 307–314.
- Hickok, G. (2009). Eight problems for the mirror neuron theory of action understanding in monkeys and humans. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21(7), 1229–1243.
- Hickok, G., & Poeppel, D. (2007). The cortical organization of speech processing. *Nature Reviews Neuroscience*, 8(5), 393–402.
- Hirst, R. J., Kicks, E. C., Allen, H. A., & Cragg, L. (2019). Cross-modal interference-control is reduced in childhood but maintained in aging: A cohort study of stimulus- and response-interference in cross-modal and unimodal Stroop tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 45(5), 553–572.
- Huang, S., Li, Y., Zhang, W., Zhang, B., Liu, X., Mo, L., & Chen, Q. (2015). Multisensory competition is modulated by sensory pathway interactions with fronto-sensorimotor and default-mode network regions. *Journal of Neuroscience*, 35(24), 9064–9077.
- Joseph, J. E., & Gathers, A. D. (2003). Effects of structural similarity on neural substrates for object recognition. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 3(1), 1–16.
- Kho, S. K., Keeble, D. R. T., Wong, H. K., & Estudillo, A. J. (2023). Investigating the role of the fusiform face area and occipital face area using multifocal transcranial direct current stimulation. *Neuropsychologia*, 189, 108663.
- Kornblum, S., Hasbroucq, T., & Osman, A. (1990). Dimensional overlap: Cognitive basis for stimulus-response compatibility-A model and taxonomy. *Psychological Review*, 97(2), 253–270.
- Krause, B., & Cohen Kadosh, R. (2014). Not all brains are created equal: The relevance of individual differences in responsiveness to transcranial electrical stimulation. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 8, 25.
- Krause, B., Márquez-Ruiz, J., & Cohen Kadosh, R. (2013). The effect of transcranial direct current stimulation: A role for cortical excitation/inhibition balance? *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 602.
- Li, Z., Gu, R., Qi, M., Cen, J., Zhang, S., Gu, J., Zeng, X., & Chen, Q. (2019). Loss of vision dominance at the prereponse level in tinnitus patients: Preliminary behavioral evidence. *Frontiers in Neuroscience*, 13, 482.
- Liu, C. L., Lai, M. H., Tien, K. W., Chuang, Y. H., Wu, S. H., & Lee, C. Y. (2011). Visually and phonologically similar characters in incorrect Chinese words: Analysis, identification, and applications. *ACM Transactions on Asian Language Information Processing*, 10, 1–39.

- Little, D. R., Nosofsky, R., & Denton, S. E. (2011). Response-time tests of logical-rule models of categorization. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 37(1), 1–27.
- Little, J. L., & McDaniel, M. A. (2015). Individual differences in category learning: Memorization versus rule abstraction. *Memory and Cognition*, 43, 283–297.
- Marmurek, H. H., Proctor, C., & Javor, A. (2006). Stroop-like serial position effects in color naming of words and nonwords. *Experimental Psychology*, 53(2), 105–110.
- Martin, A. (2007). The representation of object concepts in the brain. *Annual Review of Psychology*, 58, 25–45.
- Mate, J., & Baqués, J. (2009). Visual similarity at encoding and retrieval in an item recognition task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 62(7), 1277–1284.
- Mayer, A. R., Ryman, S. G., Hanlon, F. M., Dodd, A. B., & Ling, J. M. (2016). Look hear! The prefrontal cortex is stratified by modality of sensory input during multisensory cognitive control. *Cerebral Cortex*, 27(5), 2831–2840.
- Misselhorn, J., Frieze, U., & Engel, A. K. (2019). Frontal and parietal alpha oscillations reflect attentional modulation of cross-modal matching. *Scientific Reports*, 9(1), 5030.
- Molholm, S., Ritter, W., Javitt, D. C., & Foxe, J. J. (2004). Multisensory visual-auditory object recognition in humans: A high-density electrical mapping study. *Cerebral Cortex*, 14(4), 452–465.
- Montgomery J. W. (1995). Examination of phonological working memory in specifically language-impaired children. *Applied Psycholinguistics*, 16(4), 355–378.
- Mummery, C. J., Patterson, K., Hodges, J. R., & Price, C. J. (1998). Functional neuroanatomy of the semantic system: Divisible by what? *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10(6), 766–777.
- Napolitano, A. C., & Sloutsky, V. M. (2004). Is a picture worth a thousand words? The flexible nature of modality dominance in young children. *Child Development*, 75(6), 1850–1870.
- Nitsche, M. A., & Paulus, W. (2001). Sustained excitability elevations induced by transcranial DC motor cortex stimulation in humans. *Neurology*, 57(10), 1899–1901.
- Nikolin, S., Martin, D., Loo, C. K., & Boonstra, T. W. (2018). Effects of TDCS dosage on working memory in healthy participants. *Brain Stimulation*, 11(3), 518–527.
- Nosofsky, R. M., Palmeri, T. J., & McKinley, S. C. (1994). Rule-plus-exception model of classification learning. *Psychological Review*, 101(1), 53–79.
- Parkin, B. L., Ekhtiari, H., & Walsh, V. F. (2015). Non-invasive human brain stimulation in cognitive neuroscience: A primer. *Neuron*, 87(5), 932–945.
- Phillipou, A., Kirkovski, M., Castle, D. J., Gurvich, C., Abel, L. A., Miles, S., & Rossell, S. L. (2019). High-definition transcranial direct current stimulation in anorexia nervosa: A pilot study. *International Journal of Eating Disorders*, 52(11), 1274–1280.
- Poreisz, C., Boros, K., Antal, A., & Paulus, W. (2007). Safety aspects of transcranial direct current stimulation concerning healthy subjects and patients. *Brain Research Bulletin*, 72(4), 208–214.
- Qu, Q., Feng, C., & Damian, M. F. (2021). Interference effects of phonological similarity in word production arise from competitive incremental learning. *Cognition*, 212, 104738.
- Quinlan, P. T., & Cohen, D. J. (2012). Grouping and binding in visual short-term memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 38(5), 1432–1438.
- Ragert, P., Vandermeeren, Y., Camus, M., & Cohen, L. G. (2008). Improvement of spatial tactile acuity by transcranial direct current stimulation. *Clinical Neurophysiology*, 119(4), 805–811.
- Storkel, H. L., Bontempo, D. E., & Pak, N. S. (2014). Online learning from input versus offline memory evolution in adult word learning: Effects of neighborhood density and phonologically related practice. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 57(5), 1708–1721.
- Swick, D., Ashley, V., & Turken, A. U. (2008). Left inferior frontal gyrus is critical for response inhibition. *BMC Neuroscience*, 9, 1–11.
- Van Veen, V., & Carter, C. S. (2006). Conflict and cognitive control in the brain. *Current Directions in Psychological Science*, 15(5), 237–240.
- Vinckier, F., Dehaene, S., Jobert, A., Dubus, J. P., Sigman, M., & Cohen, L. (2007). Hierarchical coding of letter strings in the ventral stream: Dissecting the inner organization of the visual word-form system. *Neuron*, 55(1), 143–156.
- Weiss, M., & Lavidor, M. (2012). When less is more: Evidence for a facilitative cathodal tDCS effect in attentional abilities. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24(9), 1826–1833.
- Wu, D., Zhang, P., Liu, N., Sun, K., & Xiao, W. (2021). Effects of high-definition transcranial direct current stimulation over the left fusiform face area on face view discrimination depend on the individual baseline performance. *Frontiers in Neuroscience*, 15, 704880.
- Yeh, S. L., & Li, J. L. (2002). Role of structure and component in judgments of visual similarity of Chinese characters. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28(4), 933–947.
- Younger, J. W., Randazzo Wagner, M., & Booth, J. R. (2016). Weighing the cost and benefit of transcranial direct current stimulation on different reading subskills. *Frontiers in Neuroscience*, 10, 262.
- Yuval-Greenberg, S., & Deouell, L. Y. (2009). The dog's meow: Asymmetrical interaction in cross-modal object recognition. *Experimental Brain Research*, 193(4), 603–614.
- Zatorre, R. J., Chen, J. L., & Penhune, V. B. (2007). When the brain plays music: Auditory-motor interactions in music perception and production. *Nature Reviews Neuroscience*, 8(7), 547–558.
- Zeithamova, D., Maddox, W. T., & Schnyer, D. M. (2008). Dissociable prototype learning systems: Evidence from brain imaging and behavior. *The Journal of Neuroscience*, 28(49), 13194–13201.
- Zhang, H., & Kornblum, S. (1998). The effects of stimulus-response mapping and irrelevant stimulus-response and stimulus-stimulus overlap in four-choice Stroop tasks with single-carrier stimuli. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24(1), 3–19.
- Zhang J. L. (2005). The distinctive features for standard Chinese. *Acta Acustica*, 30(6), 506–514.
- [张家驊. (2005). 汉语普通话区别特征系统. *声学学报*, 30(6), 506–514.]
- Zhou, H., Wang A. J., Yuan, X. Y., & Jiang, Y. (2025). Object category differences regulate the sensory dominance of the response level in an audiovisual cross-modal conflict. *Acta Psychologica Sinica*, 57(6), 1001–1012.
- [周衡, 王爱君, 袁祥勇, 蒋毅. (2025). 客体类别差异调节视听跨通道冲突中反应水平的感觉主导效应. *心理学报*, 57(6), 1001–1002.]
- Zhou, H., Yuan, X., Xie, P., Wang, A., & Jiang, Y. (2025). Distinct processing stages of cross-modal conflict in schizophrenia: The role of auditory cortex underactivation. *Schizophrenia Research*, 281, 191–200.

Stimulus similarity modulates sensory dominance effects in cross-modal conflicts

WANG Aijun^{1,2}, HUANG Jie^{1,2}, ZHAO Danna³, LI Xin³, ZHANG Ming^{4,5}

⁽¹⁾ Department of Psychology, Faculty of Education, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

⁽²⁾ Guangxi Key Laboratory of Cognitive Neuroscience and Mental Health, Guilin 541004, China)

⁽³⁾ Department of Psychology, Soochow University, Suzhou 215123, China)

⁽⁴⁾ Department of Psychology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

⁽⁵⁾ Faculty of Interdisciplinary Science and Engineering in Health Systems, Okayama University, Okayama 700-8530, Japan)

Abstract

The levels-of-processing framework posits that cross-modal conflicts demonstrate modality-specific dominance patterns, with visual superiority seen at pre-response stages and auditory dominance seen at response stages. However, prior studies have not systematically examined how representational modalities of stimuli during cognitive processing modulate these sensory dominance effects. Given that stimulus similarity influences processing efficiency and conflict magnitude, the present study aimed to examine how stimulus similarity influences sensory dominance effects at both the pre-response and response levels.

Experiment 1 ($N = 34$) adopted a 2-1 mapping paradigm to categorize audiovisual congruency conditions into congruent, pre-response incongruent, and response incongruent conditions to investigate how stimulus similarity influences sensory dominance effects at both the pre-response and response levels. Experiment 2 utilized transcranial electrical stimulation to neuromodulate the left fusiform gyrus (Experiment 2a: $N = 26$) and left inferior parietal lobule (Experiment 2b: $N = 24$), causally verifying how stimulus similarity regulates sensory dominance in cross-modal conflicts. In addition to reaction times, the congruency effect index was used to measure the processing level of cross-modal conflicts, and the sensory dominance effect index was used to quantify differences in conflict across different cognitive processing stages.

Experiment 1 revealed that visual dominance emerged during pre-response cross-modal conflicts, whereas auditory dominance manifested at the response level. In addition, visual similarity significantly reduced both visual dominance at the pre-response level and auditory dominance at the response level, whereas auditory similarity markedly enhanced visual dominance at the pre-response level. More importantly, Experiment 2 revealed that the effect of visual similarity on the sensory dominance effect in the pre-response stage was related to the left fusiform gyrus. Electrical stimulation of the left fusiform gyrus decreased the visual dominance effect at the pre-response level. The effect of increased auditory similarity at the pre-response level was related to the left inferior parietal lobule, and the visual dominance effect at the pre-response level was increased by anodal electrical stimulation of the left inferior parietal lobule.

These findings reveal that stimulus similarity modulates sensory dominance in cross-modal conflicts, with visual and auditory similarity differentially regulating sensory dominance effects at the prereponse level. This study provides novel insights into cross-modal conflict mechanisms across different cognitive processing stages and enhances the understanding of the sensory dominance effect in cross-modal conflicts.

Keywords cross-modal conflict, sensory dominance effect, cognitive control, stimulus similarity