

认知控制与显著性加工在类别注意 选择中的分工与协同机制 ——来自 fMRI 的证据*

吴 瑕^{1,2,3} 李依薇¹ 孙晓雅¹ 陈 瀛⁴ 姜云鹏^{1,2,3} 陈 岩^{5,1}

¹天津师范大学心理学部; ²教育部人文社会科学重点研究基地天津师范大学心理与行为研究院;

³学生心理发展与学习天津市高校社会科学实验室, 天津 300387) (⁴天津职业技术师范大学

职业教育学院, 天津 300222) (⁵贵州师范大学心理学院, 贵阳 550000)

摘 要 类别注意选择(CAS)是大脑通过抽象类别表征优化信息筛选的核心过程,但其受认知控制和显著性加工的协同机制尚不明确。本研究结合多数函数任务(MFT, 通过符号类别比例操纵认知负载: 低负载 3:0, 高负载 2:1)与 Oddball 范式(通过刺激概率操纵显著水平: 标准刺激 80%, 新异刺激 20%), 并区分目标相关性(任务相关改变类别概率; 任务无关改变颜色概率), 系统地考察了认知控制与显著性加工对 CAS 的行为与神经调控机制。行为结果显示: 高认知负载显著降低 CAS 效率, 新异刺激的干扰效应仅在任务相关时显著。三者的交互作用表明, 仅任务相关时, 高负载下新异刺激的干扰效应显著大于低负载; fMRI 结果显示, 高认知负载激活背侧注意网络(DLPFC、SPL), 新异刺激则激活了腹侧注意网络(rTPJ、AIC); 联合激活分析显示, 两者在认知控制网络(SPL、ACC、AIC)存在共同激活; 多体素模式分析(MVPA)发现, 右侧顶枕结合区(rPOJ)和额眼区(FEF)对认知负载与显著性加工的解码精度达 86.83%, 表明其可以协同双通路信息以动态分配资源。总的来说, 认知控制与显著性加工分别通过背侧与腹侧网络消耗资源; 当两者并存时, 认知控制网络通过冲突解析与资源再分配决定 CAS 效率。本研究在类别层面揭示了认知控制与显著性加工的分工与协同机制, 提出动态路径模型, 为完善注意双通路模型提供了新的神经实证支撑。

关键词 认知控制, 显著性加工, 类别注意, 认知控制网络, 右侧顶枕结合区

分类号 B842

1 引言

注意选择是信息加工系统在复杂的环境中挑选有限信息予以深入加工的基本机制, 被视为认知活动的闸门(Desimone & Duncan, 1995)。在外部世界中, 物体特征多样性和环境动态性让人们往往根据客体的集合——类别(category)来组织知觉经验(Rosch et al., 1976)。类别的抽象性能够将离散特征整合为统一表征, 显著降低信息冗余并提升加工效

率(Macé et al., 2009; Reeder & Peelen, 2013)。类别注意选择(category-based attentional selection, CAS)将注意选择的对象指向类别表征, 对符合目标类别的刺激进行优先选择(Peelen & Kastner, 2014; Wyble et al., 2013; Wu, Liu et al., 2016; Wu & Fu, 2017; Yang & Zelinsky, 2009)。与特征水平的注意选择相比, CAS 表现出更长的加工时间窗口和更强的客体选择性皮层参与(Ferrera et al., 2009; Freedman et al., 2003), 这使其成为探究高级认知

收稿日期: 2025-02-22

* 全国教育科学规划项目(资助编号: DBA230368)。

通信作者: 陈岩, E-mail: yanchen10222022@163.com

与感知觉动态交互的重要过程。然而,以往研究多聚焦于 CAS 本身的神经机制(激活脑区与时间进程),CAS 过程中注意系统如何动态地调节认知资源尚不清楚,仍缺乏在复杂环境中应用 CAS 的理论依据。

一方面,认知控制能够影响对 CAS 的资源分配。认知控制(cognitive control)是指个体在资源受限的情境下,根据当前目标对信息加工流程进行监控、抑制与调度的能力,被视为高阶注意系统的核心功能(Fan, 2014; Lavie, 2005; Wu, Chen et al., 2020)。多数函数任务(majority function task, MFT)通过操纵待处理信息的熵来改变认知负载。任务要求被试判断一组箭头中多数箭头的朝向,当多数与少数的比例由 3:0 降低至 2:1 时,信息冲突显著增加,被试必须调用更多认知控制资源以协调感知编码与决策运算(Wu, Dufford et al., 2016)。当认知负载升高时,右侧颞顶联合区(rTPJ)与背侧注意网络(DAN)的功能连接显著增强,促使目标导向的顶层信号与刺激驱动的显著性信号在 rTPJ 实时协同,进而对颜色和位置等特征的注意优先级提高(Wu et al., 2015)。然而,针对于类别信息,认知负载的变化将如何调节 CAS 的选择效率及其神经机制尚不清楚。

另一方面,显著性加工也可能会影响对 CAS 的资源分配。显著性(saliency)是指刺激在物理或统计特征上的凸显程度,能够迅速引导注意(Itti & Koch, 2001)。按照其是否符合当前任务目标的选择规则,可区分为任务相关显著性与任务无关显著性(Kim, 2014):前者则指新异刺激与目标决策所依赖的特征或类别重叠,可被编码为有效信息,并伴随额顶网络(包括外侧前额叶 LPFC 与顶内沟 IPS)的协同活动(Brass & von Cramon, 2004; Lerebourg et al., 2024)。后者是指新异刺激虽在概率或物理属性上十分突出,但不满足当前目标条件,仅构成外部干扰(Theeuwes, 2010)。这种干扰效应与 rTPJ 的激活增强相关(Corbetta et al., 2002; Kucyi et al., 2012)。任务相关显著性可能节省认知控制资源并加速类别筛选(Thayer et al., 2022),而任务无关显著性缺乏对无关特征的主动抑制,从而产生资源竞争(Oxner et al., 2023)。在实验范式上,Oddball 范式使低概率呈现的新异刺激在统计上突显,从而引发注意捕获(Näätänen et al., 2011)。脑电中的失匹配负波 MMN 和随后的 P3 成分可直接反映这种显著性

加工效率(Bekinschtein et al., 2009; Garrido et al., 2009)。然而,以往的研究多关注颜色、位置等低水平特征(Chapman & Störmer, 2022; Oxner et al., 2023),显著性加工对高水平类别信息的资源分配是否产生影响仍缺乏直接证据,两类显著性加工在 CAS 场景中的差异仍不清楚。

认知控制与显著性加工都会影响认知资源分配,两者在机制上存在分工,同时在特定条件下表现出协同。一方面,两者在神经机制上表现出区分性,涉及不同的大脑网络:认知控制主要涉及到了背外侧前额叶(DLPFC)、额眼区(FEF)和顶上回(SPL)等认知控制网络(CCN)核心脑区(De Fockert et al., 2004; Li et al., 2010; Noudoost & Moore, 2011; Wang, Yu et al., 2020; Wu et al., 2015);显著性加工则主要涉及腹侧注意网络(VAN, 如 rTPJ、前脑岛 AIC)和显著网络(SN, 如 IPS、颞上沟 STS),以期快速地探测外部的突显信号(Arcizet et al., 2011; Corbetta et al., 2002; Theeuwes, 2010)。两种加工过程的分工在冲突任务中尤为明显:当显著分心物与任务目标冲突时,前额叶需通过增强对顶叶的控制以抑制干扰(Broschard et al., 2024),而顶叶则优先编码显著性信号(Kroner et al., 2023)。在 CAS 中,由于类别目标的抽象性需要更多认知资源投入,在较高负载条件下,需要更强的认知控制以持续强化目标模板,从而更好地抵御无关显著性干扰(Yang & Zelinsky, 2009);而显著性加工则可能通过腹侧视觉通路快速捕获类别内突显特征,从而与背侧通路的空间定向形成竞争(Chen et al., 2012),使分工特征进一步凸显。另一方面,在复杂视觉任务中认知控制和显著性加工也会呈现协同。例如,TPJ 作为多模态信息协同枢纽,在协调任务目标与显著性刺激中起核心作用(Corbetta et al., 2008; Kucyi et al., 2012; Wu et al., 2015),提示认知控制和显著性加工可能在特定大脑区域实现信息协同,从而实现动态注意资源分配。基于此,本文将关注两者协同的边界与模式,即哪些情境下会表现出更强的协同。此外,这些边界条件与协同模式仍需在 CAS 框架下进一步检验。

为了考察认知控制与显著性加工对 CAS 的调控作用及神经机制,研究采用功能性磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)技术,结合 MFT 和 Oddball 范式,实现了认知负载与显著性类型(任务相关/无关)的同步操纵。通过改变认知

负载(3:0 低负载 vs. 2:1 高负载)来操纵认知控制水平¹, 通过改变刺激的显著水平(80%标准刺激 vs. 20%新异刺激)来操纵显著性加工, 通过是否符合当前任务目标的选择规则(任务相关的类别、任务无关的颜色)来操纵显著性的任务相关性。记录了被试的行为反应和大脑激活情况, 结合全脑激活分析与多体素模式分析(multivariate pattern analysis, MVPA), 能够多角度考察两者神经机制上的分工与协同, 为动态资源分配提供了较为系统的支撑。实验假设: (1)行为方面, 高认知负载降低 CAS 效率(正确率下降、反应时延长); 新异刺激干扰 CAS, 任务相关时干扰小于无关; 三者交互表现为任务相关时高负载下新异刺激干扰更显著。(2)脑成像方面, 认知控制激活 DAN (如 DLPFC、SPL), 显著性加工激活 VAN (如 rTPJ); CCN 能够参与两类加工的协同作用, 其多体素模式可用于区分两类加工且解码精度高。

2 方法

2.1 被试

根据 MorePower 6.0 (Campbell & Thompson, 2012)计算, 设置统计检验力为 0.80, α 水平为 0.05, 效应量为中等水平($\eta_p^2 = 0.3$), $2 \times 2 \times 2$ 被试内设计, 计算被试样本量为 26 人。招募天津师范大学在校大学生 29 名(年龄范围为 18~27 岁; 平均年龄 20.83 \pm 2.60 岁; 24 名女生、5 名男生)。所有被试均为右利手, 视力或矫正视力正常, 无色盲或色弱。该实验经过天津师范大学伦理委员会审核(批准号 2022030702), 被试在实验前签署了知情同意书, 并在实验完成后获得相应的报酬。

2.2 刺激和程序

实验刺激呈现在 17 英寸的 CRT 显示器上, 屏幕分辨率为 1024 \times 768 像素, 刷新率为 60 Hz, 背景为灰色(CIE x/y coordinates, 0.313/0.329)。被试在屏蔽室的房间注视屏幕, 距离屏幕约 57 cm。实验程序采用 E-Prime 3.0 软件编制。

本实验为 2 (认知负载: 高负载, 低负载) \times 2 (显著水平: 新异刺激, 标准刺激) \times 2 (显著相关性:

任务相关, 任务无关)被试内实验设计。实验任务结合了 MFT 和 Oddball 范式(图 1)。首先在屏幕中央随机呈现 100~600 ms 的“+”注视点。然后呈现 400 ms 的搜索屏, 包含三个与中央注视点等距(距中心 0.86°)的符号(0.31° \times 0.31°)。符号可能是数字(2~9)或字母(A、B、C、D、E、F、G、H)。符号出现的位置是围绕在中央注视点的 12 个可能的位置之一, 每次呈现的三个符号彼此等距(如 1、5、9), 以避免符号分布不均匀。被试的任务是对呈现的三个符号中的大多数的类别(字母或数字)进行判断并按键反应, 如果大多数符号为数字, 则用右手食指按 1; 大多数符号为字母, 则用右手中指按 2。反应键在被试间进行平衡。在 900~1400 ms 的反应窗口和 100 ms 的空屏后, 开始下一次试次。

认知负载通过改变符号类别的比例来操纵: 低认知负载条件中, 三个符号属于同一类别(3:0), 即全是数字或全是字母; 高认知负载条件中, 三个符号中两个属于同一类别, 剩下的一个属于另一类别(2:1), 如两个数字一个字母, 或两个字母一个数字。刺激的显著水平通过刺激出现的频率来操纵: 标准刺激为大部分的刺激, 占比 80%; 新异刺激为较少出现的突显刺激, 占比 20%。显著相关性通过是否符合当前任务目标的选择规则来操纵: 任务无关显著性通过改变刺激颜色的比例来实现, 即红色(CIE x/y, 0.640/0.330)和绿色(CIE x/y, 0.300/0.600)。一种颜色作为标准刺激(80%), 另一种颜色作为新异刺激(20%), 颜色的显著水平在实验组块间和被试间进行平衡; 任务相关显著性通过改变多数符号的类别的比例来实现, 一种情况大部分的多数符号为数字(80%), 少部分为字母(20%), 另一种情况则相反, 多数符号的类别比例在实验组块间和被试间进行平衡。

本实验包含 4 个组块, 每个组块包含 200 个试次(160 个标准刺激试次和 40 个新异刺激试次)。被试在正式实验前进行充分练习。每完成 1 个组块休息 2 分钟, 完成整个实验约需 35 分钟。

2.3 fMRI 数据采集和预处理

脑成像数据在 Siemens Prisma 3.0T 扫描仪上使用 64 通道标准头线圈进行。使用平面回波(Echo planar image, EPI)成像序列进行 BOLD 信号采集, 分辨率为 3.8 mm \times 3.8 mm \times 4.0 mm。射频脉冲重复时间(time of repetition, TR): 2 s, 回波时间(time of echo, TE): 27 ms, 回波间隔(Echo spacing): 0.4 ms, 区域大小: 240 mm \times 240 mm, 翻转角: 77°,

¹ 以往研究通常采用 flanker 任务、西蒙任务或 stroop 范式研究认知控制, 但这些任务中冲突信息与目标加工无关(如 flanker 任务中两侧箭头为干扰), 易受自下而上的刺激-反应一致效应混淆。而 MFT 任务中, 所有呈现的刺激都是潜在目标, 没有固定的干扰刺激, 排除了自下而上的混淆因素(Fan et al., 2008; Wang et al., 2011)。

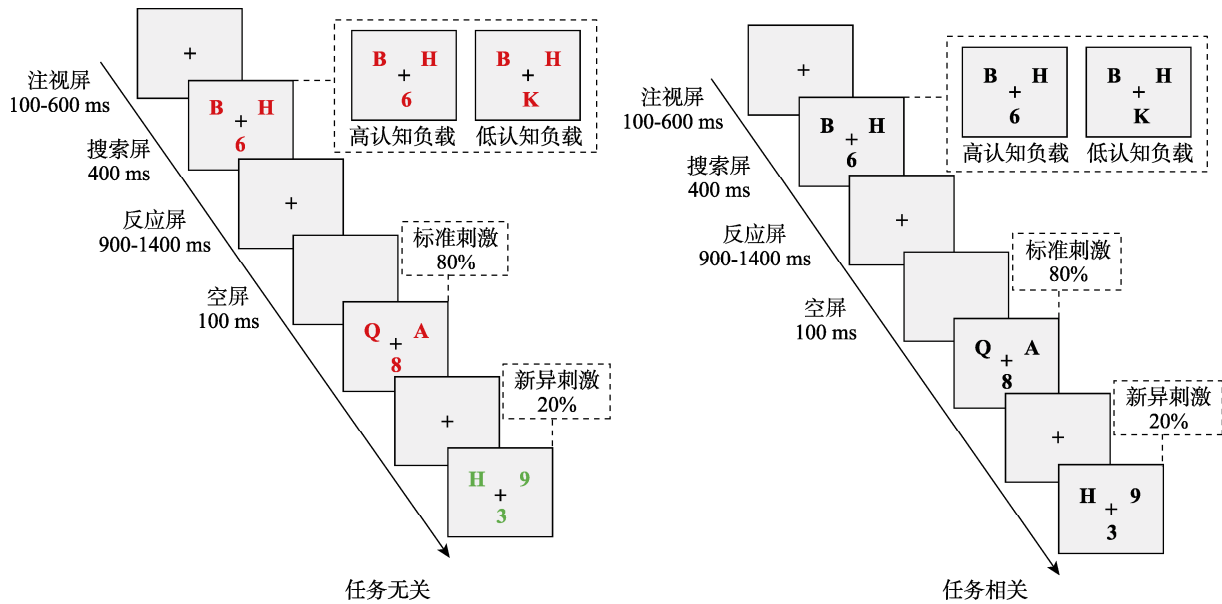


图 1 实验设计示意图

注：认知负载(低负载 vs 高负载)是通过改变三个符号所属的大多数类别来操纵的(3:0 vs 2:1)。刺激显著水平(标准刺激 vs 新异刺激)是通过改变刺激出现的频率来操纵的(标准刺激 80%，新异刺激 20%)。显著相关性(相关、无关)是通过符合当前任务目标的选择规则来操纵：任务相关条件下，显著性通过改变任务相关的多数符号类别的比例来实现；任务无关条件下，显著性通过改变任务无关的刺激颜色比例来实现。彩图见电子版，下同。

层厚：4.0 mm，层间距：0，层数：40，EPI 因子：64，带宽：3126 Hz/Px。功能像扫描结束后要求参与者完成 5 分钟的结构像扫描，分辨率为 $0.9 \text{ mm} \times 0.9 \text{ mm} \times 0.9 \text{ mm}$ 。

预处理操作主要包括：时间层校正、方向标准化、配准、分割、头动校正、空间配准、平滑等。血氧依赖水平功能图像首先进行层间时间校正，将每个层内体素的时间序列中间的采集时间对齐，然后将功能图像与第一次成像对准以完成扫描间的头动校正。所有图像均使用双线性插值的方法在一个 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的 Talairach 空间(Talairach et al., 1988)中的 MNI (Montreal Neurological Institute)模板内进行标准化。功能像由半高宽(Full-width at half maximum, FWHM)为 6 mm 的高斯滤波器(Gaussian Filter)进行空间平滑。

2.4 fMRI 数据统计分析

脑成像数据分析采用基于 MATLAB 的 fMRI 数据处理软件 SPM12 对任务态下功能磁共振成像数据进行集成式的预处理和数据分析。在参与者个体水平上，BOLD 激活的一阶统计脑图通过一般线性模型(General Linear Model, GLM)计算得到，所定义的 8 个回归因子分别对应 8 种实验处理下的正确反应：2 (认知负载：高负载，低负载) \times 2 (显著水平：新异刺激，标准刺激) \times 2 (显著相关性：任务相关，任务无关)。这些回归因子与标准血氧动力反

应函数(hemodynamic response function, HRF)进行卷积。此外，模型中也包含头动校正步骤所产生的 6 个头动参数，同样作为无关控制变量加入模型中。每个体素的时间序列经过高通滤波(1/128 Hz)来移除低频噪音和信号偏移。通过设置各个试次条件间的线性对比值(contrast value)，在完成 GLM 参数估计(parameter estimates)后，得到认知负载(高、低)、显著水平(新异、标准)、显著相关性(无关、相关)的主效应和三者的交互作用和每个被试的对比激活图。这些对比激活图将进入二阶分析，并构建 GLM。使用 AlphaSim 程序(<http://afni.nimh.nih.gov/pub/dist/doc/manual/AlphaSim.pdf>)进行蒙特卡罗模拟以确定合适的聚类阈值。假设单个体素 I 型错误为 $p < 0.005$ ，46 个连续体素的聚类范围是在 $p < 0.05$ 校正多个体素比较时所必需的。

建立多体素模式分析(MVPA)的模型依托于 Python 3.11 环境使用及 Nilearn、Numpy、Sklearn 等多个第三方包完成编程。根据前期 GLM 二阶分析的结果选取在认知负载条件和显著水平两个条件中激活程度较高的脑区组成该条件的特征体素。在参与者个体水平上，数据结构由三部分组成：fMRI 扫描数据、条件、组别，通过对于参与者完成任务所采集的脑激活数据对参与者正在参与何种条件下的任务进行解码。其中 fMRI 扫描数据通过 SPM12 中的 ImCalc 函数对图像进行如下处理：生

成认知负载条件的图像, 每个组块下的每一张高负载-标准刺激条件图像分别减去每一张低负载-标准刺激条件图像, 以及每个组块下的每一张高负载-新异刺激条件图像分别减去每一张低负载-新异刺激条件图像; 生成显著水平条件的图像, 每个组块下的每一张高负载-新异刺激条件图像分别减去每一张高负载-标准刺激条件图像, 以及每个组块下的每一张低负载-新异刺激条件图像分别减去每一张低负载-标准刺激条件图像; 保留图像的条件、组别放入模型。本研究采用留一法, 每次随机抽取其中三个组作为训练集(75%), 剩余一个组作为测试集(25%)。随后, 利用测试集测试模型, 得到测试精度。之后, 计算每个体素在模型中的权重, 输出单个参与者在该条件下不同体素的解码精确度, 生成用于进一步分析的图像。最后, 输出图像由半高宽(FWHM)为 6 mm 的高斯滤波器(Gaussian Filter)进行空间平滑, 导入组水平 GLM 模型中, 进一步对不同体素的解码精确度进行差异检验。

3 结果

3.1 行为结果

对正确率(ACC)、正确反应的反应时(RT)和 IES (inverse efficiency scores, $IES = RT/ACC$, 表示被试的整体表现)进行 2 (认知负载: 高负载, 低负载) \times 2 (显著水平: 新异刺激, 标准刺激) \times 2 (显著相关性: 任务相关, 任务无关)重复测量方差分析。

3.1.1 正确率

认知负载的主效应显著, $F(1, 28) = 209.34, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.88$; 低负载的正确率高于高负载。显著水平的主效应显著, $F(1, 28) = 22.06, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.44$ 。标准刺激的正确率高于新异刺激。

认知负载 \times 显著水平交互作用显著, $F(1, 28) = 24.98, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.47$ 。简单效应分析发现, 无论是低负载 [$F(1, 28) = 4.35, p = 0.046, \eta_p^2 = 0.13$] 还是高负载 [$F(1, 28) = 38.33, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.58$], 标准刺激的正确率均显著高于新异刺激。进一步对不同认知负载条件下的显著效应 ($ACC_{标准刺激} - ACC_{新异刺激}$) 进行配对样本 t 检验。结果显示, 相比于低负载, 高负载时的显著效应更大, $t(28) = 5.00, p < 0.001, Cohen's d = 0.93, 95\% CI [0.49, 1.36]$ 。此外, 无论是标准刺激 [$F(1, 28) = 193.28, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.87$], 还是新异刺激 [$F(1, 28) = 148.29, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.84$], 低负载的正确率均显著高于高负载。进一

步对不同显著水平的负载效应 ($ACC_{低负载} - ACC_{高负载}$) 进行配对样本 t 检验。结果显示, 相比于标准刺激, 新异刺激的负载效应更大, $t(28) = 5.00, p < 0.001, Cohen's d = 0.93, 95\% CI [0.49, 1.36]$ 。显著水平 \times 显著相关性交互作用显著, $F(1, 28) = 24.01, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.46$ 。简单效应分析发现, 任务相关时, 标准刺激的正确率显著高于新异刺激, $F(1, 28) = 28.06, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.50$; 而任务无关时, 标准刺激的正确率与新异刺激的正确率无显著差异, $F(1, 28) = 0.14, p = 0.710$ 。

认知负载 \times 显著水平 \times 显著相关性交互作用显著, $F(1, 28) = 12.22, p = 0.002, \eta_p^2 = 0.30$ 。为进一步明确三因素交互的模式, 分别在任务相关和任务无关条件下进行了认知负载 \times 显著水平两因素方差分析。结果显示, 任务相关时, 认知负载 \times 显著水平交互作用显著, $F(1, 28) = 37.03, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.57$ 。无论是低负载 [$F(1, 28) = 6.34, p = 0.018, \eta_p^2 = 0.19$] 还是高负载 [$F(1, 28) = 51.49, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.65$], 标准刺激的正确率均显著高于新异刺激。相比于低负载, 高负载时的显著效应 ($ACC_{标准刺激} - ACC_{新异刺激}$) 更大, $t(28) = 6.09, p < 0.001, Cohen's d = 1.13, 95\% CI [0.66, 1.59]$ 。无论是标准刺激 [$F(1, 28) = 73.71, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.73$], 还是新异刺激 [$F(1, 28) = 72.50, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.72$], 低负载的正确率均显著高于高负载。相比于标准刺激, 新异刺激的负载效应 ($ACC_{低负载} - ACC_{高负载}$) 更大, $t(28) = 6.09, p < 0.001, Cohen's d = 1.13, 95\% CI [0.66, 1.59]$ 。然而, 任务无关时, 认知负载 \times 显著水平交互作用不显著, $F(1, 28) = 0.04, p = 0.844$ (见图 2)。

3.1.2 反应时

认知负载的主效应显著, $F(1, 28) = 404.96, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.94$; 低负载的反应时快于高负载。显著水平的主效应显著, $F(1, 28) = 72.53, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.72$; 标准刺激的反应时快于新异刺激。显著相关性的主效应显著, $F(1, 28) = 22.16, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.44$; 任务相关的反应时快于任务无关。

认知负载 \times 显著相关性交互作用显著, $F(1, 28) = 6.54, p = 0.016, \eta_p^2 = 0.19$ 。简单效应分析发现, 无论是任务相关 [$F(1, 28) = 298.04, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.91$], 还是任务无关 [$F(1, 28) = 390.17, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.93$], 低负载的反应时均显著快于高负载。相比于任务相关, 任务无关的负载效应 ($RT_{高负载} - RT_{低负载}$) 更大, $t(28) = 2.56, p = 0.016, Cohen's d = 0.48$,

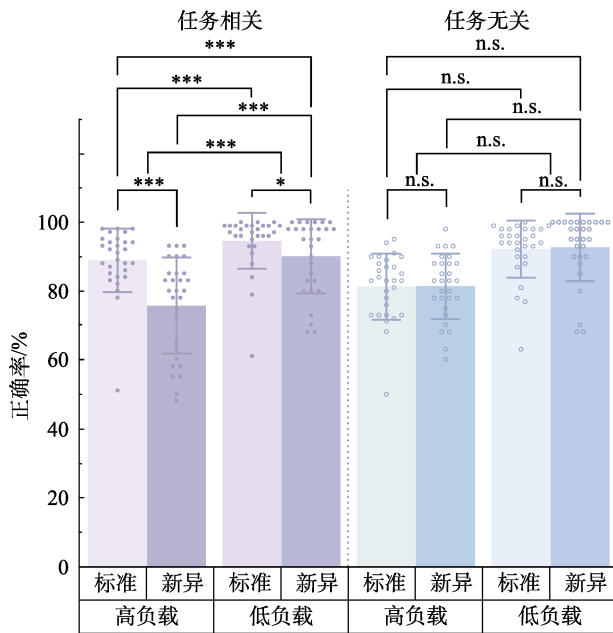


图 2 不同认知负载、显著水平与显著相关性条件的正确率(%)结果

注: ***表示 $p < 0.001$, *表示 $p < 0.05$, ns 代表 $p \geq 0.05$, 下同

95% CI [0.09, 0.86]。显著水平 \times 显著相关性交互作用显著, $F(1, 28) = 88.90, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.76$ 。简单效应分析发现, 任务相关时, 标准刺激的反应时显著快于新异刺激, $F(1, 28) = 100.78, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.78$; 而任务无关时, 标准刺激的反应时和新异刺激无显著差异, $F(1, 28) = 0.00, p = 0.959$ 。

认知负载 \times 显著水平 \times 显著相关性交互作用不显著, $F(1, 28) = 0.71, p = 0.405$ (见图 3)。

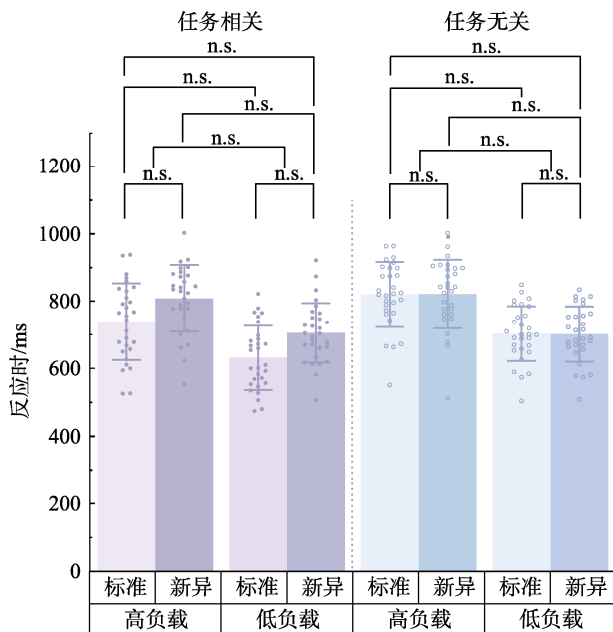


图 3 不同认知负载、显著水平与显著相关性条件的反应时(ms)结果

3.1.3 IES

采用 $IES = RT/ACC$ 来对速度-准确率权衡进行校正, 表示被试在各种处理条件下的整体表现(Townsend & Ashby, 1983)。IES 值越小, 整体的表现越好。

认知负载的主效应显著, $F(1, 28) = 250.56, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.90$; 低负载的表现好于高负载。显著水平的主效应显著, $F(1, 28) = 35.11, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.56$; 标准刺激的表现好于新异刺激。显著相关性的主效应显著, $F(1, 28) = 6.94, p = 0.014, \eta_p^2 = 0.20$; 任务相关的表现好于任务无关。

认知负载 \times 显著水平交互作用显著, $F(1, 28) = 21.72, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.44$; 简单效应分析发现, 无论是低负载 [$F(1, 28) = 20.75, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.43$], 还是高负载 [$F(1, 28) = 36.51, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.57$], 标准刺激的表现均好于新异刺激。相比于低负载, 高负载的显著效应($IES_{\text{新异刺激}} - IES_{\text{标准刺激}}$)更大, $t(28) = 4.66, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 0.87, 95\% \text{ CI } [0.43, 1.28]$ 。此外, 无论是标准刺激 [$F(1, 28) = 353.98, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.93$], 还是新异刺激 [$F(1, 28) = 164.35, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.85$], 低负载的表现均显著好于高负载。相比于标准刺激, 新异刺激的负载效应($IES_{\text{高负载}} - IES_{\text{低负载}}$)更大, $t(28) = 4.66, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 0.87, 95\% \text{ CI } [0.43, 1.28]$ 。显著水平 \times 显著相关性交互作用显著, $F(1, 28) = 40.27, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.59$ 。简单效应分析发现, 任务相关时, 标准刺激的表现好于新异刺激, $F(1, 28) = 43.48, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.61$; 任务无关时, 标准刺激与新异刺激的表现无显著差异, $F(1, 28) = 0.00, p = 0.973$ 。

认知负载 \times 显著水平 \times 显著相关性交互作用显著, $F(1, 28) = 10.48, p = 0.003, \eta_p^2 = 0.27$; 为进一步明确三因素交互的模式, 分别在任务相关和任务无关条件下进行了认知负载 \times 显著水平两因素方差分析。结果显示, 任务相关时, 认知负载 \times 显著水平交互作用显著, $F(1, 28) = 19.07, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.41$ 。简单效应分析发现, 无论是低负载 [$F(1, 28) = 28.12, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.50$], 还是高负载 [$F(1, 28) = 39.90, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.59$], 标准刺激的表现均显著好于新异刺激。相比于低负载, 高负载时的显著效应($IES_{\text{新异刺激}} - IES_{\text{标准刺激}}$)更大, $t(28) = 4.37, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 0.81, 95\% \text{ CI } [0.39, 1.23]$ 。无论是标准刺激 [$F(1, 28) = 285.55, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.91$], 还是新异刺激 [$F(1, 28) = 73.54, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.72$], 低负载的表现均显著好于高负载。相比于标准刺激, 新异刺激的负载效应($IES_{\text{高负载}} - IES_{\text{低负载}}$)

更大, $t(28) = 4.37, p < 0.001$, Cohen's $d = 0.81$, 95% CI [0.39, 1.23]。然而, 任务无关时, 认知负载 \times 显著水平的交互作用不显著, $F(1, 28) = 0.00, p = 0.965$ (见图 4)。

3.2 fMRI 结果

3.2.1 脑激活结果

全脑对比分析显示(图 5 和表 1), 显著相关性没有显著的脑激活区域。提取任务相关的脑区, 发现认知负载主效应显著: 相较于低负载条件, 高负载条件激活了双侧顶上回、双侧脑岛、左侧额中回、双侧距状裂等脑区; 相较于高负载条件, 低负载条件激活了右侧楔叶、右侧舌回、右侧额上回、左侧角回、右侧顶下回、右侧额内侧上回、左侧颞中回、左侧海马旁皮层、左侧额下回等脑区。显著水平主效应显著: 相较于标准刺激, 新异刺激激活了左侧中央前回、右侧角回、双侧脑岛、双侧尾状核等显著激活。

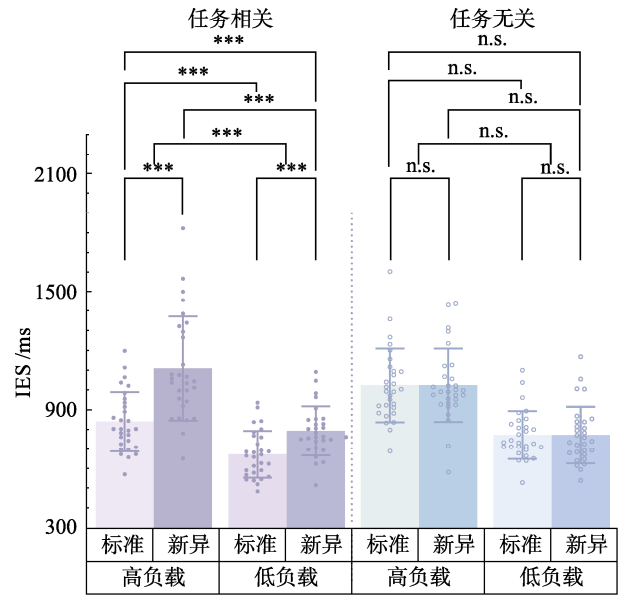


图 4 不同认知负载、显著水平与显著相关性条件的 IES (ms) 结果

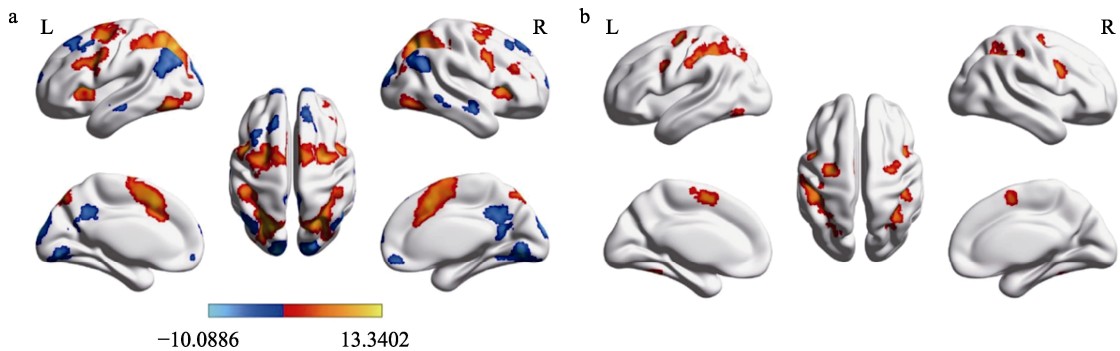


图 5 认知负载和显著水平的主效应。(a)与认知负载相关的脑区(高负载 > 低负载); (b)与显著水平相关的脑区(新异刺激 > 标准刺激)。红色表示激活量增加的体素。蓝色表示激活量减少的体素。

表 1 认知负载和显著水平的主效应脑激活区域(FDR, $p < 0.05, k \geq 46$)

对比条件	脑区	左/右	BA	峰值坐标(MNI)			k	t
				x	y	z		
高负载 > 低负载	顶上回	左	7	-24	-72	48	164980	13.34
	顶上回	右	7	24	-72	52	3935	11.77
	小脑脚 I	左		-34	-70	-28	1690	8.77
	脑岛	左	45	-32	22	10	1647	8.17
	脑岛	右	45	32	18	12	1004	10.15
	丘脑	右		16	-14	18	637	6.61
	额中回	左	10	-30	50	20	219	5.4
	距状裂	右	17	16	-70	10	84	4.22
	距状裂	左	17	-14	-74	10	67	3.81
高负载 < 低负载	楔叶	右	18	16	-94	12	4110	10.09
	额上回	右	8	22	44	48	2714	7.09
	舌回	右	18	10	-74	-2	1661	9.09
	角回	左	39	-44	-76	46	1569	8.3
	顶下回	右	39	58	-60	42	1563	7.03
	内侧额上回	右	10	14	64	12	1411	6.27

续表

对比条件	脑区	左/右	BA	峰值坐标(MNI)			k	t
				x	y	z		
新异刺激 > 标准刺激	颞中回	左	21	-60	-16	-12	492	5.78
	海马旁回	左	36	-28	-26	-18	208	4.65
	三角部额下回	左	45	-48	32	2	105	4.36
	小脑脚 II	右		20	-82	-38	100	4.87
	小脑脚 II	左		-42	-72	-36	89	4.01
	小脑 IX	左		-8	-50	-42	70	4.26
	中央前回	左	6	-32	-8	60	9549	8.9
	小脑 VI	左		-32	-50	-22	4251	8.21
	角回	右	39	36	-56	40	2419	7.85
新异刺激 > 标准刺激	脑岛	右	45	34	20	10	363	4.43
	丘脑	左		-12	-24	8	224	4.94
	脑岛	左	13	-28	22	8	197	4.51
	尾状核	右	48	12	6	12	178	4.67
	尾状核	左	48	-14	8	14	173	5.19
	小脑 VII B	左		-28	-76	-50	115	4.86

显著水平 × 显著相关性的交互作用主要表现在左侧中央前回、双侧中央前回、双侧脑岛、右侧顶上回等显著正激活(图 6 和表 2)。任务相关时,相

较于标准刺激,新异刺激显著激活了左侧中央前回、左侧岛盖部额下回、右侧顶下缘角回、左侧脑岛等;相较于新异刺激,标准刺激显著激活了左侧

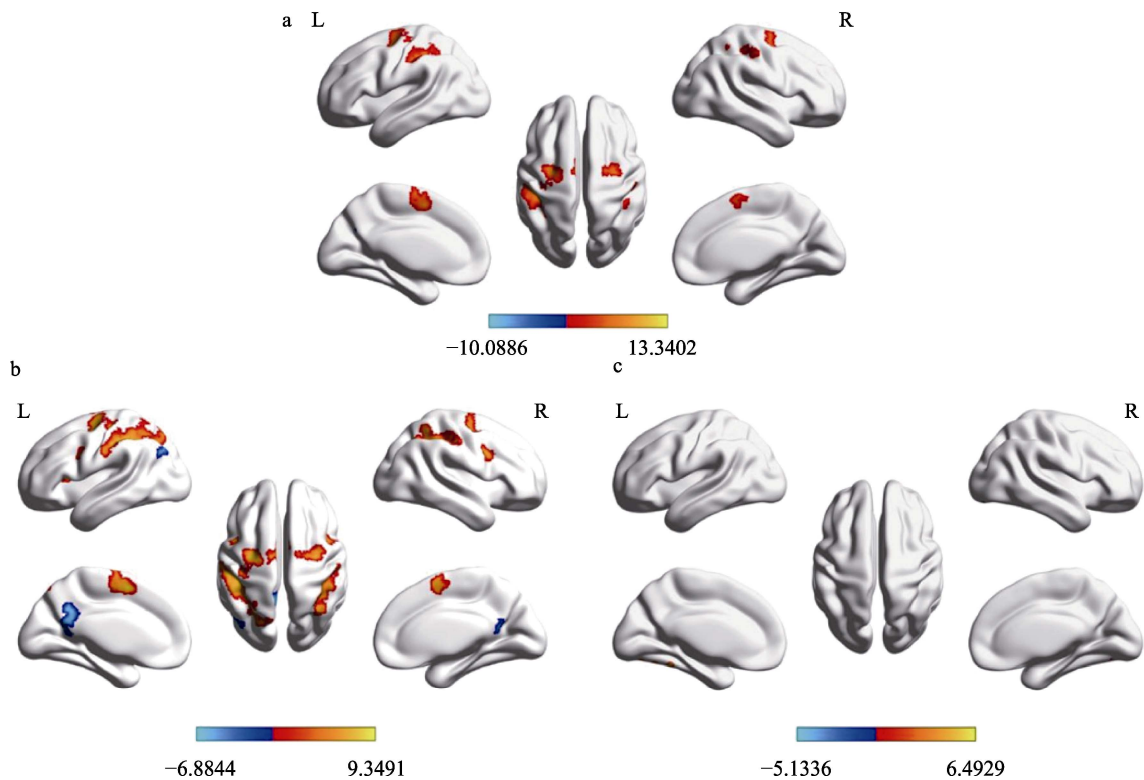


图 6 显著水平 × 显著相关性的交互作用。(a)交互作用相关的脑区, (新异刺激-标准刺激)_{任务相关} > (新异刺激-标准刺激)_{任务无关}。(b)简单效应分析, 任务相关时, 不同显著水平对比激活的脑区(新异刺激_{任务相关} > 标准刺激_{任务相关})。(c)简单效应分析, 任务无关时, 不同显著水平对比激活的脑区(新异刺激_{任务无关} > 标准刺激_{任务无关})。红色表示激活量增加的体素。蓝色表示激活量减少的体素。

表2 显著水平和显著相关性的交互作用及简单效应分析(无矫正, $p < 0.001, k \geq 46$)

对比条件	脑区	左/右	BA	峰值坐标(MNI)			k	t
				x	y	z		
显著水平 × 显著相关性	中央后回	左	1	-50	-34	54	6179	8.71
	顶上回	右	7	44	-46	58	1476	6.59
	小脑 VIII	右		20	-62	-52	415	7.92
	小脑 VI	右		30	-52	-30	396	7.96
	中央前回	右	6	58	10	30	242	5.63
	中央前回	左	6	-60	6	26	186	4.69
	脑岛	右	13	36	22	0	157	4.9
	小脑蚓体	右		4	-66	-10	130	5.51
	脑岛	左	45	-32	20	8	112	5.33
	小脑 VI	左		-24	-58	-24	97	4.75
	小脑蚓体	左		-2	-32	-2	68	4.67
	小脑 VIII	左		-26	-62	-54	55	6.28
	任务相关 新异刺激 > 标准刺激	中央前回	左	6	-28	-12	52	127300
小脑 VI		右		24	-58	-26	4829	8.88
顶下回		右	40	46	-40	54	3680	8.84
岛盖部额下回		左	6	-48	8	30	966	6.93
尾状核		右		14	8	12	675	5.52
脑岛		左	13	-30	22	8	340	6.02
丘脑		左		-12	-22	8	334	5.63
小脑 VII B		左		-26	-76	-50	333	5.64
豆状核		左		-22	2	8	178	5.03
新异刺激 < 标准刺激	后扣带回	左	23	-4	-50	32	1184	6.88
	前扣带与旁扣带回	左	10	-14	46	-4	389	5.43
	枕中回	左	39	-42	-76	34	311	5.94
	楔前叶	右	23	14	-54	20	310	5.38
	额上回	左	8	-18	34	46	284	5.49
	枕中回	右	19	48	-78	26	114	6.61
	梭状回	左	37	-30	-38	-16	109	5.59
	中央盖沟	左	40	-28	-40	24	84	6.26
	颞中回	左	21	-62	-6	-14	76	5.95
	眶部额下回	左	45	-54	30	-2	72	4.53
	小脑脚 II	右		24	-78	-38	59	4.95
任务无关 新异刺激 > 标准刺激	梭状回	左	37	-30	-44	-20	175	6.49
	舌回	右	19	32	-84	-18	49	5.32

后扣带回、右侧楔前叶、左侧前扣带和旁扣带脑回、左侧背外侧额上回、右侧枕中回、左侧中央盖沟、左侧颞中回、左侧眶部额下回等显著激活。然而, 任务无关时, 相较于标准刺激, 新异刺激仅显著激活了左侧梭状回和右侧舌回。除此之外, 认知负载 × 显著水平、认知负载 × 显著相关性和三者的交互作用均未发现显著的激活脑区。

3.2.2 认知控制和显著性加工的联合激活

为了探究认知控制和显著性加工的协同性, 对

任务负载和显著水平的两个主效应进行联合激活分析。如图7和表3所示, 左侧顶上回、左侧枕下回、右侧角回、右侧中央前回、双侧脑岛、右侧尾状核等共同参与了认知控制和显著性加工。

3.2.3 脑激活模式对认知控制和显著性加工的预测作用

为了探究认知控制和显著性加工协同的关键枢纽, 基于联合激活分析的结果, 采用分类器预测显著区分认知负载和显著水平条件的脑区。结果显

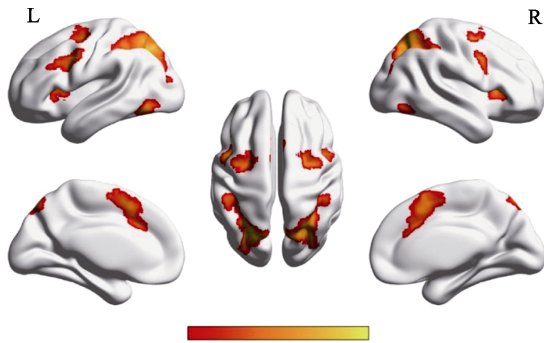


图 7 认知控制和显著性加工的共同激活脑区。红色表示激活量增加的体素。

表 3 认知控制和显著性加工的共同激活脑区 (FDR, $p < 0.05$, $k \geq 46$)

脑区	左/右	BA	峰值坐标(MNI)			k	t
			x	y	z		
顶上回	左	7	-28	-68	48	101210	17.47
小脑 VI	右		26	-66	-26	3181	9.60
角回	右	39	32	-60	46	2966	12.47
中央前回	右	6	34	-4	50	2058	10.52
枕下回	左	37	-46	-66	-12	1451	10.33
脑岛	左	13	-32	20	12	639	10.51
脑岛	右	13	32	20	8	522	7.60
丘脑	左		-10	-18	8	423	5.03
尾状核	右	48	16	-4	18	162	5.31
小脑 VIII	左		-24	-72	-50	159	9.17

示, 分类器在预测认知负载条件和显著水平条件时解码的平均准确率达到 86.83%, 显著地高于随机水平 50% [$t(28) = 73.57$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 27.81$]. 进一步对脑区的权重进行差异分析, 结果显示, 右侧顶枕结合区(rPOJ)和右侧中央前回/FEF 在分类器的预测作用上的贡献显著(图 8 和表 4)。

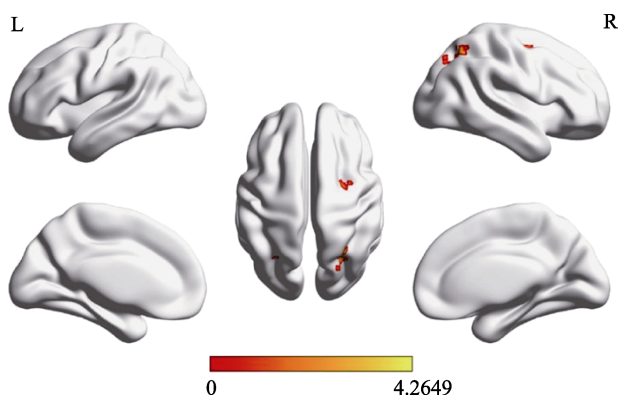


图 8 对认知控制和显著性加工进行区分的 MVPA 结果。红色表示在解码中贡献显著的脑区。

表 4 对认知控制和显著性加工进行区分的脑区 (无矫正, $p < 0.005$, $k \geq 46$)

脑区	左/右	BA	峰值坐标(MNI)			k	t
			x	y	z		
顶枕联合区	右	7	22	-64	42	183	3.94
中央前回/FEF	右	6	30	-6	46	87	3.51

4 讨论

本研究结合 MFT 与 Oddball 任务, 通过操纵认知负载、显著性水平及显著相关性, 系统地探究了认知控制与显著性加工在类别注意选择(CAS)中的分工与协同机制。行为结果显示, 高负载显著降低 CAS 效率(IES 升高); 任务相关新异刺激在低负载时表现为促进效应、高负载时转为干扰, 任务无关新异刺激干扰幅度随负载增加放大, 支持 CAS 依赖动态更新的类别优先图, 即资源充裕时目标增强主导, 而资源紧张时显著性权重则高于目标增强。脑成像结果揭示, 背侧注意网络(DAN, 包括 DLPFC、SPL)在高负载时激活, 而腹侧注意网络(VAN, 包括 rTPJ、AIC)则在新异刺激时激活, 两者分工明确; 但联合激活分析显示, SPL、ACC、AIC 等 CCN 核心脑区共同参与两类加工, 提示 CCN 通过全局资源调控协调认知控制与显著性。rPOJ 和 FEF 以约 87%精度解码两类加工, 表明其是认知控制与显著性加工的协同枢纽。这一发现不仅拓展了类别优先图向高阶顶枕区的延伸, 也验证了多资源竞争框架在语义层面的适用性, 为注意双通路模型注入动态视角。

行为结果揭示了认知负载与显著性加工对 CAS 的双重调制模式, 这一发现为理解注意资源分配的动态性提供了关键证据(Lavie, 2005)。具体而言, 高负载提高了信息处理成本(高负载的表现更差), 而任务无关的新异刺激仅在高负载下显著放大干扰; 与之形成对比的是, 任务相关的新异刺激在低负载下表现出轻微促进效应(与标准刺激的差异相对较小), 但在高负载时转为明显干扰(与标准刺激的差异相对较大)。这种模式支持了注意选择依赖于优先图(priority map) (Fecteau & Munoz, 2006; Itti & Koch, 2001; Mo et al., 2018), 即大脑的资源分配优先值会受到刺激驱动的显著性和目标驱动的相关性共同灵活地调节: 当认知资源充足(低负载)时, 目标模板(即类别语义的抽象表征)能够被充分维持, 系统可主动利用与目标相关的显著

性(如新异刺激)作为额外线索,通过优先图的正向调节提升筛选效率。此时,任务相关的新异刺激因与目标模板匹配,其显著性被认为是有益信号,从而产生促进效应。然而,高负载情境下,目标模板的维持能力被削弱,注意系统被迫依赖外部输入的刺激引导的加工(Geng & Mangun, 2011);此时,任何新异刺激(无论是否与目标相关)都会占用残余资源,尤其是与目标特征部分重叠的任务相关新异刺激,它们在优先图中被放大,导致其干扰效应从低负载的促进反转为高负载的显著抑制。相比之下,任务无关的新异刺激始终缺乏目标模板的约束,其干扰幅度主要取决于剩余资源:低负载时资源充裕,无关新异刺激的干扰较少;高负载时资源匮乏,无关新异刺激的干扰因资源竞争加剧而凸显。这一差异进一步验证了选择性放大机制(Lavie, 2005),即当注意资源有限时,认知系统并不会均等抑制所有显著性加工,而是优先牺牲与目标匹配的精细调控能力,从而在不同的相关性中(任务相关/无关)形成差异化的干扰模式。总的来说,认知负载通过调节目标模板的维持强度,动态改变了显著性加工的神经资源分配策略:低负载时,系统主动加工相关显著性以优化筛选;高负载时,则被动应对所有新异刺激的资源竞争。这一机制为 CAS 的动态资源分配提供了行为层面的直接证据,也为优先图理论在语义层面和动态资源框架上进行了拓展。

认知控制与显著性加工在 CAS 中的作用模式体现为功能分工与神经协同的辩证统一。两者的分工体现在神经通路的分离:认知控制主要依赖 DAN (包括 DLPFC、FEF、SPL),通过强化目标模板(如数字的语义范畴)抑制干扰(Broschard et al., 2024; Li et al., 2010),而显著性加工则通过 SN (包括 ACC 和 AIC)自动化捕获突显特征(如绿色字母的颜色对比)(Corbetta et al., 2002; Harsay et al., 2012; Kroner et al., 2023; Kumaran et al., 2009)。这种分离在冲突任务中尤为显著:例如,当高认知负载条件下出现与任务无关的显著分心物(如红色字母)时, DLPFC 激活增强以维持目标表征,而 TPJ 则优先响应显著性信号,导致行为反应效率下降(Bouvier et al., 2023; Geng & Mangun, 2011)。这种资源竞争现象表明,两类加工在资源分配上存在本质差异,即认知控制是目标导向的容量有限加工,而显著性加工则是刺激导向的自动化加工(Theeuwes, 2010)。

然而,另一方面,两者的协同性在 CAS 中通过动态功能耦合实现。fMRI 联合激活分析显示,左侧

顶上回、左侧枕下回、右侧中央前回、右侧 ACC、双侧 AIC、右侧尾状核等同时参与了两类加工,表明 CCN 通过全局资源调控协调目标与显著性,完成认知控制加工(Keller et al., 2022; Li et al., 2010; Noudoost & Moore, 2011; Wang, Yu et al. 2020; Wu et al., 2015)。例如,当任务相关显著性出现时, DLPFC 与 LOC 的功能连接增强,从而将显著性信号协同编码至目标模板中,提升搜索效率(Oxner et al., 2023)。这种协同机制在神经解码结果中得到进一步支持:rPOJ 和 FEF 的多体素激活模式可显著区分认知控制与显著性加工。rPOJ 位于枕顶交界的高阶视觉-空间联合皮层,参与注意选择,将视觉和运动信息联合,具有视觉-运动协调功能(Chen et al., 2012; Collignon et al., 2011; Zhang et al., 2024)。因此, rPOJ 可能作为冲突监测的关键脑区,通过实时评估任务需求与刺激突显性的冲突强度,动态调整背侧-腹侧通路的资源分配。另一方面, FEF 位于中央前回的前叶运动-注意枢纽,是将协同编码后的优先图转写为具体定向指令的关键脑区(Noudoost & Moore, 2011)。因此, FEF 可以作为优先图到动作指令的输出转换枢纽,通过向视觉皮层反馈选择性增益并同步调节眼-手定向网络,将认知控制生成的目标增益与显著性驱动的突显信号协同编码为可执行的定向与反应方案。总的来说,该结果与 Katsuki 和 Constantinidis (2014)的自适应控制模型一致,认为顶叶-额叶网络能够按照优先图动态调节目标导向增强和刺激显著性加工。本研究在此基础上进一步推测, CAS 的效率取决于 CCN 对复杂信息的加工和灵活分配能力,而 rPOJ 和 FEF 为协同加工的关键节点。总的来说,本研究开创性地在类别注意框架下揭示了认知控制和显著性加工的分工-协同平衡。与简单特征注意不同(Chapman & Störmer, 2022), CAS 中类别目标的抽象性要求更高级别的语义加工,这放大了 CCN 的调控需求。这表明,目标的快速识别不仅依赖明确的特征定义,还需动态协调任务目标与环境突显性的冲突。

基于认知控制与显著性加工在功能上分而不离的证据,我们概括了一个简洁的动态路径模型:首先,分工体现在相对区分的神经通路与功能角色:认知控制由 DAN (如 DLPFC、FEF、SPL)主导,优先激活并维持目标的类别,属于容量有限的目标导向加工(Awh et al., 2012; Li et al., 2010);显著性加工则由 VAN 和 SN (如 rTPJ、ACC、AIC)主导,以

自动的方式检测并捕获物理或统计上的突显特征,两条通路在解剖和启动条件上彼此分离(Corbetta et al., 2002; Arcizet et al., 2011)。其次,在复杂任务情境下,二者呈现条件性协同:当出现任务无关的显著分心物且认知负载较高时,注意系统往往表现为资源竞争与耦合再分配,即 DAN 通过 DLPFC 增强目标表征以维持控制, VAN 通过 TPJ 优先响应显著性信号(Geng & Mangun, 2011; Wu et al., 2015)。最终, ACC/AIC 等枢纽在 rPOJ 和 FEF 协助下协调两者的资源分配,实现对无关显著性的抑制和对相关显著性的强化,从而实现注意资源的动态配置(Chen et al., 2012; Katsuki & Constantinidis, 2014)。这一资源再分配过程也解释了行为结果中低负载促进和高负载干扰的效应,和优先图理论所强调的显著性-目标权重竞争机制一致(Fecteau & Munoz, 2006)。总的来说,动态路径模型强调,认知控制与显著性加工并非彼此对立,而是通过分离的通路实现功能分工,并在特定的边界条件下实现协同,以在复杂环境中同时满足目标导向与刺激驱动的需求。

值得注意的是,CCN 对显著性加工的交互作用依赖于任务的相关性。研究发现,仅当显著性刺激与任务相关时,CCN 的核心脑区(如 DLPFC、SPL)激活显著增强,且与视觉皮层(如 LOC)的功能连接强度与行为效率正相关。这一现象可通过目标与显著性的协同机制来解释,即 CCN 不仅负责维持目标导向,还需动态评估显著性信号的任务相关性,并将符合条件的突显特征协同编码至目标表征中。这种协同机制在冲突任务中尤为重要,当多个刺激共享类别属性时,CCN 需通过 SPL 的空间定向功能,优先选择与任务目标空间或语义一致的突显刺激(Kroner et al., 2023)。这一发现挑战了传统观点中 CCN 仅负责纯粹认知控制的假设(Desimone & Duncan, 1995),表明其功能更具灵活性:在任务相关显著性加工中,CCN 充当适应性过滤器,既抑制无关干扰,又主动强化符合目标模板的突显信号。例如, Wu 等人(2015)提出, TPJ (SN 核心)检测到显著性刺激后,通过与前额叶的功能连接将其任务相关性传递给 CCN,进而决定是否分配注意资源。本研究中,与任务相关的新异刺激引发 rPOJ 与 DLPFC 的协同激活,进一步支持了这一跨网络协作模型。因此,CCN 对任务相关显著性的参与本质上是目标导向的适应性选择,而非被动响应。在复杂的类别加工中,这种动态监控的机制可以用来平衡抽象语义表征与具体感知特征的冲突。

有趣的是,审稿人指出,行为结果中发现了显著相关性的主效应,而脑成像的结果提示并没有显著的脑区激活。这种行为与脑成像结果的差异可能从以下两方面进行解释。首先,行为主效应反映的是跨脑区协同后的宏观性能,而 fMRI 仅捕捉体素水平的平均信号强度(Haxby et al., 2001)。任务相关性(相关/无关)的神经表征可能并不依赖单一脑区的激活幅度变化,而是通过多脑区分布式活动模式或网络级协同实现(Bressler & Menon, 2010)。其次,任务相关性对注意的调节可能发生在刺激前的预激活阶段,而 GLM 分析仅捕捉刺激后 4~6 秒的平均 BOLD 信号(Logothetis, 2008)。例如,目标模板(类别语义)的匹配可能在刺激呈现前就通过视觉皮层的预激活影响后续加工(Miao et al., 2023);而任务无关刺激因缺乏注意模板,其神经响应更多依赖刺激驱动加工。如果任务相关性的核心效应集中在刺激前,则 fMRI 因时间窗覆盖不全,可能无法检测到行为层面的显著差异。因此,行为与脑成像结果的差异并非指标冲突,而是测量维度(宏观协同 vs.局部平均)与分析时间窗(预激活 vs.刺激后响应)差异的综合产物。未来研究可结合高时间分辨率技术(如 EEG/MEG)捕捉刺激前至刺激后的全时程神经动态,并通过 MVPA 挖掘分布式神经编码特征,从而更全面地揭示任务相关性如何通过时空协同机制调节注意加工。

此外,本研究仍有一些尚未解决的问题。首先,数字/字母的语义明确性可能低估自然场景中模糊类别的加工难度(如工具类别的多样性),未来需引入原型梯度材料(Miao et al., 2023)检验类别边界的调节效应。其次, fMRI 的低时间分辨率限制了对早期感知窗口(如 N1/P1)的解析,结合 EEG 技术(Wu & Fu, 2017)可更精准捕捉类别表征的时序动态。此外,个体差异(如老年人的前额叶衰退)可能放大显著性干扰效应(Zhang et al., 2024),需在后续研究中纳入年龄与临床变量。在临床干预方面,可以通过 TMS 靶向调控 rPOJ 和 FEF 的活动,可能改善患者的目标-分心物抑制能力(Kucyi et al., 2012)。总之, CAS 的效率优化需兼顾任务目标的明确性与环境突显性的动态平衡,这一原则对理论构建与实践应用均具有重要价值。

5 结论

本研究结合 MFT 与 Oddball 范式,系统考察了认知控制与显著性加工在类别注意选择(CAS)中的

作用。行为结果表明, 认知控制与显著性加工均能独立影响注意选择, 并在高负载和任务相关新异条件下呈现协同效应。脑成像结果进一步显示, 认知控制主要激活 DAN, 显著性加工依赖 VAN/SN。而在 CCN 中, rPOJ 与 FEF 协同连接两类加工: rPOJ 评估任务需求与刺激突显性的匹配度, FEF 将其转化为可执行的定向指令。总的来说, CAS 过程中既存在认知控制与显著性加工的分工, 也在特定条件下表现出两者的协同。

参 考 文 献

- Arcizet, F., Mirpour, K., & Bisley, J. W. (2011). A pure salience response in posterior parietal cortex. *Cerebral Cortex*, *21*(11), 2498–2506.
- Awh, E., Belopolsky, A. V., & Theeuwes, J. (2012). Top-down versus bottom-up attentional control: A failed theoretical dichotomy. *Trends in cognitive sciences*, *16*(8), 437–443.
- Bekinschtein, T. A., Dehaene, S., Rohaut, B., Tadel, F., Cohen, L., & Naccache, L. (2009). Neural signature of the conscious processing of auditory regularities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *106*(5), 1672–1677.
- Bouvier, B., Susini, P., Marquis-Favre, C., Misdariis, N. (2023). Revealing the stimulus-driven component of attention through modulations of auditory salience by timbre attributes. *Scientific Reports*, *13*(1), 6842.
- Brass, M., & von Cramon, D. Y. (2004). Selection for cognitive control: A functional magnetic resonance imaging study on the selection of task-relevant information. *Journal of Neuroscience*, *24*(40), 8847–8852.
- Bressler, S. L., & Menon, V. (2010). Large-scale brain networks in cognition: Emerging methods and principles. *Trends in Cognitive Sciences*, *14*(6), 277–290.
- Broschard, M. B., Turner, B. M., Tranel, D., & Freeman, J. H. (2024). Dissociable roles of the dorsolateral and ventromedial prefrontal cortex in human categorization. *Journal of Neuroscience*, *44*(34), e2343232024.
- Campbell, J. I. D., & Thompson, V. A. (2012). MorePower 6.0 for ANOVA with relational confidence intervals and Bayesian analysis. *Behavior Research Methods*, *44*(4), 1255–1265.
- Chapman, A. F., & Störmer, V. S. (2022). Feature similarity is non-linearly related to attentional selection: Evidence from visual search and sustained attention tasks. *Journal of Vision*, *22*(8), 4.
- Chen, Q., Weidner, R., Weiss, P. H., Marshall, J. C., & Fink, G. R. (2012). Neural interaction between spatial domain and spatial reference frame in parietal-occipital junction. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *24*(11), 2223–2236.
- Collignon, O., Vandewalle, G., Voss, P., Albouy, G., Charbonneau, G., Lassonde, M., & Lepore, F. (2011). Functional specialization for auditory-spatial processing in the occipital cortex of congenitally blind humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*(11), 4435–4440.
- Corbetta, M., Kincade, J. M., & Shulman, G. L. (2002). Neural systems for visual orienting and their relationships to spatial working memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *14*(3), 508–523.
- Corbetta, M., Patel, G., & Shulman, G. L. (2008). The reorienting system of the human brain: From environment to theory of mind. *Neuron*, *58*(3), 306–324.
- Desimone, R., & Duncan, J. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual Review of Neuroscience*, *18*(1), 193–222.
- De Fockert, J., Rees, G., Frith, C., & Lavie, N. (2004). Neural correlates of attentional capture in visual search. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *16*(5), 751–759.
- Fan, J. (2014). An information theory account of cognitive control. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, 680.
- Fan, J., Guise, K. G., Liu, X., & Wang, H. (2008). Searching for the majority: Algorithms of voluntary control. *PLOS ONE*, *3*(10), e3522.
- Fecteau, J. H., & Munoz, D. P. (2006). Saliency, relevance, and firing: A priority map for target selection. *Trends in Cognitive Sciences*, *10*(8), 382–390.
- Ferrera, V. P., Yanike, M., & Cassanello, C. (2009). Frontal eye field neurons signal changes in decision criteria. *Nature Neuroscience*, *12*(11), 1458–1462.
- Freedman, D. J., Riesenhuber, M., Poggio, T., & Miller, E. K. (2003). A comparison of primate prefrontal and inferior temporal cortices during visual categorization. *Journal of Neuroscience*, *23*(12), 5235–5246.
- Garrido, M. I., Kilner, J. M., Stephan, K. E., & Friston, K. J. (2009). The mismatch negativity: A review of underlying mechanisms. *Clinical Neurophysiology*, *120*(3), 453–463.
- Geng, J. J., & Mangun, G. R. (2011). Right temporoparietal junction activation by a salient contextual cue facilitates target discrimination. *Neuroimage*, *54*(1), 594–601.
- Harsay, H. A., Spaan, M., Wijnen, J. G., & Ridderinkhof, K. R. (2012). Error awareness and salience processing in the oddball task: Shared neural mechanisms. *Frontiers in Human Neuroscience*, *6*, 246.
- Haxby, J. V., Gobbini, M. I., Furey, M. L., Ishai, A., Schouten, J. L., & Pietrini, P. (2001). Distributed and overlapping representations of faces and objects in ventral temporal cortex. *Science*, *293*(5539), 2425–2430.
- Itti, L., & Koch, C. (2001). Computational modelling of visual attention. *Nature Reviews Neuroscience*, *2*(3), 194–203.
- Katsuki, F., & Constantinidis, C. (2014). Bottom-up and top-down attention: Different processes and overlapping neural systems. *The Neuroscientist*, *20*(5), 509–521.
- Keller, A. S., Jagadeesh, A. V., Bugatus, L., Williams, L. M., & Grill-Spector, K. (2022). Attention enhances category representations across the brain with strengthened residual correlations to ventral temporal cortex. *Neuroimage*, *249*, 118900.
- Kim, H. (2014). Involvement of the dorsal and ventral attention networks in oddball stimulus processing: A meta-analysis. *Human Brain Mapping*, *35*(5), 2265–2284.
- Kroner, A., Senden, M., & Goebel, R. (2023). Neural correlates of high-level visual saliency models. *bioRxiv*, 2023–07.
- Kucyi, A., Hodaie, M., & Davis, K. D. (2012). Lateralization in intrinsic functional connectivity of the temporoparietal junction with salience-and attention-related brain networks. *Journal of Neurophysiology*, *108*(12), 3382–3392.
- Kumaran, D., Summerfield, J. J., Hassabis, D., & Maguire, E. A. (2009). Tracking the emergence of conceptual knowledge during human decision making. *Neuron*, *63*(6), 889–901.
- Lavie, N. (2005). Distracted and confused?: Selective attention under load. *Trends in Cognitive Sciences*, *9*(2), 75–82.
- Lerebourg, M., de Lange, F. P., & Peelen, M. V. (2024). Attentional guidance through object associations in visual cortex. *Science Advances*, *10*(41), eado6226.
- Li, L., Gratton, C., Yao, D., & Knight, R. T. (2010). Role of frontal and parietal cortices in the control of bottom-up and

- top-down attention in humans. *Brain Research*, 1344, 173–184.
- Logothetis, N. K. (2008). What we can do and what we cannot do with fMRI. *Nature*, 453(7197), 869–878.
- Macé, M. J.-M., Joubert, O. R., Nespoulous, J.-L., & Fabre-Thorpe, M. (2009). The time-course of visual categorizations: You spot the animal faster than the bird. *PLoS One*, 4(6), e5927.
- Miao, Z., Wang, J., Wang, Y., Jiang, Y., Chen, Y., & Wu, X. (2023). The time course of category-based attentional template pre-activation depends on the category framework. *Neuropsychologia*, 189, 108667.
- Mo, C., He, D., & Fang, F. (2018). Attention priority map of face images in human early visual cortex. *Journal of Neuroscience*, 38(1), 149–157.
- Näätänen, R., Kujala, T., & Winkler, I. (2011). Auditory processing that leads to conscious perception: A unique window to central auditory processing opened by the mismatch negativity and related responses. *Psychophysiology*, 48(1), 4–22.
- Noudoost, B., & Moore, T. (2011). Control of visual cortical signals by prefrontal dopamine. *Nature*, 474(7351), 372–375.
- Oxner, M., Martinovic, J., Forscheck, N., Lempe, R., Gundlach, C., & Müller, M. (2023). Global enhancement of target color-not proactive suppression-explains attentional deployment during visual search. *Journal of Experimental Psychology: General*, 152(6), 1705–1722.
- Peelen, M. V., & Kastner, S. (2014). Attention in the real world: Toward understanding its neural basis. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(5), 242–250.
- Reeder, R. R., & Peelen, M. V. (2013). The contents of the search template for category-level search in natural scenes. *Journal of Vision*, 13(3), 1–13.
- Rosch, E., Mervis, C. B., Gray, W. D., Johnson, D. M., & Boyes-Braem, P. (1976). Basic objects in natural categories. *Cognitive Psychology*, 8(3), 382–439.
- Talairach, J., Tournoux, P., & Rayport, M. (1988). *Co-planar stereotaxic atlas of the human brain: 3-dimensional proportional system – An approach to cerebral imaging*. Thieme Medical Publishers.
- Thayer, D. D., Bahle, B., & Hollingworth, A. (2022). Guidance of attention from visual working memory is feature-based, not object-based: Implications for models of feature binding. *Journal of Experimental Psychology: General*, 151(5), 1018–1034.
- Theeuwes, J. (2010). Top-down and bottom-up control of visual selection. *Acta Psychologica*, 135(2), 77–99.
- Townsend, J. T., & Ashby, F. G. (1983). *Stochastic modeling of elementary psychological processes*. Cambridge University Press.
- Wang, H., Liu, X., & Fan, J. (2011). Cognitive control in majority search: A computational modeling approach. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5, 16.
- Wang, M., Yu, B., Luo, C., Fogelson, N., Zhang, J., Jin, Z., & Li, L. (2020). Evaluating the causal contribution of fronto-parietal cortices to the control of the bottom-up and top-down visual attention using fMRI-guided TMS. *Cortex*, 126, 200–212.
- Wu, Q., Chang, C.-F., Xi, S., Huang, I.-W., Liu, Z., Juan, C.-H., ... Fan, J. (2015). A critical role of temporoparietal junction in the integration of top-down and bottom-up attentional control. *Human Brain Mapping*, 36(11), 4317–4333.
- Wu, T., Chen, C., Spagna, A., Wu, X., Mackie, M.-A., Russell-Giller, S., ... Fan, J. (2020). The functional anatomy of cognitive control: A domain-general brain network for uncertainty processing. *Journal of Comparative Neurology*, 528(8), 1265–1292.
- Wu, T., Dufford, A. J., Mackie, M.-A., Egan, L. J., & Fan, J. (2016). The capacity of cognitive control estimated from a perceptual decision making task. *Scientific Reports*, 6(1), 34025.
- Wu, T., Spagna, A., Chen, C., Schulz, K. P., Hof, P. R., & Fan, J. (2020). Supramodal mechanisms of the cognitive control network in uncertainty processing. *Cerebral Cortex*, 30(12), 6336–6349.
- Wu, X., & Fu, S. (2017). The different roles of category and feature specific attentional control settings on attentional enhancement and inhibition. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 79, 1968–1978.
- Wu, X., Liu, X., & Fu, S. (2016). Feature and category specific attentional control settings are differently affected by attentional engagement in contingent attentional capture. *Biological Psychology*, 118, 8–16.
- Wyble, B., Folk, C., & Potter, M. C. (2013). Contingent attentional capture by conceptually relevant images. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 39(3), 861–871.
- Yang, H., & Zelinsky, G. J. (2009). Visual search is guided to categorically-defined targets. *Vision Research*, 49(16), 2095–2103.
- Zhang, L., Bai, L., Guo, Z., Gao, J., Wu, J., Huang, J., & Liu, Z. (2024). Abnormal functional connectivity of the occipital thalamus with the superior occipital gyrus is associated with mild cognitive impairment in elderly individuals with primary insomnia. *Brain and Behavior*, 14(2), e3411.

Functional division and synergy of cognitive control and salience processing in category-based attentional selection: Evidence from fMRI

WU Xia^{1,2,3}, LI Yiwei¹, SUN Xiaoya¹, CHEN Ying⁴, JIANG Yunpeng^{1,2,3}, CHEN Yan^{5,1}

⁽¹⁾ Faculty of Psychology, Tianjin Normal University; ⁽²⁾ Key Research Base of Humanities and Social Sciences of the Ministry of Education, Academy of Psychology and Behavior; ⁽³⁾ Tianjin Social Science Laboratory of Students' Mental Development and Learning, Tianjin 300387, China) ⁽⁴⁾ School of Vocational Education, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China) ⁽⁵⁾ School of Psychology, Guizhou Normal University, Guiyang 550000, China)

Abstract

Category-based attentional selection (CAS) enables the visual system to prioritize objects that share an abstract, semantic label. For example, “tools,” “letters,” or “animals.” Yet how cognitive load and salience processing jointly sculpt this high-level form of attention remains unclear. Here we combined a Majority Function Task (MFT) with a visual Oddball manipulation in a fully crossed 2 (load: low 3:0 vs. high 2:1 ratio) × 2 (salience level: standard 80 % vs. Oddball 20 %) × 2 (salience relevance: task-relevant vs. task-irrelevant) design. Twenty-nine right-handed adults (24 women; 18–27 yrs) performed 768 trials while BOLD signals were recorded in a 3 T scanner; eye position was concurrently monitored to rule out overt shifts.

Inverse-efficiency scores (IES = RT / accuracy) confirmed the expected main effect of load, but also revealed a three-way interaction: under high load, task-relevant Oddballs produced the largest cost (Cohen's $d = 0.81$), whereas task-irrelevant Oddballs caused a moderate, load-dependent slowdown. This pattern supports a resource-competition account in which maintaining a category template and suppressing conspicuous distractors draw on a common, finite pool.

Whole-brain GLM revealed a functional division of effects. Cognitive load (high > low) boosted activity throughout the dorsal control network, including bilateral superior parietal lobule (SPL), dorsal lateral prefrontal cortex (DLPFC) and insula, whereas salience level (Oddball > standard) preferentially recruited ventral salience nodes, including right angular gyrus, bilateral anterior insula and caudate nucleus. By contrast, salience relevance (task-relevant vs. task-irrelevant) produced no reliable univariate clusters, mirroring the absence of a pure relevance main effect in local BOLD amplitude. To test whether relevance information was nonetheless encoded in spatial patterns, we performed multivariate pattern analysis (MVPA). A linear support-vector machine trained on voxels that were jointly responsive to load and salience distinguished the eight experimental conditions with 86.83 % accuracy ($t = 73.57$, $p < .001$). Weight-map inspection showed that the right superior occipital/parieto-occipital junction and right pre-central gyrus contributed most strongly but not exclusively, suggesting rPOJ and FEF serve as a convergence hub together with premotor nodes. Thus, although relevance does not manifest as a simple amplitude shift, it is robustly represented in distributed activation patterns and in the connectivity of a posterior occipito-parietal hub, highlighting a pattern-based, network-level code that reconciles the dorsal–ventral division of labor with successful category-based attentional selection.

These converging results indicate that CAS operates through a layered priority architecture: dorsal control regions inject goal-related gain, ventral salience regions register statistical deviance, and rPOJ/FEF synergistically re-weights both streams to rebalance priority values when resources are scarce. Taken together, our findings extend priority-map theory into the semantic domain and demonstrate that cognitive load is a key moderator of how salience relevance shapes the competition between dorsal and ventral attention systems.

By isolating where (dorsal vs. ventral) and how (pattern vs. amplitude) cognitive load and salience relevance interact, the study refines dual-route models of attention and identifies rPOJ and FEF as pivotal hubs for balancing task demands against environmental conspicuity, that is, a mechanism likely critical for real-world scenarios that call for rapid category-based decisions under pressure.

Keywords cognitive control, salience processing, category-based attention, cognitive control network, right parieto-occipital junction