

内外部分组线索对数量感知分组化策略的影响： 来自 fMRI 证据*

潘 运^{1,2} 杨环瑜^{1,3} 贾良智¹ 朱 俊¹
余方文¹ 张 颀¹ 杨 平¹

(¹ 贵州师范大学心理学院, 贵阳 550025) (² 贵州师范学院, 贵阳 550018) (³ 云南民族大学教育学院, 昆明 650031)

摘 要 本研究采用数量估计任务结合 fMRI 技术, 深入探究内部和外部分组线索分别对数量感知分组化策略的影响, 揭示数量感知分组化策略的神经机制。结果发现, 分组条件比未分组条件在左侧顶内沟、角回和额上回等与计算相关的脑区有更显著激活; 外部分组线索比内部分组线索在额中回和颞下回等与拓扑性质相关的脑区表现出更显著激活。结果表明, 被试分组条件下更倾向于使用计算相关策略进行数量感知, 且外部分组线索具有拓扑性质, 支持了拓扑知觉理论。

关键词 数量感知, 分组化策略, 分组线索, 拓扑知觉理论, 功能磁共振成像

分类号 B842

1 引言

日常学习生活中, 人们能够快速估计一组项目集合的大小或数量。作为认识世界和处理信息的重要基础, 数量感知(numerosity perception) 是个体从各种刺激中提取数字信息的能力(Piazza & Izard, 2009), 并引导和影响人的行为与决策(Burr & Ross, 2008; Cai et al., 2021; Cicchini et al., 2023; Grasso et al., 2022; 刘炜 等, 2012)。当前, 研究者关于数量感知的认知机制主要聚焦在其策略加工上。这些策略包括了感数(subitizing), 即被试能够既快速又准确报告 4 个以内的物体; 计数(counting), 即被试报告 4 个以上的目标物体数目时, 反应速度会变慢, 且需要操作数量符号与视空间的协调; 估计(estimation), 即当物体数量较多且被试又没有足够时间进行计数时, 就需要使用此策略对物体数量进行快速加工, 但通常结果是近似和不准确的(Tsouli et al., 2022; Wurm et al., 2021)。

不同于感数、计数和估计这三种数量感知策略,

分组化(groupitizing) 是一种基于视觉感知的策略, 指个体在进行数量判断时, 将分布的客体自发性地或依赖外部线索组合成集合或组别, 以便在呈现时间较短且数量较多的情况下, 快速有效地估计数量(Anobile et al., 2020; Maldonado Moscoso et al., 2020; Pan et al., 2021; Wege et al., 2021)。本研究中的分组化策略是通过提供视觉分组线索(如颜色、空间接近性等)引导被试对刺激进行组织化处理。这种策略不仅能增加感数范围, 易化小数字构成大数字概念的理解, 还可让个体在分组化过程中使用快速简单的心算加法和乘法, 提高数量感知效率(Anobile et al., 2021; Ciccione & Dehaene, 2020; Starkey & McCandliss, 2014; Wege et al., 2021)。

自数量感知分组化被 Starkey 等(2014)提出以来, 已成为数量感知研究领域的焦点。Ciccione 和 Dehaene (2020)的研究发现被试对颜色相似性和邻近性分组的数组估计速度更快。分组化策略能够提高小学儿童数量感知表现(Starkey & McCandliss, 2014), 预测小学生的数学成绩(Guillaume et al.,

收稿日期: 2024-07-28

* 国家自然科学基金(32360203)、教育部人文社会科学重点研究基地重大项目(22JJD190009)资助。

通信作者: 潘运, E-mail: panyun129@163.com; 杨环瑜, E-mail: 1320961328@qq.com

2022)。与感数相似, Maldonado 等(2020)研究发现当呈现分组刺激时, 算术能力较强的个体会自动将阵列中的项目分组成可感数组, 提高数量感知成绩。然而, 这些研究多是从内部分组线索(如, 邻近性, 颜色相似性)角度探讨分组化这种数量感知策略(Anobile et al., 2020; Ciccione & Dehaene, 2020)。

根据格式塔理论, Palmer (1992, 1994)将知觉分组分为内部分组原则(intrinsic grouping principles)和外部分组原则(extrinsic grouping principles)。前者基于元素属性(形状、位置、颜色等)的内在关系, 如邻近性、相似性等; 后者基于元素间的外部关系, 如共同区域、连通性(Luna & Montoro, 2011; Palmer, 1992; Palmer & Rock, 1994)。拓扑知觉理论(theory of topological perception)进一步拓展了格式塔理论, 强调拓扑性质在视知觉中的核心作用(Chen, 1982; 陈霖, 2017; 兰哲, 陈霖, 1998; 朱滢, 2005)。外部分组原则(如, 连通性和封闭性)是基于拓扑性质的组织原则(He et al., 2009; He et al., 2015; Palmer, 1992; Palmer & Rock, 1994)。在拓扑知觉理论框架下, 连通性和共同区域(类似于封闭性)作为重要的外部分组线索具有拓扑性质。连通性描述物体间的连接关系, 共同区域强调封闭空间内元素间的关联, 二者通过拓扑学原则相互影响, 形成对环境结构的感知(He et al., 2015; 朱滢, 2005)。此外, 也突显了形状知觉中拓扑结构的重要性和优先性, 即拓扑知觉优先于其他几何知觉。已有的认知神经证据表明拓扑属性的关键脑区是颞下皮层(Wang et al., 2007; Wang et al., 2023; Zhou et al., 2010)。

在视觉和数量感知领域, 已有研究结果支持外部分组线索比内部分组线索更有优势(Luna et al., 2016; Montoro et al., 2017; Palmer & Beck, 2007; Pan et al., 2021)。如 Luna 等(2016) 研究表明被试对外部分组线索的刺激反应更快。Palmer 和 Beck (2007)发现被试对相互连通元素的辨别反应更快。Pan 等(2021)的研究结果也发现外部分组线索比内部分组线索的感知精度更高、反应时更快。因此, 为深入探究数量感知分组化的加工过程, 有必要通过比较内部和外部线索对数量感知分组化的影响, 揭示分组化在数量感知中的作用及神经机制, 为已有与数量感知有关的数字加工理论提供实证依据。

揭示数量感知策略的神经机制对理解人类是如何理解和处理数量尤为重要。先前脑成像研究认为感数策略涉及顶叶皮层和初级视觉皮层。其中, 顶叶皮层主要用于接收视觉输入并对物体数量进

行初步感知; 初级视觉皮层负责对数量信息的初步分离和编码, 特别是后视皮层的特定亚区(后顶上回, 后中央回)对小数量的敏感性较高(Cai et al., 2022; Caponi et al., 2023; Czarnecka & Raczky et al., 2023; Simon & Vaishnavi, 1996; Tsouli et al., 2022)。估计策略涉及顶内沟和前额叶皮层。其中, 顶内沟负责对数量的大致估计, 为决策提供重要信息; 前额叶皮层能够整合外界刺激和内部表征, 并且在参与数量信息估计和比较的加工过程中与顶内沟形成功能耦合(Cicchini et al., 2023; Dehaene & Changeux, 1993; Fornaciai & Park, 2018; Harvey et al., 2013; Malone et al., 2019)。计数策略同样涉及顶内沟和前额叶皮层。前者主要与注意力和空间认知密切相关; 后者负责规划和执行计算任务。此外, 有研究亦发现顶内沟与视觉皮层及颞叶之间的功能连接与视觉输入转化为数量计数密切相关(Maldonado et al., 2021; Pennock et al., 2021; Piazza et al., 2002; Whalen et al., 2016; Zhang et al., 2023)。但迄今仅有 Maldonado 等(2021)的研究发现数量感知过程中的分组条件会激活额顶网络、角回和左侧顶内沟, 而顶内沟被证明与计算相关。可见, 关于数量感知分组化策略的神经机制研究确实较少, 有必要深入探讨。

综上, 本研究采用数量估计任务, 考察内部分组线索和外部分组线索对数量感知分组化的影响, 揭示分组化策略的神经机制。基于拓扑知觉理论及前期有关数量感知分组化策略的研究成果(Anobile et al., 2020; Maldonado Moscoso et al., 2020; Pan et al., 2021; Starkey & McCandliss, 2014), 本研究预期如下: (1)先前行为结果已证明分组化更高效的原因是分组条件下心算或事实提取策略的运用(Pan et al., 2021; Ciccione & Dehaene, 2020), 所以我们预期分组化策略的使用会激活更多与算术相关区域, 如顶内沟、角回和额上回等; (2)外部分组线索的加工机制可能与拓扑属性相关, 因此比内部分组线索激活更多拓扑属性相关区域, 如腹侧颞叶皮层、额回和顶内沟等。

2 研究方法

2.1 被试

基于先前数量感知分组化效应的研究(Maldonado et al., 2021), 以及相关文献中效应量报告(0.25)和期望统计功效(0.8), 本研究使用 G-power 3.1 软件进行样本量估算。最终确定所需样本量至少 15 人。

实际招募 21 名被试, 平均年龄为 21 ± 3.4 岁, 年龄跨度 18 至 24 岁。由于 1 名被试在实验过程中头部偏移过大(平动大于 3 mm, 转动大于 2.5°)被剔除, 最终保留有效被试 20 名。被试招募自贵州师范大学, 所有被试均为右利手, 视力或矫正视力正常, 无神经、精神疾病, 无色盲、色弱。在进入扫描间前被试需要填写《核磁共振研究安全筛查表》, 排除体内含有无法移除的金属植入物的被试。实验得到贵州师范大学心理学院伦理审批委员会的批准(批准号: GZNUPSY202111005)。所有被试在正式实验前签署了《磁共振研究被试知情同意书》。

2.2 实验材料

内部分组线索参考前人研究(Anobile et al., 2020)包括颜色相似性和邻近性, 外部分组线索包括连通性和共同区域, 每个刺激大小均为 $0.4 \times 0.4^\circ$ 。颜色相似性(color similarity)线索中, 分组条件下的刺激由红色、蓝色、黄色和绿色(RGB: 255 0 0; 0 0 255; 255 255 0; 0 255 0)四种颜色组成, 每种颜色下的刺激随机分布, 未分组条件的刺激为黑色边框的白色方块, 每个刺激随机分布在大网格中。如图 1F 所示, 左边是分组条件, 右边是未分组条件。邻近性(proximity)刺激由黑色边框的白色方块

($0.4 \times 0.4^\circ$)组成, 分组条件下刺激被分成 4 组, 每组有 12 个可能的位置, 每组刺激都分布于同一象限, 每个象限最大面积为 $4^\circ \times 2^\circ$, 每组的中心距屏幕中心的距离为 5° (见图 1C), 未分组条件每个刺激随机分布在大网格中(图 1C, G)。连通性(connectedness)刺激由黑色边框的白色方块组成, 刺激随机分布在网格中。分组条件下每组的正方形由一条黑色线段连接, 线段连接的是正方形的正中心(见图 1B, D)。未分组条件没有黑色连接线, 刺激随机分布在大网格中(图 1B)。共同区域(common region)同样由黑色边框的白色方块组成。分组条件下网格被分成 4 个象限, 每个子组的刺激随机分布在 4 个象限中的方框($2.5 \times 2.5^\circ$)内。例如, 图 1A 是一组由 3 个子组构成的数组(3, 3, 3), 因此只有 3 个方框。未分组条件没有方框, 刺激随机分布在大网格中(图 1E)。

2.3 实验程序

任务态 fMRI 成像采用 Block 设计。任务包含 2 个 run, 每个 run 包括 8 个 block, 分别为连通性/分组、连通性/未分组、共同区域/分组、共同区域/未分组、颜色相似性/分组、颜色相似性/未分组、邻近性/分组、邻近性/未分组(图 2)。数值范围根据

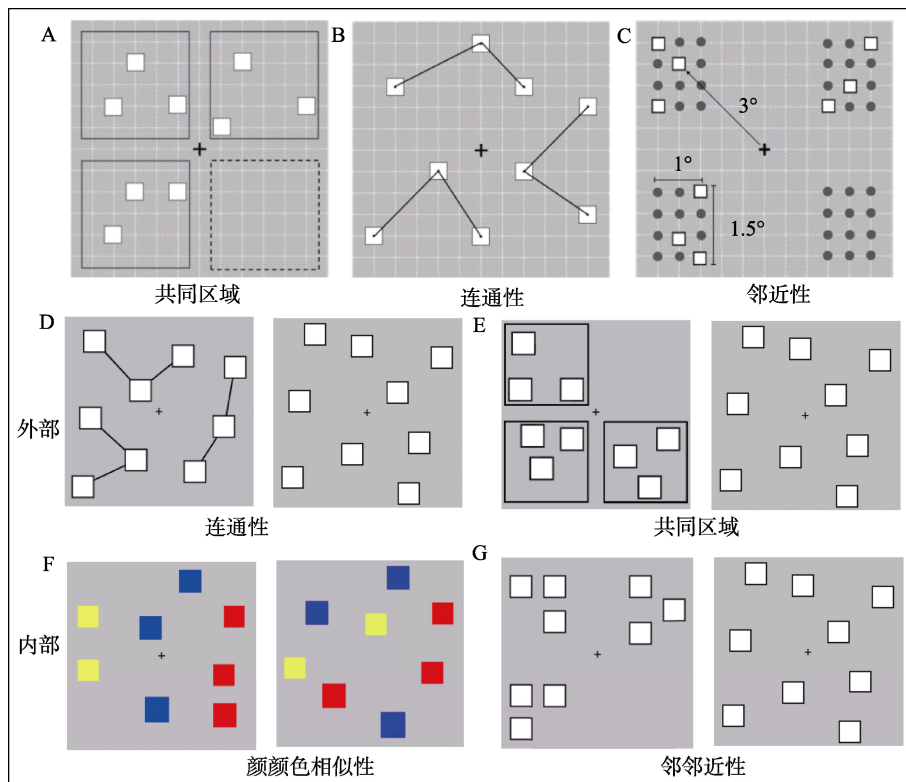


图 1 刺激材料示例图

注: A-C: 共同区域、连通性和邻近性刺激材料分布图; D-G: 外部分组线索和内部分组线索刺激材料示意图, 所有分组线索左边是分组条件, 右边是未分组条件(为便于观看, 图中刺激材料没有按实际比例绘制)。彩图见电子版, 下同

先前研究(Pan et al., 2021), 选择了 6, 9, 12, 16 这几个分组化效应最强的数值。每种条件下重复呈现 3 次, 每个 block 有 12 个 trial, 每个 trial 持续时间为 6 s, block 之间休息 18 s, 所以一个 run 持续时间为 11 分 7 秒。实验任务为数量估计任务, 要求被试在看到目标刺激后估计目标刺激的数量, 具体实验流程如图 2 所示。首先, 屏幕正中间出现一个黑色的“+”注视点, 持续时间为 1 s, 注视点消失后呈现目标刺激 500 ms, 紧接着呈现 500 ms 的空屏然后呈现一个长方形输入框要求被试用所提供的特殊键盘在输入框中按下所估计目标刺激的数量。被试共有 4 s 的时间按键, 按键完毕被试将休息直到进入下一个 trial (图 2)。

使用 MATLAB 的 PsychToolbox (版本 R2016b) 提供刺激并记录反应。正式实验开始前, 被试需在准备室中进行练习, 熟悉实验任务和按键。刺激通过 LCD 投影仪投射到前方扫描仪的屏幕上, 然后被试通过头部线圈上的倾斜镜观看。进入扫描间后, 被试右手拿着磁铁兼容的反应盒进行反应, 盒子上有 4 个按键分别对应 6、9、12、16 四个数值。确保被试熟悉实验流程后, 主试会使用金属探测器扫描被试身上是否有金属物品。被试需躺在核磁共振扫描仪上, 保持头和身体的稳定, 并佩戴好耳塞和专用眼镜。实验期间, 被试需保持安静, 如感到不适或者想终止实验, 可以按响应盒上的终止键。

2.4 fMRI 数据采集

使用贵州师范大学 fMRI 实验室西门子 3.0T 磁

共振成像仪(Siemens 3.0T)完成脑成像数据采集。首先使用平面回波成像(EPI)进行任务态功能像扫描, 扫描参数为: 视野范围(Field of view) = 192 mm, 重复时间(Repeat time, TR) = 2000 ms, 回波时间(Echo time, TE) = 30 ms, 分辨率 = 64×64, 体素大小(voxel size) = 3 mm × 3 mm × 2 mm, 反转角(Flip angle) = 52°, 扫描层数(Slices) = 72 层。功能像扫描完成后, 扫描被试大脑 T1 结构像, 结构像扫描采用 T1-weighted 三维梯度回波脉冲序列, 扫描参数为: 重复时间(TR) = 2530 ms, 回波时间(TE) = 1.94 ms, 层厚(Slice thickness) = 1 mm, 反转角(Flip angle) = 7°, 视野范围(Field of view) = 256 mm, 体素大小(Voxel size) = 1 mm × 1 mm × 1 mm, 扫描层数 = 176 层。

2.5 数据分析

2.5.1 行为数据分析

根据前人研究(Luna & Montoro, 2011; Palmer, 1992; Palmer & Rock, 1994), 将共同区域和连通性合并为外部分组线索, 将颜色相似性和邻近性合并为内部分组线索, 使用 SPSS 25.0 对分组线索(外部分组线索、内部分组线索)和分组条件(分组、未分组)进行 2×2 重复测量方差分析, 比较数量感知任务的反应时和感知精度结果。感知精度由变异系数(CV)衡量: 变异系数是经典的心理物理参数, 数量感知中该参数可以反映出数量估计过程中的感觉噪声, 变异系数值越高感觉噪声越多, 估计越不精确。具体计算方式见公式 1, 其中 N_i 是所分析的数值, i 是数值的标准差。

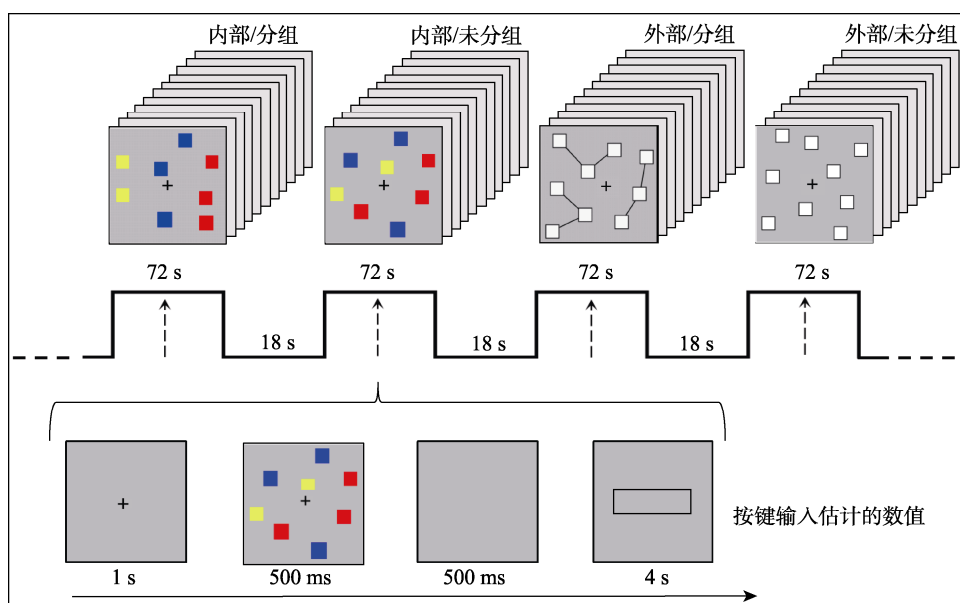


图 2 实验流程图

$$CV = \frac{i}{N_i} \quad (1)$$

2.5.2 核磁数据分析

数据预处理基于 Matlab 工具箱中的 SPM12 (<https://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>), 包括以下步骤: 将采集到的 DICOM 格式的脑成像数据转换为 SPM 可处理的 NIFTI 格式文件; 对功能数据进行时间层校正, 再对扫描之间的头动进行校正, 保证后续配准准确; 将每个被试的高分辨率结构像(T1 图像)配准到 MNI 标准空间中; 将被试的结构像配准到功能像上, 确保数据在相同空间; 对结构像进行分割, 生成灰质、白质和脑脊液三部分; 将不同被试的脑成像图片放置在标准空间中, 以公共坐标系描述脑区位置; 最后对功能像进行空间平滑处理, 采用高斯核平滑方法, 以提高信噪比和空间连续性, 全宽半高值(FWHM)为 6 mm。

一阶分析将预处理后的功能像数据在全脑体素水平上使用广义线性模型(GLM)构建多重线性回归模型矩阵。设计矩阵包含 5 种类型的回归量, 其中 4 种类型是分组线索, 分别为连通性、共同区域、邻近性和颜色相似性分组线索, 另一种类型是未分组线索。通过卷积 HRF 将各条件的时间序列向量转化为预测信号变化, 构建设计矩阵, 并将 6 个头动参数作为不感兴趣的回归量加入分析。设计矩阵经过标准化处理和多重共线性检查后, 通过最小二乘法拟合 GLM 模型, 用 GLM 分析产生的 contrast images 进行二阶分析, 在体素水平(voxel level)未校正, $p < 0.001$ 及簇水平(cluster level)FDR 校正, $p < 0.05$, 的阈值下评估脑区激活显著性。

根据全脑分析中分组条件和分组线索下脑区激活的峰值坐标, 创建 6 mm 球形半径的感兴趣区(ROI)。ROI 分析使用 Rex (<https://www.nitrc.org/projects/rex/>)工具包提取每个被试在分组条件和分组线索下的激活 Beta 值。结合已有文献, 分别选取与数量感知和分组线索密切相关的脑区作为 ROI。数量感知相关脑区包括顶内沟、角回和额上回, 已有研究表明这些区域在以往的数量感知的分组化策略中有显著激活(Malone et al., 2019; Maldonado et al., 2021)。分组线索相关脑区包括顶内沟、额中回和颞下回, 这些脑区在知觉分组和拓扑知觉任务中具有显著激活(Wang et al., 2007; Wang et al., 2023; Zhou et al., 2010)。使用 SPSS 25.0 对提取的 Beta 值进行配对样本 t 检验, 深入了解分组条件和分组线索对脑区激活的影响。

关于广义心理生理相互作用(Generalized Psychophysiological Interaction, gPPI), 本研究采用 CONN 工具包(<https://web.conn-toolbox.org/>)分析不同脑区间的功能连接模式。本研究的种子点选择基于全脑分析的显著激活峰值坐标, 创建半径为 6 mm 的球形种子点, 同时参考了以往研究关于数量感知分组化效应相关脑区的功能(Maldonado et al., 2021; Wang et al., 2023)。具体而言, 与数量感知相关的脑区包括双侧顶内沟和角回; 与知觉分组相关的脑区包括额上回和额中回; 与拓扑知觉相关的脑区为颞下回。通过 t 检验对不同脑区间的连接强度进行统计检验, 揭示功能连接模式。

3 结果

3.1 行为结果

对连通性和共同区域两个分组线索进行双样本 t 检验, 发现无论是感知精度($t(19) = 0.0776, p = 0.940$)还是反应时($t(19) = 1.325, p = 0.224$)二者都没有显著差异, 结合前人研究(Luna & Montoro, 2011; Palmer, 1992; Palmer & Rock, 1994)将其合并为外部分组线索。同样对颜色相似性和邻近性两个分组线索分别进行双样本 t 检验, 发现无论是感知精度($t(19) = 0.869, p = 0.390$)还是反应时($t(19) = 0.277, p = 0.783$)二者都没有差异, 因此将其合并为内部分组线索(Luna & Montoro, 2011; Palmer, 1992; Palmer & Rock, 1994)。对于感知精度, 2×2 重复测量方差分析的数据显示分组条件的主效应显著, $F(1, 19) = 49.533, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.559$, 分组条件比未分组条件感知精度更精确, $t(19) = 3.610, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 0.219$ 。分组线索的主效应不显著, $F(3, 17) = 1.049, p = 0.382$ 。分组条件和分组线索的交互作用显著, $F(3, 17) = 3.539, p = 0.024, \eta_p^2 = 0.223$ 。事后检验表明, 在分组条件下外部分组线索比内部分组线索的感知精度更精确, $t(19) = 4.050, p_{\text{bonferroni}} < 0.001, \text{Cohen's } d = 0.896$; 未分组条件下内外部分组线索的差异不显著, $t(19) = 0.502, p_{\text{bonferroni}} = 0.609, \text{Cohen's } d = 0.112$ (图 3A)。对于反应时, 2×2 重复测量方差分析的结果表明, 仅分组条件的主效应显著, $F(1, 19) = 12.963, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.249$, 分组条件的反应时显著短于未分组条件, $t(19) = 3.245, p = 0.036, \text{Cohen's } d = 0.767$ (图 3B)。本研究的结果和前人的研究一致(Pan et al., 2021), 证明数量感知中分组条件比未分组条件有更强的分组化效应, 且外部分组线索比内部分组线

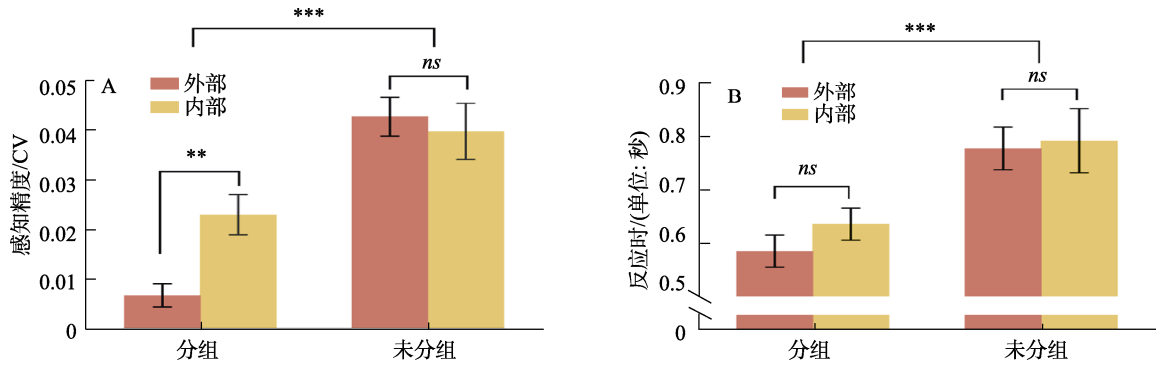


图 3 分组条件和分组线索的感知精度(A)和反应时(B)结果示意图

注: ***表示 $p < 0.001$, **表示 $p < 0.01$, *表示 $p < 0.05$, ns 表示没有显著差异, 误差棒表示均值的标准误差。

索有更强的分组优势。

3.2 fMRI 结果

3.2.1 全脑结果分析

(1) 分组和未分组条件的激活及其差异

为考察分组和未分组条件脑区激活情况, 本研究采用单样本 t 检验, 显著激活的脑区如图 4 所示, 表 1 是激活脑区对应的 MNI 坐标, 其中分组条件的激活包括双侧顶内沟(internal parietal sulcus, IPS)、左侧角回(angular gyrus, AG)、左侧额中回(middle frontal gyrus, MFG)、左侧颞下回(inferior temporal gyrus, ITG)、左侧舌回(lingual gyrus, LG)和左侧缘上回(supramarginal gyrus, SMG)。未分组条件激活

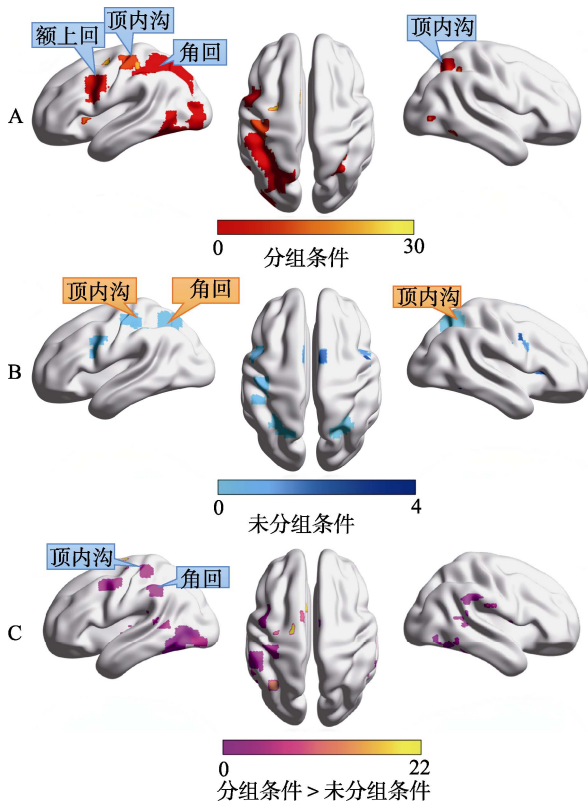


图 4 分组和未分组条件的激活脑区及差异脑区

表 1 全脑分析中分组条件和未分组条件激活的脑区

激活脑区	半球	体素数量	MNI 坐标			t 值
			x	y	z	
分组条件						
顶内沟/角回/缘上回	左	707	-30	-55	42	5.76
颞下回/舌回	左	408	-51	-58	-10	5.64
额中回	左	173	-51	8	32	5.50
顶内沟	右	154	21	-58	42	5.76
未分组条件						
顶内沟/角回	右	128	30	-61	54	4.53
顶内沟/角回/顶上小叶	左	79	-33	-55	52	4.26
缘上回	左	40	-45	-22	52	5.26
额中回	左	34	-45	5	32	3.98
舌回	右	33	9	-88	-6	4.38
辅助运动区	右	24	-6	5	56	4.18

注: 校正阈值为体素水平(voxel level)未校正, $p < 0.001$, 团块水平(cluster level) FDR 校正, $p < 0.05$ 。

了左侧顶上小叶(superior parietal lobule, SPL)、左侧角回、左侧缘上回、左侧额中回、右侧顶内沟和右侧额中回(middle frontal gyrus, MFG)。校正阈值为体素水平(voxel level)未校正, $p < 0.001$, 团块水平(cluster level) FDR 校正, $p < 0.05$ 。

为探讨分组策略特异性的激活, 本研究对分组-未分组做 t 检验, 以期发现分组条件特有的神经机制。在“分组条件 > 未分组条件”对比中, 相比于未分组条件, 分组条件在左侧顶内沟、颞下回、舌回以及双侧角回和缘上回激活更强(图 4C、表 2), 在“未分组条件 > 分组条件”的对比中, 没有显著激活的脑区。

(2) 外部分组线索和内部分组线索的激活及其差异

为考察内部和外部分组线索脑区激活情况, 本研究采用单样本 t 检验, 显著激活的脑区如图 5 所示, 表 3 是激活脑区对应的 MNI 坐标, 其中外部分

表 2 分组条件>未分组条件激活脑区差异

激活脑区	半球	体素数量	MNI 坐标			t 值
			x	y	z	
顶内沟/角回	左	185	-36	-52	54	6.40
颞下回	左	163	-42	-58	-14	6.14
缘上回/角回	右	87	57	-40	30	4.79
缘上回	左	48	-51	-40	40	4.67
舌回	右	38	3	-61	-8	6.03

注: 校正阈值为体素水平(voxel level)未校正, $p < 0.001$, 团块水平(cluster level) FDR 校正, $p < 0.05$ 。

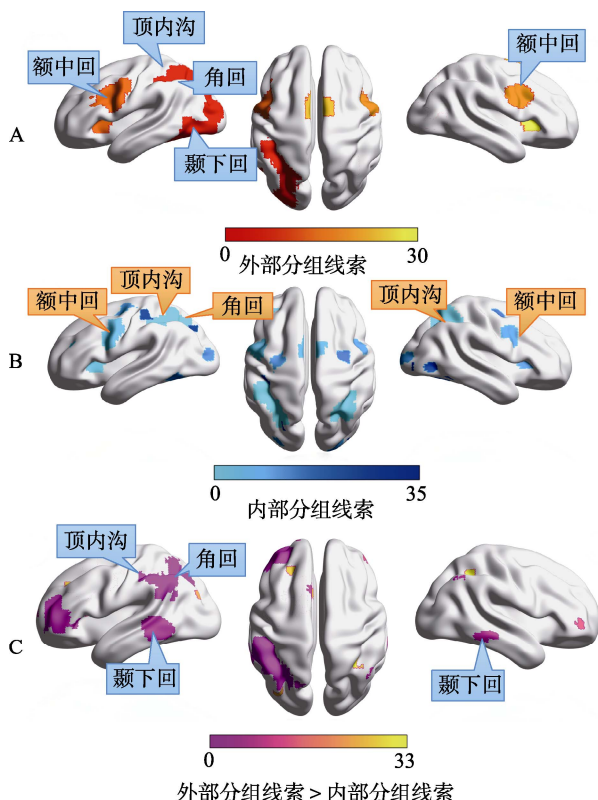


图 5 外部分组线索和内部分组线索的激活脑区及差异脑区

表 3 全脑分析中外部分组线索和内部分组线索激活的脑区

激活脑区	半球	体素数量	MNI 坐标			t 值
			x	y	z	
外部分组线索						
额中回/舌回	右	2297	24	-58	42	6.30
顶内沟/角回/缘上回/颞下回	左	1489	-21	-50	40	6.12
额中回	左	510	-45	5	30	6.05
中央后回	左	247	48	5	32	5.39
辅助运动区	左	192	-6	8	54	5.10
岛叶/顶上小叶	右	124	33	20	6	5.65
内部分组线索						
顶内沟/缘上回/角回	左	345	-36	-37	36	5.83
顶内沟/角回/缘上回	右	267	36	-55	50	6.56
岛叶	左	170	-27	14	14	4.80
额中回/缘上回	左	134	-45	-1	32	4.83
辅助运动区	左	120	-6	-1	56	4.79

注: 校正阈值为体素水平(voxel level)未校正, $p < 0.001$, 团块水平(cluster level) FDR 校正, $p < 0.05$ 。

组线索的激活包括左侧顶内沟、左侧角回、左侧额中回、左侧缘上回、左侧辅助运动区(supplementary motor area, SMA)和左侧舌回, 右侧顶上小叶、右侧颞下回、右侧额中回、右侧梭状回(fusiform gyrus, FG)。内部分组线索激活了左侧顶内沟、左侧缘上回、左侧角回、左侧辅助运动区、左侧额中回、右侧顶内沟、右侧角回和右侧前岛叶(anterior insula, AI)。

为探讨内部与外部分组线索认知神经机制的差异, 以期发现外部分组线索特有的神经机制。本研究对比了内部分组线索和外部分组线索脑激活差异。在“外部分组线索 > 内部分组线索”的对比中, 相比于内部分组线索, 外部分组线索在左侧顶内沟、左侧辅助运动区、左侧额中回、左侧舌回以及双侧颞下回的激活更强(图 5、表 4); 在“内部分组线索 > 外部分组线索”的对比中, 没有发现内部分组线索比外部分组线索激活更强的脑区。

表 4 外部分组线索>内部分组线索激活脑区差异

激活脑区	半球	体素数量	MNI 坐标			t 值
			x	y	z	
辅助运动区/额中回/顶内沟	左	1037	-30	44	38	5.76
颞下回	左	233	-53	-23	-18	5.86
颞下回	右	221	45	-31	-8	5.94
舌回	左	59	-12	-85	-16	5.64

注: 校正阈值为体素水平(voxel level)未校正, $p < 0.001$, 团块水平(cluster level) FDR 校正, $p < 0.05$ 。

3.2.2 gPPI 分析

(1) 分组条件结果

在全脑结果中, 左侧顶内沟、左内侧额上回、左侧角回在分组条件激活更强(与未分组条件相比)。gPPI 统计分析表明, 以左侧顶内沟为种子点, 相较于未分组条件, 分组条件下与双侧角回、顶内沟、额上回以及左侧额中回的功能连接显著增强(表 5、图 6A)。相较于分组条件, 在未分组条件下没有发现其他种子点与全脑之间有显著的功能连接。

表 5 以左侧顶内沟为种子点的分组条件强于未分组条件功能连接情况

种子点	目标区域	体素数量	MNI 坐标			t 值
			x	y	z	
左侧顶内沟	右侧顶内沟	265	30	-69	36	5.85
	右侧角回	56	42	-55	18	5.32
	右侧额上回	102	33	50	11	5.28
	左侧顶内沟	89	-36	-58	50	6.99

注: 校正阈值为体素水平(voxel level)未校正, $p < 0.001$, 团块水平(cluster level) FDR 校正, $p < 0.05$ 。

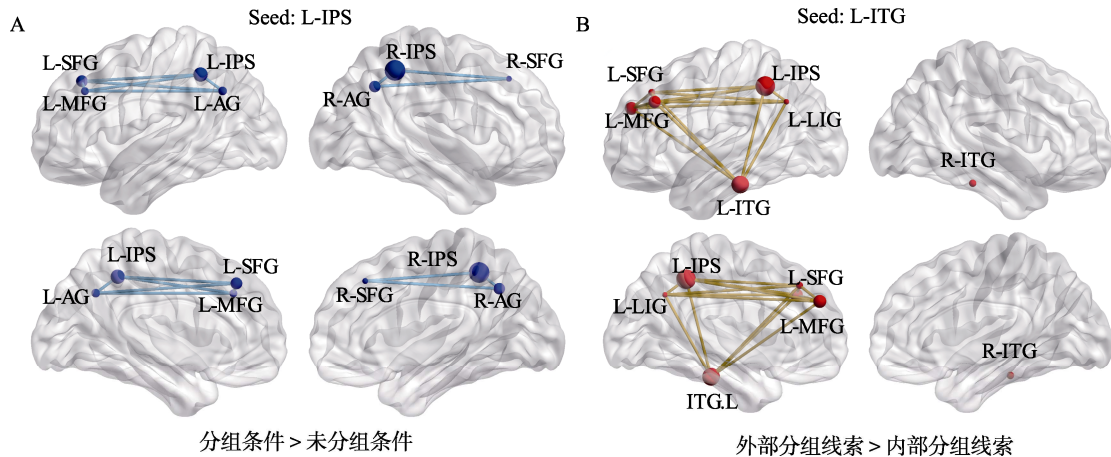


图 6 A: 以左侧顶内沟为种子点分组条件减未分组条件的 gPPI 分析结果; B: 以左侧颞下回为种子点外部分组线索减内部分组线索的 gPPI 分析结果

(2) 分组线索结果

本研究也做了内部和外部分组线索的功能连接, gPPI 统计分析表明, 以左侧颞下回为种子点, 左侧额上回、左侧角回、左侧顶内沟以及双侧颞下回在加工外部分组线索时有更显著的功能连接(表 6、图 6)。相较于内部分组线索, 在外部分组线索下没有发现其他种子点与全脑之间有显著的功能连接。

4 讨论

本研究使用 fMRI 技术, 通过操纵内部和外部分组线索, 目的在于探讨不同分组线索对数量感知分组化策略影响的神经机制。结果发现分组和未分组条件均激活了与数量估计相关的脑区, 如前额叶、顶内沟、颞下回等, 分组条件还额外激活了顶内沟、角回和额上回等计算相关脑区, 且呈现左侧半球偏侧化优势; 相较于内部分组线索, 外部分组线索额外激活了左侧额中回和颞下回等与拓扑属性相关的脑区。结果验证了研究假设, 即被试分组条件下倾向于运用算术和提取策略, 以提高其数量

感知的效率; 外部分组线索的内部机制有拓扑不变量特性, 支持了拓扑知觉理论。

人们在数量感知中能够根据任务情景使用不同策略。以数量感知分组化为例, 当视觉上分别呈现分组和未分组的空点阵时, 未分组的数组会引发近似数量表征系统, 该系统在数量估计策略中发挥重要作用。然而, 分组的数组会自动运用更精确的计算和提取策略(Maldonado et al., 2021)。已有研究表明, 不同脑区活动与任务类型密切相关, 近似数量估计激活了前额叶皮层、顶叶皮层、海马、纹状体及丘脑等, 而精确计算激活额叶皮层、顶叶皮层、前额叶皮层等(Arsalidou et al., 2018; Czarnecka & Rączy et al., 2023; Harvey et al., 2013)。本研究结果发现, 分组和未分组条件下均激活额上回、顶内沟等估计相关脑区, 这些区域被称为视觉数形区(Grotheer et al., 2016; Skagenholt et al., 2021; Yeo et al., 2017), 表明分组和未分组条件下被试均能运用估计策略进行数量感知。

分组化产生数量感知的成绩更好原因可能是被试在分组条件下运用了计算和事实提取策略(Pan et al., 2021; Maldonado et al., 2021; Ciccione & Dehaene, 2020)。例如, Pan 等(2021)发现数量感知中分组条件比未分组条件感知精度更高, 且 6、9、12 和 16 这 4 个数值格外明显。对此, 研究者推测这几个特殊数值容易让被试运用加法或乘法计算进行数量感知(如, $3+3=6$ 、 $3\times 3=9$), 因此比其相邻的数值具有更强的分组化效应。Ciccione 等(2020)的研究结果也相似, 认为合数(除 1 和本身外还能被其他自然数整除的数)的分组化效应更强是因为对于这些数值被试能更直接地运用心算或提取策略

表 6 以 L-ITG 为种子点外部分组线索强于内部分组线索的功能连接情况

种子点	目标区域	体素数量	MNI 坐标			t 值
			x	y	z	
左侧颞下回	左侧顶内沟	132	-33	-65	32	6.35
	左侧舌回	169	-42	-45	18	8.52
	左侧额上回	256	-36	43	10	5.32
	左侧颞下回	152	-52	-64	-18	6.35
	右侧颞下回	53	54	-58	-14	5.65

注: 校正阈值为体素水平(voxel level)未校正, $p < 0.001$, 团块水平(cluster level) FDR 校正, $p < 0.05$ 。

(如, 回忆乘法口诀表或简单加法计算)。一些 fMRI 的研究结果也发现被试只在进行事实提取任务时, 左侧前额叶和顶叶皮层的激活程度更高, 但在同时操作精确计算和事实提取任务时, 左侧角回和顶内沟的激活更强(Maldonado et al., 2021; Wang et al., 2022; Zhang et al., 2023)。本研究结果表明, 分组条件额外激活了左侧顶内沟、角回和额上回等与计算相关的脑区, 说明分组条件下被试能运用计算和事实提取策略进行更高水平的数量表征。因此, 分组化这种数量感知策略能让被试的加工过程更高效。

组织散乱的视觉元素需考虑元素整体性。根据拓扑知觉理论观点, 拓扑属性(Topological properties)是知觉物体的起点, 并在各种变换条件下拓扑属性能保持整体属性不变, 且这种不变性可通过拓扑不变量(Topological invariant)解释(Chen, 1982; 朱滢, 2005)。其中, 连通性和封闭性是拓扑不变量的示例。也就是说在拓扑变换下, 如果一个空间或图形是连通的, 那么任意两个点之间都可通过路径相连, 物体内部的连接性质保持不变; 同样, 无论物体形状如何变化, 只要其内部形成封闭区域或共同空间, 那么封闭性的特性不会改变。例如, 一根橡皮圈无论如何拉伸、挤压或扭曲, 只要没有被切断或穿过, 其整体性不变, 因为橡皮圈两端连在一起形成一个封闭的环(Chen, 1982; 陈霖, 2017; 朱滢, 2005)。因此, 连通性和封闭性是视知觉中具有重要意义的拓扑特征。研究发现, 腹侧颞叶皮层、额回、顶内沟等是拓扑性质的关键脑区(Cao et al., 2014; He et al., 2015; Kluth & Zetsche, 2016; Zhou et al., 2010)。本研究结果发现, 内部和外部分组线索共同激活了大脑双侧顶内沟和角回, 表明两种线索条件下被试均会使用分组化这种策略, 并激活与估计和计算相关的脑区。此外, 外部分组线索比内部分组线索额外激活了额中回、额下回及颞下回等与拓扑属性相关的脑区, 这进一步证明了外部分组线索的内部机制是拓扑不变量。

神经科学领域的研究发现脑区有着偏侧化优势, 即大脑左半球更倾向于处理整体性信息, 如物体整体形状、轮廓和空间布局等, 右半球更擅长处理局部特征, 如物体细节、边缘和结构等(He, 2008; Kragel et al., 2021; Wang et al., 2007)。也有研究结果支持了左半球在加工拓扑属性上具有优势。Wang 等(2007)发现人脑左半球在加工拓扑整体属性上更有优势, 左侧额叶和颞叶皮层对整体拓扑信息加工比右侧更活跃。He (2008)的研究表明左半球对物体

整体形态和拓扑特征更敏感, 处理拓扑差异时比右半球更快、更准。这种优势在视觉任务中普遍存在, 与任务难度无关, 但左半球颞叶皮层与拓扑属性有关。本研究结果显示, 外部分组线索呈现出大脑左侧偏侧化的优势, 表现在左侧额中回和颞下回的功能连接显著增加, 表明外部分组线索的内部机制是拓扑不变量。此外, 本研究结果还发现分组条件也有左侧偏侧化优势, 说明分组条件下被试能运用更高级的计算策略进行数量感知。这与已有研究结果一致, 左半球在算术中扮演重要角色, 计算过程激活了左侧顶叶内沟、角回、前额叶皮层、双侧颞下回和颞中回、扣带回和岛叶等(Maldonado et al., 2021; Polspoel et al., 2017; Tschentscher & Hauk, 2014)。

总之, 本研究创新采用内部和外部两种不同分组线索对数量感知分组化策略影响进行了探讨, 补充了分组化策略神经机制研究的证据。值得注意的是, 本研究着重探讨外部分组线索在数量感知领域的神经机制, 弥补了先前研究仅关注内部分组线索的不足, 丰富对数量感知分组化策略的理解, 为未来相关研究提供了新思路 and 方向。当然, 本研究也存在着不足。首先, 研究采用的是数量估计任务考察数量感知的分组化策略。虽然数量估计任务在先前研究中已得到广泛运用, 但基于核磁实验的局限性, 本研究仅选取了 4 个数值。未来研究可采用数量辨别任务, 并选择更广的数值范围, 以深入探究不同数值范围在数量感知分组化策略神经机制的差异。此外, 数量感知本身涉及多个认知过程, 对于精确解释其中某个子过程尚存挑战。在未来的研究中可对分组化策略的变量进行直接操纵。另外, 研究仅在空间维度上展开, 而根据 Walsh 等(2003)的量级理论, 时间、空间和数量之间并不是单向关系, 而是互补的概念, 三者共享相同的神经机制和大脑区域, 且有研究在行为层面上证明了时间维度也存在分组化效应, 未来的研究可进一步以时间维度为切入点, 系统探讨不同维度下数量感知分组化策略神经机制的异同。最后, 皮亚杰曾提出“拓扑首位理论”用于解释儿童空间概念的发展。该理论认为儿童的空间概念发展顺序是先拓扑学, 然后是欧几里得几何和投影几何。未来的研究可选择儿童作为被试(尤其是数学学习困难儿童), 考察儿童在数量感知领域是否存在类似“拓扑优先”的发展模式, 对于数学学习困难儿童, 可以探讨不同分组线索是否能改善其数量感知, 为理解数量感知的认知机制

和高效率学习的实施提供科学依据。

5 结论

在本研究条件下,得出如下结论:(1)大脑双侧顶内沟是数量感知关键脑区;(2)分组和未分组条件都激活了大脑皮层与数量估计相关的脑区,如额回、颞下回等,强调了这些脑区在数量估计任务中的重要性;(3)分组化策略激活了大脑额上回、顶内沟、角回等计算相关脑区,且呈现出左侧半球偏侧化优势,表明分组条件下被试倾向于使用计算和提取策略以提高数量感知的效率;(4)内部和外部分组线索均激活了顶内沟和角回等数量加工核心脑区,而外部分组线索比内部分组线索在额中回和颞下回等脑区激活更强,揭示外部分组线索在数量感知分组化策略中的内部机制具有拓扑不变量的特性,在数量感知和信息加工中具有优先性。

参 考 文 献

- Anobile, G., Castaldi, E., Maldonado Moscoso, P. A., Arrighi, R., & Burr, D. (2021). Groupitizing improves estimation of numerosity of auditory sequences. *Frontiers in Human Neuroscience, 15*, 687321. <http://doi.org/10.3389/fnhum.2021.687321>
- Anobile, G., Castaldi, E., Moscoso, P. A. M., Burr, D. C., & Arrighi, R. (2020). "Groupitizing": A strategy for numerosity estimation. *Scientific Reports, 10*(1), 13436. <http://doi.org/10.1038/s41598-020-68.111-1>
- Arsalidou, M., Pawliw-Levac, M., Sadeghi, M., & Pascual-Leone, J. (2018). Brain areas associated with numbers and calculations in children: Meta-analyses of fMRI studies. *Developmental Cognitive Neuroscience, 30*, 239–250. <http://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.08.002>
- Burr, D., & Ross, J. (2008). A visual sense of number. *Current Biology, 18*(6), 425–428. <http://doi.org/10.1016/j.cub.2008.02.052>
- Cai, Y., Hofstetter, S., Harvey, B. M., & Dumoulin, S. O. (2022). Attention drives human numerosity-selective responses. *Cell Reports, 39*(13), 111005. <http://doi.org/10.1016/j.celrep.2022.111005>
- Cai, Y., Hofstetter, S., van Dijk, J., Zuiderbaan, W., van der Zwaag, W., Harvey, B. M., & Dumoulin, S. O. (2021). Topographic numerosity maps cover subitizing and estimation ranges. *Nature Communications, 12*(1), 3374. <http://doi.org/10.1038/s41467-021-23785-7>
- Cao, M., Wang, J., Dai, Z., Cao, X., Jiang, L., Fan, F., ... He, Y. (2014). Topological organization of the human brain functional connectome across the lifespan. *Developmental Cognitive Neuroscience, 7*, 76–93. <http://doi.org/10.1016/j.dcn.2013.11.004>
- Caponi, C., Maldonado, M. P., Castaldi, E., Arrighi, R., & Grasso, P. A. (2023). EEG signature of grouping strategies in numerosity perception. *Frontiers in Neuroscience, 17*, 1190317. <http://doi.org/10.3389/fnins.2023.1190317>
- Chen, L. (1982). Topological structure in visual perception. *Science, 218*, 699–700. <http://doi.org/10.1126/science.7134969>
- Chen, L. (2017). The three cornerstones of cognitive science. *Fundamental Research, 31*(3), 209–210. <http://10.16262/j.cnki.1000-8217.2017.03.001>
- [陈霖. (2017). 认知科学的三大基石. *中国科学基金, 31*(3), 209–210.]
- Cicchini, G. M., Anobile, G., Burr, D. C., Marchesini, P., & Arrighi, R. (2023). The role of non-numerical information in the perception of temporal numerosity. *Frontiers in Psychology, 14*, 1197064. <http://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1197064>
- Ciccione, L., & Dehaene, S. (2020). Grouping mechanisms in numerosity perception. *Open Mind, 4*, 102–118. http://doi.org/10.1162/opmi_a_00037
- Czarnecka, M., Raczy, K., Szewczyk, J., Paplinska, M., Jednorog, K., Marchewka, A., ... Szwed, M. (2023). Overlapping but separate number representations in the intraparietal sulcus-Probing format- and modality-independence in sighted Braille readers. *Cortex, 162*, 65–80. <http://doi.org/10.1016/j.cortex.2023.01.011>
- Dehaene, S., & Changeux, J. (1993). Development of elementary numerical abilities: A neuronal model. *Journal of Cognitive Neuroscience, 5*, 390–407. <http://doi.org/10.1162/jocn.1993.5.4.390>
- Fornaciai, M., & Park, J. (2018). Early numerosity encoding in visual cortex is not sufficient for the representation of numerical magnitude. *Journal of Cognitive Neuroscience, 30*(12), 1788–1802. http://doi.org/10.1162/jocn_a_01320
- Grasso, P. A., Anobile, G., Arrighi, R., Burr, D. C., & Cicchini, G. M. (2022). Numerosity perception is tuned to salient environmental features. *iScience, 25*(4), 104104. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104104>
- Grotheer, M., Herrmann, K., & Kovács, G. (2016). Neuroimaging evidence of a bilateral representation for visually presented numbers. *The Journal of Neuroscience, 36*(1), 88–97. <http://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2129-15.2016>
- Guillaume, M., Roy, E., Van Rinsveld, A., Starkey, G., Uncapher, M., & Mccandliss, B. (2022). Groupitizing reflects conceptual developments in math cognition and inequities in math achievement from childhood through adolescence. *Child Development, 94*(2), 335–347. <http://doi.org/10.1111/cdev.13859>
- Harvey, B. M., Klein, B. P., Petridou, N., & Dumoulin, S. O. (2013). Topographic representation of numerosity in the human parietal cortex. *Science, 341*(6150), 1123–1126. <http://doi.org/10.1126/science.1239052>
- He, L., Zhang, J., Zhou, T., & Chen, L. (2009). Connectedness affects dot numerosity judgment: Implications for configural processing. *Psychonomic Bulletin & Review, 16*(3), 509–517. <http://doi.org/10.3758/PBR.16.3.509>
- He, L., Zhou, K., Zhou, T., He, S., & Chen, L. (2015). Topology-defined units in numerosity perception. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 112*(41), E5647–E5655. <http://doi.org/10.1073/pnas.1512408112>
- He, S. (2008). Holes, objects, and the left hemisphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 105*(4), 1103–1104. <http://doi.org/10.1073/pnas.0710631105>
- Kluth, T., & Zetzsche, C. (2016). Numerosity as a topological invariant. *Journal of Vision, 16*(3), 30. <http://doi.org/10.1167/16.3.30>
- Kragel, P., Čeko, M., Theriault, J., Chen, D., Satpute, A., Wald, L., ... Wager, T. (2021). A human colliculus-pulvinar-amygdala pathway encodes negative emotion. *Neuron,*

- 109(15), 2404–2412. <http://doi.org/10.1016/j.neuron.2021.06.001>
- Lan, Z., & Chen, L. (1998). An topological perception approach to the study of hemispheric asymmetry. *Journal of Psychological Science*, (3), 205–208. <http://10.16719/j.cnki.1671-6981.1998.03.004>
- [兰哲, 陈霖. (1998). 拓扑性质知觉的大脑半球功能不对称性研究. *心理科学*, (3), 205–208.]
- Liu, W., Zhang, Z., & Zhao, Y. (2012). Numerosity adaptation effect on the basis of perceived numerosity. *Acta Psychologica Sinica*, 44(10), 1297–1308.
- [刘炜, 张智君, 赵亚军. (2012). 基于数量感知的数量适应. *心理学报*, 44(10), 1297–1308.]
- Luna, D., Villalba-Garcia, C., Montoro, P. R., & Hinojosa, J. A. (2016). Dominance dynamics of competition between intrinsic and extrinsic grouping cues. *Acta Psychologica*, 170, 146–154. <http://doi.org/10.1016/j.actpsy.2016.07.001>
- Luna, D., & Montoro, P. R. (2011). Interactions between intrinsic principles of similarity and proximity and extrinsic principle of common region in visual perception. *Perception*, 40(12), 1467–1477. <http://doi.org/10.1068/p7086>
- Maldonado Moscoso, P. A., Castaldi, E., Burr, D. C., Arrighi, R., & Anobile, G. (2020). Grouping strategies in number estimation extend the subitizing range. *Scientific Reports*, 10, 14979. <http://doi.org/10.1038/s41598-020-71871-5>
- Maldonado, M. P., Greenlee, M. W., Anobile, G., Arrighi, R., Burr, D. C., & Castaldi, E. (2021). Groupitizing modifies neural coding of numerosity. *Human Brain Mapping*, 43, 915–928. <http://doi.org/10.1002/hbm.25694>
- Malone, S. A., Pritchard, V. E., Heron-Delaney, M., Burgoyne, K., Lervåg, A., & Hulme, C. (2019). The relationship between numerosity discrimination and arithmetic skill reflects the approximate number system and cannot be explained by inhibitory control. *Journal of Experimental Child Psychology*, 184, 220–231. <http://doi.org/10.1016/j.jecp.2019.02.009>
- Montoro, P. R., Villalba-García, C., Luna, D., & Hinojosa, J. A. (2017). Common region wins the competition between extrinsic grouping cues: Evidence from a task without explicit attention to grouping. *Psychonomic Bulletin & Review*, 24(6), 1856–1861. <http://doi.org/10.3758/s13423-017-1254-3>
- Palmer, S. E. (1992). Common region: A new principle of perceptual grouping. *Cognitive Psychology*, 24(3), 436–447.
- Palmer, S. E., & Beck, D. M. (2007). The repetition discrimination task: An objective method for studying perceptual grouping. *Perception & Psychophysics*, 69(1), 68–78.
- Palmer, S., & Rock, I. (1994). Rethinking perceptual organization: The role of uniform connectedness. *Psychonomic Bulletin Review*, 1, 29–55. <http://doi.org/10.3758/BF03200760>
- Pan, Y., Yang, H., Li, M., Zhang, J., & Cui, L. (2021). Grouping strategies in numerosity perception between intrinsic and extrinsic grouping cues. *Scientific Reports*, 11(1), 17605. <http://doi.org/10.1038/s41598-021-96944-x>
- Pennock, I. M. L., Schmidt, T. T., Zorbek, D., & Blankenburg, F. (2021). Representation of visual numerosity information during working memory in humans: An fMRI decoding study. *Human Brain Mapping*, 42(9), 2778–2789. <http://doi.org/10.1002/hbm.25402>
- Piazza, M., Mechelli, A., Butterworth, B., & Price, C. J. (2002). Are subitizing and counting implemented as separate or functionally overlapping processes? *Neuroimage*, 15(2), 435–446. <http://doi.org/10.1006/nimg.2001.0980>
- Piazza, M., & Izard, V. (2009). How humans count: Numerosity and the parietal cortex. *Neuroscientist*, 15(3), 261–273. <http://doi.org/10.1177/1073858409333073>
- Polspoel, B., Peters, L., Vandermosten, M., & De Smedt, B. (2017). Strategy over operation: Neural activation in subtraction and multiplication during fact retrieval and procedural strategy use in children. *Human Brain Mapping*, 38(9), 4657–4670. <http://doi.org/10.1002/hbm.23691>
- Simon, T., & Vaishnavi, S. (1996). Subitizing and counting depend on different attentional mechanisms: Evidence from visual enumeration in afterimages. *Perception & Psychophysics*, 58(6), 915–926. <http://doi.org/10.3758/BF03205493>
- Skagenholt, M., Skagerlund, K., & Träff, U. (2021). Neurodevelopmental differences in child and adult number processing: An fMRI-based validation of the triple code model. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 48, 100933. <http://doi.org/10.1016/j.dcn.2021.100933>
- Starkey, G. S., & McCandliss, B. D. (2014). The emergence of “groupitizing” in children’s numerical cognition. *Journal of Experimental Child Psychology*, 126, 120–137. <http://doi.org/10.1016/j.jecp.2014.03.006>
- Tschentscher, N., & Hauk, O. (2014). How are things adding up? Neural differences between arithmetic operations are due to general problem solving strategies. *Neuroimage*, 92, 369–380. <http://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.01.061>
- Tsouli, A., Harvey, B. M., Hofstetter, S., Cai, Y., van der Smagt, M. J., Te, P. S., & Dumoulin, S. O. (2022). The role of neural tuning in quantity perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 26(1), 11–24. <http://doi.org/10.1016/j.tics.2021.10.004>
- Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(11), 483–488. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.09.002>
- Wang, B., Zhou, T. G., Zhuo, Y., & Chen, L. (2007). Global topological dominance in the left hemisphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(52), 21014–21019. <http://doi.org/10.1073/pnas.0709664104>
- Wang, L., Li, M., Yang, T., Wang, L., & Zhou, X. (2022). Mathematics meets science in the brain. *Cerebral Cortex*, 32(1), 123–136. <http://doi.org/10.1093/cercor/bhab198>
- Wang, W., Zhou, T., Chen, L., & Huang, Y. (2023). A subcortical magnocellular pathway is responsible for the fast processing of topological properties of objects: A transcranial magnetic stimulation study. *Human Brain Mapping*, 44(4), 1617–1628. <http://doi.org/10.1002/hbm.26162>
- Wege, T., Trezise, K., & Inglis, M. (2021). Finding the subitizing in groupitizing: Evidence for parallel subitizing of dots and groups in grouped arrays. *Psychonomic Bulletin & Review*, 29. <http://doi.org/10.3758/s13423-021-02015-7>
- Whalen, J., Gallistel, C. R., & Gelman, R. (2016). Nonverbal counting in humans: The psychophysics of number representation. *Psychological Science*, 10(2), 130–137. <http://doi.org/10.1111/1467-9280.00120>
- Wurm, M. F., Tagliabue, C. F., & Mazza, V. (2021). Decoding location-specific and location-invariant stages of numerosity processing in subitizing. *European Journal of Neuroscience*, 54(3), 4971–4984. <http://doi.org/10.1111/ejn.15352>
- Yeo, D., Wilkey, E., & Price, G. (2017). The search for the number form area: A functional neuroimaging meta-

- analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 78, 145–160. <http://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.04.027>
- Zhang, D., Zhou, L., Yang, A., Li, S., Chang, C., Liu, J., & Zhou, K. (2023). A connectome-based neuromarker of nonverbal number acuity and arithmetic skills. *Cerebral Cortex*, 33(3), 881–894. <http://doi.org/10.1093/cercor/bhac108>
- Zhou, K., Luo, H., Zhou, T., Zhuo, Y., & Chen, L. (2010). Topological change disturbs object continuity in attentive tracking. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(50), 21920–21924. <http://doi.org/10.1073/pnas.1010919108>
- Zhu, Y. (2005). Chen Lin's theory of topological perception. *Journal of Psychological Science*, 28(5), 1031–1034. <http://10.16719/j.cnki.1671-6981.2005.05.002>
- [朱滢. (2005). 陈霖的拓扑性质知觉理论. *心理科学*, 28(5), 1031–1034.]

The influence of intrinsic and extrinsic grouping cues on numerosity perception of groupitizing: Evidence from fMRI

PAN Yun^{1,2}, YANG Huanyu^{1,3}, JIA Liangzhi¹, ZHU Jun¹, YU Fangwen¹, ZHANG Di¹, YANG Ping¹

(¹ School of Psychology, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China) (² Guizhou Education University, Guiyang 550018, China)

(³ School of Education, Yunnan Minzu University, Kunming 650031, China)

Abstract

Numerosity perception refers to the human cognitive ability to extract numerical information from various stimuli. It serves as a fundamental basis for understanding the world and processing information, thereby guiding and influencing human behavior and decision-making. Grouping strategies, also known as "groupitizing," involve organizing objects into sets or categories during numerosity perception processes. This facilitates a rapid and effective numerosity estimation, particularly in situations with short presentation times and numerous quantities. Groupitizing combines the advantages of subitizing and counting, thereby influencing individual arithmetic abilities. Previous studies have predominantly focused on investigating the groupitizing of numerosity perception based on intrinsic grouping cues. However, the influence of both intrinsic and extrinsic cues of perceptual grouping on numerosity perception during groupitizing remains underexplored. Previous studies spanning the visual and numerosity perception domains have consistently indicated that extrinsic grouping cues exhibit stronger grouping advantages than intrinsic ones. Therefore, this study employed a numerosity estimation task to separately examine the effects of intrinsic (such as color similarity and proximity) and extrinsic grouping cues (including common region and connectedness) on numerosity perception during groupitizing. This study aimed to uncover the neural mechanisms underlying groupitizing.

A total of 21 university students were recruited for this study. A block design was employed for the functional magnetic resonance imaging (fMRI) task. Stimulus presentation and generation were performed using MATLAB's PsychToolbox (version R2016b). The stimuli comprised four factors: grouping condition (grouping, no-grouping), grouping cues (extrinsic, intrinsic), and numerosity (6, 9, 12, 16). MRI scans for the numerosity estimation task were conducted using Siemens 3.0 T technology, synchronously collecting functional brain data. The participants were instructed to select the corresponding number of points they estimated based on the stimuli presented on the screen. We compared functional activation between grouping and no-grouping conditions, as well as between extrinsic and intrinsic grouping cues. Additionally, we employed the Pearson product-moment correlation method to assess the relationships between these variables.

The results revealed that first, bilateral intraparietal sulcus (IPS) plays a critical role in numerosity perception, particularly showing significant activation during the quantity processing stage. Specifically, activation was observed in the IPS during numerosity perception tasks, indicating its involvement in processing numerical information. Second, both grouped and ungrouped conditions activated cortical regions associated with quantity estimation, such as the precentral gyrus and inferior temporal gyrus. Under the grouped condition, additional activation was observed in brain regions related to computation; this includes the superior frontal gyrus, IPS, and angular gyrus, exhibiting a left-hemisphere lateralization advantage. Thus, participants tended to utilize computational and retrieval strategies in the grouped condition compared to that in the ungrouped

condition, suggesting a more efficient processing mechanism. Lastly, extrinsic grouping cues, relative to intrinsic grouping cues, activate additional brain regions associated with topological properties, such as the middle frontal and inferior temporal gyrus. This reveals the topological invariance characteristic of extrinsic grouping cues in the intrinsic mechanism of numerosity perception grouping strategies, highlighting the influence of extrinsic cues on neural processing mechanisms.

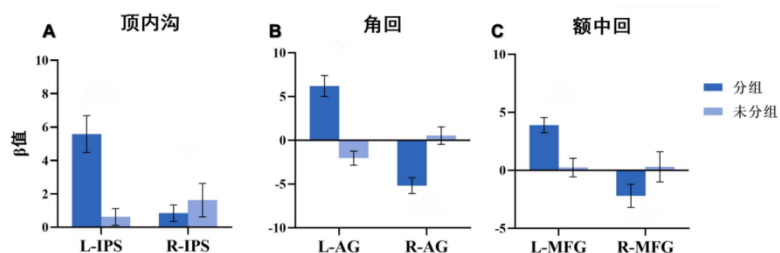
This study's findings suggest that participants tended to rely more on mental arithmetic and factual retrieval when employing grouping strategies to enhance numerosity perception efficiency. This sheds further light on why grouping strategies are comparatively more efficient than other approaches. Moreover, the mechanism of extrinsic grouping cues in numerosity perception strategies demonstrates topological invariance, which presents a unique advantage in perceptual processing. This discovery provides direct neural evidence of the significance of topological properties in numerosity perception, thereby deepening our understanding of numerosity perception and its neural underpinnings.

Keywords numerosity perception, groupitizing, grouping cues, topological perception theory, fMRI

附录：ROI 分析

1. 分组条件结果

以分组和未分组条件中激活 cluster 的峰值点坐标为中心, 创建以 6 mm 半径为范围的球形 ROI, 使用 Rex 插件提取每名被试在两种分组条件下顶内沟、角回计算相关脑区的 ROI 平均信号值。附图 1A-C 是在全脑分析中显著脑区内左半球和右半球每种条件 Beta 值的平均信号值。统计分析表明, 左侧顶内沟分组条件比未分组条件有显著的正向激活; 左侧角回分组条件比未分组条件有显著正向激活, 右侧角回分组条件比未分组条件有显著负向激活; 左侧额中回分组条件和未分组条件有显著正向激活。

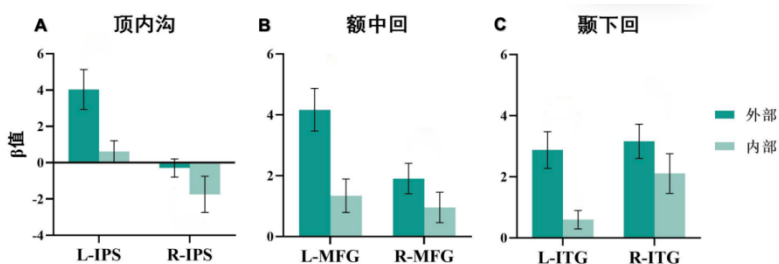


附图 1 分组条件 ROI 分析结果

注: L-IPS 表示左侧顶内沟, R-IPS 表示右侧顶内沟, L-AG 表示左侧角回, R-AG 表示右侧角回, L-MFG 表示左侧额中回, R-MFG 表示右侧额中回。

2. 分组线索结果

以内部和外部分组线索中激活 cluster 的峰值点坐标为中心, 创建以 6 mm 半径为范围的球形 ROI, 使用 Rex 插件提取每名被试在两种分组线索下顶内沟、额中回和颞下回拓扑性质相关脑区的 ROI 平均信号值。附图 2A-C 是在全脑分析中显著脑区内左半球和右半球每种条件 Beta 值的平均信号值。左侧顶内沟外部分组线索比内部分组线索有显著的正向激活; 左侧额中回外部分组线索比内部分组线索有显著正向激活; 左侧颞下回外部分组线索比内部分组线索有显著正向激活。



附图 2 分组线索下的 ROI 分析结果

注: *L-IPS 表示左侧顶内沟, R-IPS 表示右侧顶内沟, L-MFG 表示左侧额中回, R-MFG 表示右侧额中回, L-ITG 表示左侧颞下回, R-ITG 表示右侧颞下回。