

• 研究构想(Conceptual Framework) •

数量感知分组化策略的认知机制及神经基础*

潘 运^{2,3} 杨环瑜^{1,2} 朱 俊² 贾良智²

(¹ 云南民族大学教育学院, 昆明 650504) (² 贵州师范大学心理学院, 贵阳 550025)
(³ 贵州师范学院, 贵阳 550018)

摘 要 分组化作为数量感知重要策略之一, 具有感数和计数的特征, 影响个体的算术能力。尽管已有研究表明知觉分组与数量感知有着密切的联系, 但多从空间或时间各自单向关系考察数量感知的分组化现象, 忽视了知觉分组的内外部线索以及共享相同量级系统的空间、时间和运动维度在数量感知分组化策略中产生的作用, 且分组化策略的心理-生理机制迄今尚不清楚。在前期研究基础上, 本研究以知觉分组为切入点, 拟综合采用行为测量、ERP、fMRI 等技术, 系统探讨不同量级系统维度对数量感知分组化策略影响的认知机制及神经基础, 深入揭示知觉分组在数量感知分组化形成中的作用, 以期更系统地回答数量感知分组化策略的实质及其心理-生理机制, 为实现高效率数学学习提供依据。

关键词 数量感知, 分组化策略, 分组线索, 量级理论, 功能磁共振成像

分类号 B842

1 研究意义

人们每天生活、学习和工作都离不开数字, 无时无刻需要对符号或非符号数量信息进行表征和处理。那么, 人们是如何对数量信息进行感知的? 数量信息感知受到哪些因素的影响? 这些问题一直以来都是研究者关注的热点(Dehaene et al., 1998; 刘炜 等, 2012; Piazza & Izard, 2009; Soltész et al., 2010; Starkey & McCandliss, 2014; 徐继红, 2010; 张真, 苏彦捷, 2007; 戴隆农, 潘运, 2021)。大量研究表明, 除了感数、计数和估计外, 分组化是数量感知的一种重要策略(Anobile, et al., 2021b; Anobile et al., 2020a; Ciccione & Dehaene, 2020; Guillaume et al., 2022; Pan et al., 2021; Wender & Rothkegel, 2000)。揭示分组化策略在数量感知中的作用, 有助于理解数量感知认知机制的本质, 也能够为已有与数量感知有关的数字加工理论提供实证依据。

近年来, 研究者从分组化策略的角度揭示了数量感知的认知机制(Dehaene et al., 1998; Piazza & Izard, 2009; Soltész et al., 2010; Starkey & Mccandliss, 2014)。然而, 这些研究忽视了知觉分组的内外部分组线索自身所具有的不同属性可能会对数量感知分组化产生的影响。例如, 以往研究多从内部分组线索(如, 邻近性、颜色相似性)角度探讨分组化策略(Anobile et al., 2020a; Ciccione & Dehaene, 2020), 较少通过直接比较内外部分组线索所引发的分组效应强度来解释对数量感知分组化策略的作用(Pan et al., 2021)。既然两种知觉分组线索在性质上有着明显差别, 那么通过直接比较内外部分组线索产生的效应就可以揭示它们在数量感知分组化策略产生过程中的作用。近年来, 研究者从分组化策略的角度揭示了数量感知的认知机制(Dehaene et al., 1998; Piazza & Izard, 2009; Soltész et al., 2010; Starkey & Mccandliss, 2014)。然而, 这些研究忽视了知觉分组的内外部分组线索自身所具有的不同属性可能会对数量感知分组化产生的影响。例如, 已有研究多从内部分组线索(如邻近性、颜色相似性)角度探讨分组化策略(Anobile et al., 2020a; Ciccione & Dehaene,

收稿日期: 2024-08-01

* 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(22JJD10009)资助。

通信作者: 杨环瑜, E-mail: 1320961328@qq.com

2020), 而较少通过直接比较内外部分组线索所引发的分组效应强度来解释对数量感知分组化策略的作用(Pan et al., 2021)。Palmer (1992)将知觉分组分为内部分组原则和外部分组原则。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(Palmer, 1992; Palmer & Rock, 1994)。与内部分组原则不同, 外部分组原则是基于拓扑性质中的连通性和封闭性(He et al., 2009; He et al., 2015; Palmer, 1992; Palmer & Rock, 1994)。因此, 外部分组线索的机制可能与拓扑性质有关, 可借助拓扑知觉理论来解释(兰哲, 陈霖, 1998; 朱滢, 2005)。既然两种知觉分组线索在性质上有着明显差别, 那么通过直接比较内外部分组线索产生的效应就可以揭示它们在数量感知分组化策略中的作用。

尤为重要的是, 研究数量感知是复杂的。虽然已有研究探讨了数量感知分组化策略的认知机制, 但多基于空间分布角度(Ciccione & Dehaene, 2020; Maldonado Moscoso et al., 2020; Starkey & McCandliss, 2014; Wege et al., 2021), 忽略了数量可能与其他知觉因素之间的相互联系。量级理论(A theory of magnitude, ATOM)认为, 数量与时间、空间是互补概念, 它们共享相同的量级系统, 顶叶皮层是整个系统的核心脑区(Walsh, 2003)。如果数量感知的潜在加工机制确实依赖于相同的量级系统, 那么通过系统操作时间顺序这一变量可能会导致数量感知分组化策略发生变化。另外, 探讨数量感知与运动适应之间存在的联系也是值得关注的一个重要领域。但迄今直接探讨本体感觉运动条件下运动适应后对知觉分组和未分组数量感知影响的研究较少, 且对被动观看运动(如, 看运动的点)条件下数量感知分组化策略的认知机制迄今也尚无研究深入探讨: 本体感觉和被动观看运动是如何影响运动适应后对数量感知分组化策略的问题迄今尚不清楚。为此, 本研究将从以下几个方面推动相关研究领域的进展。首先, 以数量点阵估计为任务, 考察空间维度条件下内部和外部分组线索对数量感知分组化策略的影响; 其次, 通过系统比较两种刺激起始间隔(Stimulus onset asynchrony, SOA), 考察时间维度条件下内部和外部分组线索对数量感知分组化策略的影响; 最后, 通过让被试分别适应高频或低频手指敲击

任务后完成随机呈现的数量点阵估计任务, 以及被试被动观看并分别适应高速或低速运动的数量点阵后, 考察本体感觉运动和被动观看运动在数量感知分组化策略中的作用机制。

总之, 本研究拟从量级理论的空间、时间和运动角度, 以知觉分组为切入点, 综合采用行为、ERP 和 fMRI 等多种手段, 考察数量感知分组化策略的心理-生理反应, 系统探讨不同量级系统维度对数量感知分组化策略影响的认知机制及神经基础, 深入揭示知觉线索在数量感知分组化形成中的作用, 为理解数量感知分组化策略的实质和实现高效率数学学习提供依据。

2 国内外研究现状评述

2.1 数量感知的加工策略

当前, 研究者关于数量感知的认知机制探讨主要聚焦在其策略加工上。这些策略包括: 一是感数(subitizing), 即在加工具体的数量任务中, 要求被试报告目标物体数目时, 列出 4 个以内的物体是既准确又迅速的(Maldonado Moscoso et al., 2020; Piazza et al., 2002)。二是计数(counting), 即当要求被试报告对 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(Cheng et al., 2021; Piazza & Izard, 2009; Revkin et al., 2008)。感数与计数是普遍存在的现象, 已在动物、婴儿及成人上被证实(Dehaene et al., 1998)。三是估计(estimation), 即当物体数量较多且被试又没有足够时间进行计数时, 就需要使用这种策略对物体数量进行快速加工, 但通常结果是近似和模糊的(Revkin et al., 2008)。比较上述这三种策略可发现它们之间的一些特点, 如在加工范围上, 感数是较小的数量(小于等于 4), 而计数和估计则是较大数量(大于 4); 在加工时间上, 感数和估计是快速的, 而计数则比较慢, 且反应时随数量增加而增加; 在加工准确性上, 感数和计数较为精确, 而估计则较为模糊。

除了上述三种策略, 数量感知还存在一种重要策略, 即分组化(groupitizing), 是在数量感知任务中, 被试会表现出对视觉上分组的数组比未分组的数组加工更快、更准的现象(Maldonado et al., 2021; Starkey & McCandliss, 2014)。在数量感知过程中如果人们将大数值集合的项目数分为较小集合, 那么对大集合分成的子组进行估计比对未分

组的大集合更快、更准确,就好像同时对多个感数范围内的小集合进行了估计(Anobile et al., 2021b; Ciccione & Dehaene, 2020; Starkey & McCandliss, 2014)。分组化取决于个体感数和计算能力,不仅能增加感数范围,促进小数字构成大数字概念的理解,还可以让被试在分组化过程中使用快速简单的心算加法和乘法(Anobile et al., 2020a, 2021b; Ciccione & Dehaene, 2020; Wender & Rothkegel, 2000; Wege et al., 2021)。

自从 Starkey 和 McCandliss 等(2014)提出数量感知分组化策略以来,该策略已成为数量感知研究的突出领域。例如, 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。分组化策略的使用可以帮助学龄儿童算术能力平行发展(Starkey & McCandliss, 2014)。Guillaume 等(2022)的研究表明分组化可预测小学生的数学成绩水平,且各年级小学生均可表现出分组化策略的优势。分组化策略还和个体数学水平相关,例如 Maldonado Moscoso 等(2020)发现分组化是一种基于注意的加工,且算术能力强的个体更能够从分组中获益,当呈现可分组刺激时,被试会自动将列阵中的项目分解成可感数组,然后运用简单心算进行数量加工。分组化策略不仅表现在空间分布上,也出现在时间序列中。如 Anobile 等(2020a)发现在视觉上呈现颜色相同的闪光序列(未分组条件)时,被试的估计误差均遵守韦伯定律,表明被试并未对序列呈现的数组进行计数,而是近似估计数量。更为重要的是,被试在数量估计任务中表现出对按时间序列分组(如,两个红色、两个黄色、两个蓝色)呈现的数组比未分组数组的感知精度提高了 15%,证明在时间序列上的数量感知也存在分组化效应。

2.2 数量感知的神经基础

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。先前脑成像研究指出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 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 et al., 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。前者负责规划和执行计算任务;后者主要与注意力和空间认知密切相关,且在计数过程起重要作用。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。

2.3 数量感知与知觉分组

深入揭示数量感知分组化机制离不开知觉分组的参与。知觉分组是基于格式塔理论发展起来的。早在上个世纪 20 年代, Wertheimer 等率先开展了知觉分组的相关研究,并提出知觉分组需探讨的问题,即哪些刺激因素影响了离散元素的知觉分组。基于格式塔理论,Palmer (1992)将知觉分组原则分为内部分组原则(intrinsic grouping principles)和外部分组原则(extrinsic grouping principles)。其中,前者是基于元素属性间的内在关系进行分组,如形状、位置、颜色等。多数格式塔分组原则属于内部分组原则,如邻近性、相似性等。而后者是基于元素和其它外部元素之间关系的分组,即通过外部元素诱导元素进行分组。如当相同的元素处于相同的空间区域内时(如,共同区域),或当它们由线段连接时(如,连通性),就容易被知觉成一个整体(Luna et al., 2016; Palmer, 1992; Palmer & Rock, 1994)。研究者认为外部分组原则可构成一种新的分组原则,且其加工机制可能不同于内部分组原则(Palmer, 1992),是连通性和封闭性的拓扑性质(He et al., 2009; He et al., 2015)。元素连通性和共同区域是邻近性的特例,因为邻近性是元素和元素间的接近,元素连通性是元素和元素间相连,而共同区域是元素处于同一区域内(He et al., 2015; Wagemans et al., 2012)。

目前大量关于视觉领域知觉分组的研究表明,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)发现,被试对外部分组线索中共同区域和连通性的刺激反应比对其它分组线索的更快。Palmer 和 Beck (2007)采用重复辨别任务(repetition discrimination task)考察相互连通与未连通元素间的差异,发现被试对相互连通元素的辨别反应比未连通元素的更快。Humphreys 和 Riddoch (1993)在实验中以皮质性近视麻痹综合征(如,感知物体障碍)患者为被试考察其知觉连通性特点,发现被试在辨别点阵颜色任务条件下均无法正确区分只有一种颜色的点阵(如,全是红色或全是绿色)或是其中一半是红色一半是绿色的点阵,但如果将红色点和绿色点通过线段连接时,被试就能区分单色和双色阵列。因此,通过元素连通性将一对点连接起来,被试就能将连接的元素知觉为整体,就能同时看到两个圆;但在没有连接线的情况下,被试无法完成任务(Humphreys & Riddoch, 1993)。Hayden 等(2006)以 3~4 个月婴儿为被试考察其对一组连接(如,连接物体类似于杠铃)和未连接物体(如,未连接物体通过旋转使杠铃状物体处于未连接状态)的熟悉敏感程度,结果发现婴儿对不连接杠铃的观察时间比连接杠铃的更长,说明人类早期阶段对连接物体更加熟悉。可见,上述在视知觉领域的研究结果均表明较之于内部分组线索,外部分组线索有更强的分组优势。

2.4 数量感知与量级系统

尽管已有研究尝试揭示数量感知分组化策略的认知机制,但这些研究多是基于空间分布角度(如,同时呈现刺激)展开的。然而,在人们的日常生活、学习和工作中,对数量信息的感知并非总是同时呈现的,有时也会按时间顺序先后出现,如站在十字路口感知身边行驶而过的汽车数量、估计水池里跳出水面鱼的数目等。因此,要深入揭示数量感知分组化策略的机制不仅基于空间,也更需要从时间或其他可能存在的维度。关于数量感知与空间、时间的内在关系, Walsh (2003)提出的量级理论(a theory of magnitude, ATOM)认为,数量、空间和时间并非相互独立的概念,而是彼此补充、相互关联的整体。三者共享相同的量级系统,并通过运动维度实现紧密联系。顶叶皮层,

尤其是右后侧顶叶皮层和右侧顶内沟,被认为是处理量级信息的核心脑区,这些区域能够同时处理时间、空间和数量,为理解这些维度之间的关系提供了神经基础的证据。目前关于数量、空间和时间的共享量级系统是先天固有的,还是后天习得的还存在争论。有研究者认为量级系统并非后天习得,而是先天固有,且这种系统可促进个体行为发展。这种观点得到了灵长类动物研究结果的验证(Tudusciuc & Nieder, 2007)。但 Walsh (2003)在其研究中也指出,皮亚杰早期关于婴幼儿认知发展的研究中发现儿童无法准确区分空间和时间序列,可能是因为儿童对距离越远的物体感知时间就越长。de Hevia 等(2014)的研究结果也发现婴儿对时间、空间和数量的知觉存在量级一致性。总之,已有研究结果表明量级系统不仅能够促进相应量级概念的构建,还能使人更好适应环境,并指导个体的认知与行为。

此外, Anobile 等(2021a)在量级理论上结合数量信息是如何与运动规划和执行相结合的问题,提出了感觉运动数量系统(sensorimotor numerosity system, SNS),并认为该系统在处理内部自生运动数量时,不仅可以估计外部生成的事件数量,还可以处理空间、时间等非数字维度的定量信息(Anobile et al., 2021a)。Burr 等(2021)采用知觉适应技术的研究证明感觉运动数量系统的存在(Burr et al., 2021)。已有研究发现,数量作为一种主要的感知觉是可以被适应的(Burr & Ross, 2008),例如, Anobile 等(2021a)采用运动适应范式,要求被试用习惯手在半空中快速或慢速敲击,结果发现快速敲击会导致被试对数量的低估,而慢速则会导致高估。不仅如此,运动适应还有很强的效应,能使被试对数量估计产生约 20%~25%偏差,且这种效应是跨模态的,可存在于时间序列和空间阵列中(Anobile et al., 2021a; Maldonado Moscoso et al., 2020; Togoli et al., 2020)。同时,运动适应对数量感知的影响不仅局限于视觉中,也存在于听觉音调序列中。如先天失明成人的听觉数量感知能力同样受到运动适应的影响,表明动作和数量感知之间的相互作用独立于视觉输入而存在(Togoli et al., 2020)。还有脑成像研究结果表明数量感知过程中的脑区激活位于顶叶皮层附近,与动作的相关脑区有部分重叠,证明了数量感知

与运动之间联系的神经基础(Hubbard et al., 2005; Simon et al., 2002)。

3 问题提出

本研究基于量级理论的理论框架,以知觉分组线索为切入点,设计包含不同量级维度的感知任务,使之适用于空间、时间和运动情景,系统考察数量感知分组化策略的心理-生理反应,以及知觉分组在数量感知分组化中的认知机制和神经基础。具体探讨以下四个问题:

3.1 外部和内部分组线索的分组化效应是否有所不同

在数量感知领域,分组化策略是将一组数组分成几个子组,每个子组项目数均在感数范围内,由于人们在感知数组数量时,对于每个子组中的项目数和组数是并行加工,因此这种策略结合了感数和估计的优点,可更快更准地感知较多项目数量,也可涉及更高级的数量认知加工,如心算等(Wege et al., 2021)。分组化是 Starkey 和 McCandliss 等(2014)提出来的新的数量感知策略,已成为研究者们近期探讨数量感知认知机制的焦点和热点(Anobile et al., 2020a; Ciccione & Dehaene, 2020; Guillaume et al., 2022; Maldonado Moscoso et al., 2020)。目前的研究多基于内部分组线索来关注数量感知分组化策略的机制,如邻近性(Ciccione & Dehaene, 2020; Pan et al., 2021)和颜色相似性(Anobile et al., 2020a),视觉领域中已有大量关于知觉分组的研究发现外部分组线索比内部分组线索有更强的分组化效应(Hayden et al., 2006; Luna et al., 2016; Montoro et al., 2017; Palmer & Beck, 2007)。例如, Luna 等(2016)发现,被试对外部分组线索的反应比对其他分组线索的反应更快。Hayden 等(2006)的研究发现,婴儿早期(3~4个月大)对外部线索很敏感,尤其是共同区域和连通性。那么,在数量感知领域中,外部分组线索是否会比内部分组线索有着更强的分组化优势?目前尚缺乏实验研究系统比较空间维度下知觉分组的内部分组线索与外部分组线索对数量感知分组化效应的影响及其背后的认知机制与神经基础。因此,为了全面揭示数量感知分组化策略认知机制,有必要直接比较知觉分组的内部和外部线索数量感知的分组化效应,系统探讨数量感知分组化策略机制的本质。

3.2 时间维度上的分组化效应是否和空间维度不同

尽管有研究揭示了数量感知分组化策略的认知机制,但多是基于空间维度。目前只有较少研究从时间维度探讨了分组化策略,如 Anobile 等(2020a)在研究中采用数量估计任务考察时间维度上序列呈现刺激对数量感知分组化策略的影响,结果发现被试在分组条件下数量估计的感知精度和反应速度均比未分组条件下更高、更快。但他们的研究未深入探讨内外部分组线索的差异,且缺乏对分组化效应的进一步解释,如其神经机制及其与其他量级系统维度的关系。根据 Walsh (2003)的量级理论,数量与时间、空间是互补概念,共享相同量级系统,顶叶皮层是整个系统的核心脑区。de Hevia 等(2014)的研究也证明个体对时间、空间和数量的知觉存在量级一致性。如果数量感知的潜在加工机制确实依赖于共享相同的量级系统,该系统使得数量、时间和空间等不同维度的感知能够相互关联,那么无论 Starkey 和 McCandliss (2014)、Ciccione 和 Dehaene (2020),还是 Maldonado Moscoso 等(2020)的研究结果就还需要进一步探讨。因为在这些实验研究中,研究者所探讨的分组化策略只是基于空间维度,然而忽略了数量和时间维度之间可能会构成共同的相互联系。那么,时间维度究竟是如何影响数量感知分组化策略的呢?或者时间维度在数量感知分组化策略形成中作用的认知机制是什么呢?目前这些问题尚无答案,尤其尚无实验研究直接探讨时间维度条件下的内外部分组线索对数量感知分组化策略影响的神经基础。因此,为了全面揭示数量感知分组化策略的机制,有必要测量多种神经指标和行为指标,从行为-脑机制层次,并结合时间维度知觉分组的角度,探讨时间序列变化与数量感知分组化策略的关系。

3.3 运动维度上是否存在分组化效应

已有研究表明,人们在数量判断过程中会根据自己的生活经验进行推理,并在数量感知中参考刺激的其他非数字特征,如颜色、大小、方向等(Dehaene & Changeux, 1993; Grasso et al., 2022; Zorzi et al., 2005)。因此,对数量感知的研究不能只基于某种单一维度考虑,而是要将数字或数量与其他不同的知觉特征联系起来。前人的研究发现本体感觉运动适应会导致随后的数量估计出现

适应效应,也就是数量估计的偏差。具体来说,高频和低频运动适应会导致数量估计分别高估和低估(Anobile et al., 2016; Anobile et al., 2020b)。虽已有研究证明了数量感知与运动适应之间存在联系(Anobile et al., 2016; Anobile et al., 2021a; Burr & Ross, 2008; Burr et al., 2021; Togoli et al., 2020),然而这些结论主要基于本体感觉运动条件下数量估计的结果,缺少本体感觉运动条件下运动适应后对视觉分组和未分组数量感知估计的影响。有研究发现视觉运动同样也会诱发适应效应(Anobile et al., 2020b; Anobile et al., 2021a; Barlow & Hill, 1964; Fornaciai et al., 2018),如观看向下运动的瀑布片刻,然后看周围的物体会让物体看起来向上运动,而对视觉运动适应(如,观看运动的点)条件下数量感知分组化策略的认知机制迄今尚无研究直接探讨。到底是本体感觉运动还是视觉运动影响个体运动适应后对视觉分组和未分组数量感知的认知机制迄今尚不清楚。因此,有必要在运动维度(本体感觉运动和视觉运动)条件下考察运动适应后对视觉分组和未分组数量感知的影响。

4 研究构想

研究数量感知是复杂的,因此对其机制探讨不能只考虑单一的空间维度,还需要结合时间、运动等其他不同维度的感知觉特征。本研究将以知觉分组线索为切入点,设计包含不同量级维度的感知任务,使之适用于空间、时间和运动情景,以系统考察数量感知分组化策略的心理-生理反应,以及知觉分组在数量感知分组化策略形成中的认知机制及神经基础,为实现高效率数学学习提供依据。

具体来看,本研究首先对常见的、功能定位较为清楚的知觉分组线索类别进行分析,确认知觉分组的内部和外部线索涉及哪些基本的、普遍性的类型。在此基础上,通过操作内部分组线索和外部分组线索,以数量点阵估计为任务,考察空间维度条件下内部和外部分组线索如何影响数量感知分组化策略的认知机制及神经基础(研究 1)。其次,以按时间顺序呈现的序列刺激为材料,通过系统改变刺激起始间隔(SOAs),考察时间维度下内部分组线索和外部分组线索对数量感知分组化策略影响的行为机制和神经基础(研究 2)。最后,采用运动适应范式,通过让被试分别适应高

频或低频手指敲击任务后完成随后呈现的数量点阵估计任务,以及让被试被动观看并分别适应高速或低速运动的数量点阵后,考察本体感觉运动和被动观看运动条件下数量感知分组化策略的认知机制及神经基础(研究 3)。本研究通过分析每个被试的反应时和感知精度来衡量分组化效应。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。

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

以下将逐一介绍每个研究系列实验的简单背景及各分实验的主要内容。

4.1 研究 1: 空间维度数量感知分组化策略的认知机制及神经基础研究

研究 1 综合采用行为和 fMRI 手段,参考 Anobile 等(2020a, 2021b)的实验范式,其中行为实验以 5~17 范围内的数值点为实验材料,为了探讨数学能力对数量感知分组化策略的影响,选取数学学业水平高、中、低的大学生为被试, fMRI 实验以 6、9、12 和 16 的数值点为实验材料,被试为 18~30 岁的成年人。实验任务是数量点阵估计,通过反应时和感知精度(感知精度用变异系数 CV 衡量,即变异系数值越高,感觉噪声越多,估计就越不精确)为指标,考察空间维度条件下数量感知分组化策略的认知机制及神经基础。包括 2 个实验:实验 1 分别采用行为(实验 1A)和 fMRI 技术(实验 1B),通过系统操作内部分组线索,考察空间维度条件下的数量感知分组化策略及其认知机制及神经基础。结合已有研究(Elder et al., 2018),内部分组线索主要考虑:邻近性、颜色相似性、形状相似性。实验 2 分别采用行为技术(实验 2A)和 fMRI 技术(实验 2B),通过系统操作外部分组线索,考察空间维度条件下的数量感知分组化策略及其认知机制及神经基础。根据已有研究(Ciccione & Dehaene, 2020),外部分组线索主要考虑:连通性、共同区域。通过对被试的行为和 fMRI 各项指标分析,便可探究空间维度条件下内部和外部分组线索影响数量感知分组化策略的认知机制及神经基础。此外,对所有被试进行执行功能测量,确保其执行功能发展水平相似。

本研究提出以下假设:首先,外部分组线索相比于内部分组线索能够产生更强的分组化效应。预期在外部分组线索条件下,被试的反应时将更短,感知精度更高。其次,本研究假设不同数学水平的个体在使用数量感知策略时可能会有所不同。预期数学水平较高的被试面对分组条件可能更倾向于使用精确的计数策略,而数学水平较低的被试可能更多依赖于估计策略。第三,由于前人的研究发现被试在使用分组化策略进行数量感知时会使用简单心算进行数量感知,因此本研究假设相比于未分组条件,分组条件会额外激活计算相关脑区(如:顶内沟、角回等)。最后,根据 He 等(2015)的观点,连通性和封闭性(或内外关系)是一种拓扑不变量,本研究假设外部分组线索的内部机制可能与拓扑性质有关,预期外部分组线索相比内部分组线索会额外激活拓扑属性相关脑区(如:顶内沟、额上回、颞下回等)。

4.2 研究 2: 时间维度数量感知分组化策略的认知机制及神经基础研究

研究 2 综合采用行为和 fMRI 手段,参考 Anobile 等(2020a, 2021b)的实验范式,其中行为实验选取数学学业水平高、中、低的大学生为被试,以按时间顺序呈现的序列刺激为实验材料,目标刺激呈现的位置与空间维度一致,在空间维度上是同时呈现的,而在时间维度上是顺序呈现的。数值范围选取 5~17 范围内的数值点, fMRI 实验以 6、9、12 和 16 的数值点为实验材料,被试为 18~30 岁的成年人,考察时间维度条件下数量感知的分组化策略。根据 Cheng 等(2021)的研究结果,300 ms 的刺激起始间隔(SOA)是时间条件下数量感知估计和计数策略的阈限临界值,说明精确的 SOA 是影响时间维度条件下数量感知的重要因素。为此,SOAs 主要考虑:短 SOA 150 ms (刺激呈现 50 ms, 间隔 100 ms)、长 SOA 300 ms (刺激呈现 100 ms, 间隔 200 ms)。包括 2 个实验:实验 3 分别采用行为技术(实验 3A)和 fMRI 技术(实验 3B),通过系统操作内部分组线索(邻近性、颜色相似性),考察时间维度条件下的数量感知分组化策略及其认知神经机制。实验 4 分别采用行为技术(实验 4A)和 fMRI 技术(实验 4B),通过系统操作外部分组线索(连通性、共同区域),考察时间维度下数量感知分组化策略及其认知神经机制。

本研究提出以下假设:首先,时间维度具备

分组化效应,预期时间维度下分组条件比未分组条件表现出更短的反应时和更高的感知精度。其次,假设时间维度中外部分组线索较内部分组线索产生更强的分组化效应,预期外部分组线索下的反应时更短,感知精度更高。第三,基于 Cheng 等(2021)的研究结果,假设时间维度下不同 SOA 对分组化效应的影响存在差异,预期短 SOA (150ms)下的分组化效应更为显著。最后,假设时间维度下分组条件中被试可能采用计算策略以提高数量感知的速度和准确性,预期分组条件较未分组条件会激活与计算相关的脑区(如顶内沟、角回和额中回等)。

4.3 研究 3: 运动维度数量感知分组化策略的认知机制及神经基础研究

研究 3 采用 ERP 技术,考察运动维度数量感知分组化策略的心理-生理机制。包括 2 个实验:实验 5 参考 Anobile 等(2016)的运动适应范式,通过让被试分别适应高频或低频手指敲击任务后完成随后呈现的数量点阵估计任务,考察本体感觉运动适应对数量感知分组化策略的影响,即被试运动适应后对视觉分组和未分组的数量点阵估计在电生理层面是否有差异。已有研究表明,被动观看运动(如,观看运动的点)也会产生运动适应(Thompson & Burr, 2009)。为此,实验 6 通过让被试被动观看并分别适应高速或低速运动的数量点阵后,考察被动观看运动条件下数量感知分组化策略,即被试被动观看运动适应后对视觉分组和未分组的数量点阵估计在电生理层面有所不同。同样,需对所有被试进行执行功能测量,以确保被试执行功能无显著差异,并排除生理老化对执行功能能力的潜在影响。具体研究框架如图 1 所示。

本研究提出以下假设:首先,分组化效应是一种稳定且显著的效应,即便在实验任务开始前进行了运动适应,分组化效应依然存在。预期运动适应后,分组条件比未分组条件仍表现出更高的感知精度和更短的反应时。其次,假设分组化策略会反向影响运动适应,预期分组化策略能够减弱由高频和低频运动适应所引发的低估和高估现象。

5 理论建构与创新

数量感知策略是数量感知领域研究的焦点。过去研究强调了分组化策略,即被试在加工分组

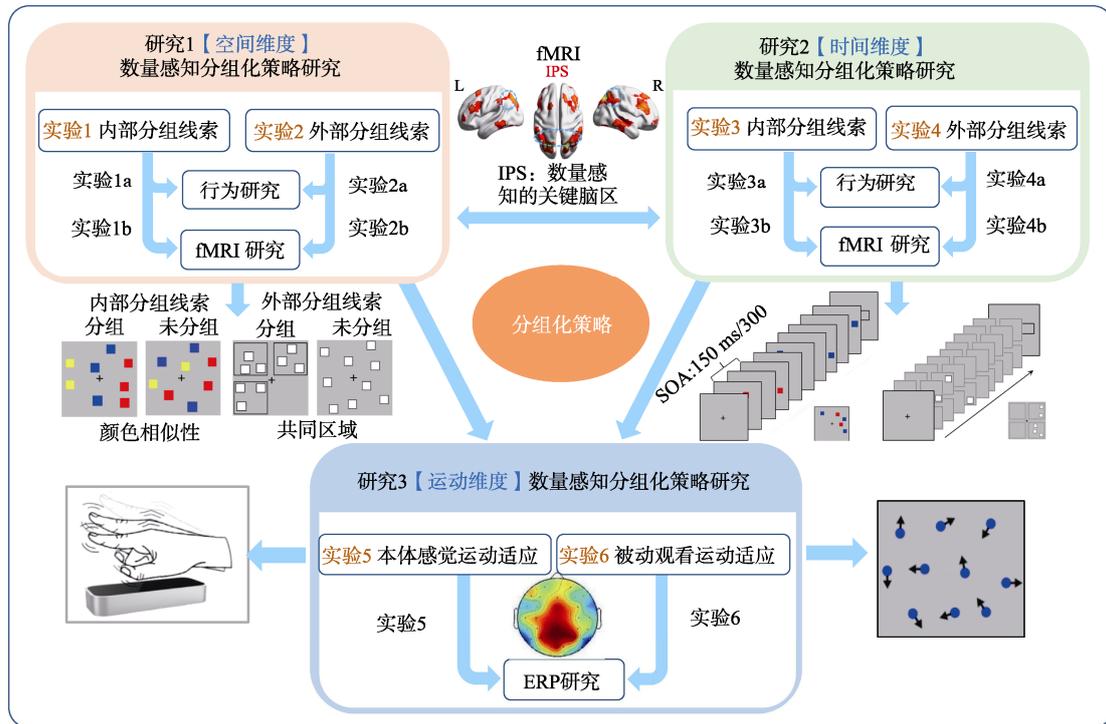


图1 研究框架流程图

后的数组时表现更快、更准确(Ciccone & Dehaene, 2020)。然而, 迄今为止, 对于分组化策略的机制了解尚有不足。研究数量感知是复杂的, 因此探讨其机制不能只考虑单一的空间维度, 还需要结合时间、运动等其他不同维度的感知觉特征。本研究将以知觉分组线索为切入点, 设计包含不同量级维度的感知任务, 使之适用于空间、时间和运动情景, 以系统考察数量感知分组化策略的心理-生理反应, 以及知觉分组在数量感知分组化策略形成中所起作用的认知机制及神经基础, 为实现高效率数学学习提供依据。

具体来看, 包括以下几点创新:

(1) 本研究从人类量级理论的假设入手, 以知觉分组为切入点, 在空间、时间和运动三个维度, 以及行为认知和脑神经基础两个层面开展了系列实验研究。通过将数量点阵估计任务与知觉分组、运动适应相结合, 设置具有生态效度的数量感知情境的系列实验任务, 以及多个维度和层面的系统性分析, 准确描绘数量感知分组化策略的加工机制和影响因素, 揭示人类量级系统的不同维度对数量感知影响的认知神经机制。本研究可以填

补国内外该领域的空白, 为揭示数量认知理论和实现高效率学习做出重要贡献。

(2) 本研究涵盖了心理学、认知神经科学研究前沿的方法和技术。具体来说, 结合空间、时间与运动和数量关系的特性设计多维度结构化对应的实验范式, 包括多个维度和层面的数量感知加工的检测和评估; 采用国际前沿的神经影像学数据分析技术, 从大脑激活和神经信息表征的角度考察空间分布、时间序列对数量感知分组化效应影响的脑区功能; 应用电生理技术从本体感觉到被动观看运动适应两个视角进一步揭示数量感知的认知机制及神经基础。通过对不同前沿方法和技术的结合, 本研究将更加全面刻画出人类量级系统在数量感知分组化中的作用机制和神经功能。

(3) 数量感知与诸多行为, 如数学学习、学习策略及注意广度有着密切关系, 而高效率学习产生的重要来源之一便是学习策略。因此, 本研究不仅力图揭示数量感知分组化策略的特征、机制和影响因素, 而且注重理论成果的转化应用, 努力将研究成果应用于数学学习中, 为教师、学生和家長提供学习训练的科学依据, 可直接用于高

效率学习机制的实施方案。

综上, 尽管数量感知分组化策略的行为认知和神经基础已有很多研究证据, 但是对于量级系统的空间、时间和运动不同维度, 知觉分组的内部和外部线索, 以及本体感觉和被动观看运动对数量感知分组化策略的影响依旧有待更深入的研究。因此, 本研究拟综合采用行为测试、电生理 (EEG & ERP)、神经成像 (fMRI) 等多种手段, 从量级系统的空间、时间和运动角度, 以知觉分组为切入点, 考察成年期不同数学学业水平人群对数量感知分组化策略的心理-生理反应, 系统探讨不同量级系统维度对数量感知分组化策略影响的认知机制及神经基础, 深入理解知觉分组在数量感知分组化策略形成中的作用, 以期更系统地回答数量感知分组化的实质及其心理-生理机制, 为实现高效率数学学习提供依据。

参考文献

- 戴隆农, 潘运. (2021). 数字-空间联结的内在机制: 基于工作记忆的视角. *心理科学*, 44(4), 793-799.
- 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*, 21(3), 205-208.
- 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.
- 徐继红, 司继伟, 周新林, 董奇. (2010). 数量估计的研究回顾. *心理科学*, 33(3), 646-648.
- 张真, 苏彦捷. (2007). 人类数能力的演化基础——数能力比较研究的启示. *心理科学进展*, 15(1), 57-63.
- 朱滢. (2005). 陈霖的拓扑性质知觉理论. *心理科学*, 28(5), 1031-1034.
- Anobile, G., Arrighi, R., Castaldi, E., & Burr, D. C. (2021a). A sensorimotor numerosity system. *Trends in Cognitive Sciences*, 25(1), 24-36.
- Anobile, G., Arrighi, R., Togoli, I., & Burr, D. C. (2016). A shared numerical representation for action and perception. *Elife*, 5, e16161.
- Anobile, G., Castaldi, E., Maldonado Moscoso, P. A., Arrighi, R., & Burr, D. (2021b). Groupitizing improves estimation of numerosity of auditory sequences. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, 339.
- Anobile, G., Castaldi, E., Moscoso, P. A. M., Burr, D. C., & Arrighi, R. (2020a). "Groupitizing": A strategy for numerosity estimation. *Scientific Reports*, 10(1), 13436.
- Anobile, G., Domenici, N., Togoli, I., Burr, D., & Arrighi, R. (2020b). Distortions of visual time induced by motor adaptation. *Journal of Experimental Psychology: General*, 149(7), 1333-1343.
- Barlow, H., & HILL, R. (1964). Evidence for a physiological explanation of the waterfall phenomenon and figural after-effects. *Nature*, 200, 1345-1347.
- Burr, D., Anobile, G., Castaldi, E., & Arrighi, R. (2021). Numbers in action. *Behavioral and Brain Sciences*, 44, e185.
- Burr, D., & Ross, J. (2008). A visual sense of number. *Current Biology*, 18(6), 425-428.
- Cai, Y., Hofstetter, S., Harvey, B. M., & Dumoulin, S. O. (2022). Attention drives human numerosity-selective responses. *Cell Reports*, 39(13), 111005.
- 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.
- Cheng, X., Lin, C., Lou, C., Zhang, W., Han, Y., Ding, X., & Fan, Z. (2021). Small numerosity advantage for sequential enumeration on RSVP stimuli: An object individuation-based account. *Psychological Research*, 85(2), 734-763.
- 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.
- Ciccione, L., & Dehaene, S. (2020). Grouping mechanisms in numerosity perception. *Open Mind*, 4, 102-118.
- Czarnecka, M., Rączy, K., Szweczyk, J., Paplińska, M., Jednoróg, 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.
- de Hevia, M. D., Izard, V., Coubart, A., Spelke, E. S., & Streri, A. (2014). Representations of space, time, and number in neonates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(13), 4809-4813.
- Dehaene, S., & Changeux, J. (1993). Development of Elementary Numerical abilities: A neuronal model. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 5(4), 390-407.
- Dehaene, S., Dehaene-Lambertz, G., & Cohen, L. (1998). Abstract representations of numbers in the animal and human brain. *Trends in Neurosciences*, 21(8), 355-361.
- Elder, J. H., Oleskiw, T. D., & Freund, I. (2018). The role of global cues in the perceptual grouping of natural shapes. *Journal of Vision*, 18(12), 14.
- Fornaciai, M., Togoli, I., & Arrighi, R. (2018). Motion-induced compression of perceived numerosity. *Scientific Reports*, 8(1), 6966.
- 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.
- 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.
- 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.
- Hayden, A., Bhatt, R., & Quinn, P. (2006). Infants' sensitivity to uniform connectedness as a cue for perceptual organization. *Psychonomic Bulletin & Review*, 13(2), 257–261.
- 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.
- 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.
- Hubbard, E., Piazza, M., Pinel, P., & Dehaene, S. (2005). Interactions between number and space in parietal cortex. *Nature reviews. Neuroscience*, 6, 435–448.
- Humphreys, G. W., & Riddoch, J. (1993). Interactions between object and space systems revealed through neuropsychology. *Attention and Performance*, 14, 143–162.
- 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.
- 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(1), 14979.
- 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(3), 915–928.
- 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.
- 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.
- 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). On the nature and order of organizational processing: A reply to Peterson. *Psychonomic Bulletin & Review*, 1(4), 515–519.
- 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.
- Penneck, 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.
- 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.
- Piazza, M., & Izard, V. (2009). How humans count: Numerosity and the parietal cortex. *Neuroscientist*, 15(3), 261–273.
- Revkin, S., Piazza, M., Izard, V., Cohen, L., & Dehaene, S. (2008). Does subitizing reflect numerical estimation? *Psychological Science*, 19(6), 607–614.
- Simon, O., Mangin, J., Cohen, L., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2002). Topographical layout of hand, eye, calculation, and language-related areas in the human parietal lobe. *Neuron*, 33(3), 475–487.
- Simon, T., & Vaishnavi, S. (1996). Subitizing and counting depend on different attentional mechanisms: Evidence from visual enumeration in afterimages. *Perception & Psychophysics*, 58, 915–926.
- Soltész, F., Szucs, D., & Szucs, L. (2010). Relationships between magnitude representation, counting and memory in 4- to 7-year-old children: A developmental study. *Behavioral and Brain Functions*, 6(1), 13.
- Starkey, G. S., & McCandliss, B. D. (2014). The emergence of “groupitizing” in children's numerical cognition. *Journal of Experimental Child Psychology*, 126, 120–137.
- Thompson, P., & Burr, D. (2009). Visual aftereffects. *Current Biology*, 19(1), R11–R14.
- Togoli, I., Crollen, V., Arrighi, R., & Collignon, O. (2020). The shared numerical representation for action and perception develops independently from vision. *Cortex*, 129, 436–445.
- 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.
- Tudusciuc, O., & Nieder, A. (2007). Neuronal population coding of continuous and discrete quantity in the primate posterior parietal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(36), 14513–14518.
- Wagemans, J., Elder, J. H., Kubovy, M., Palmer, S. E., Peterson, M. A., Singh, M., & von der Heydt, R. (2012). A century of Gestalt psychology in visual perception: I. Perceptual grouping and figure-ground organization. *Psychological Bulletin*, 138(6), 1172–1217.
- Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: Common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(11), 483–488.
- 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, 476–484.
- Wender, K., & Rothkegel, R. (2000). Subitizing and its subprocesses. *Psychological research*, 64(2), 81–92.
- Whalen, J., Gallistel, C. R., & Gelman, R. (2016). Nonverbal Counting in Humans: The Psychophysics of Number Representation. *Psychological Science*, 10(2), 130–137.
- 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.
- Zorzi, M., Stoianov, I., & Umiltà, C. (2005). Computational modeling of numerical cognition. *Handbook of Mathematical Cognition*, 5, 67–84.

Cognitive mechanism and neural basis of groupitizing strategies in numerosity perception

PAN Yun^{2,3}, YANG Huanyu^{1,2}, ZHU Jun², JIA Liangzhi²

⁽¹⁾ School of Education, Yunnan Minzu University, Kunming 650504, China)

⁽²⁾ Key Laboratory of Basic Psychological and Cognitive Neuroscience, School of Psychology, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

⁽³⁾ Guizhou Education University, Guiyang 550018, China)

Abstract: Groupitizing, a key strategy in numerosity perception, encompasses both subitizing and counting, and significantly influences individual arithmetic abilities. While previous research has demonstrated a close relationship between perceptual grouping and numerosity perception, most studies have primarily examined the phenomenon of numerosity perception grouping from either a spatial or temporal perspective in isolation. This has led to a neglect of the roles played by both internal and external cues in perceptual grouping, as well as the contributions of spatial, temporal, and motion dimensions, all of which share a common magnitude system in numerosity perception strategies. Furthermore, the psychological and physiological mechanisms underlying these grouping strategies remain unclear. Building on previous studies, this research aims to systematically explore the cognitive and neural mechanisms influencing numerosity perception grouping strategies across different magnitude system dimensions by employing a combination of behavioral measurements, ERP, and fMRI techniques. The study seeks to provide a deeper understanding of how perceptual grouping contributes to the formation of numerosity perception grouping, offering a more comprehensive explanation of the underlying psychological and physiological mechanisms. Ultimately, this research aims to provide a foundation for enhancing mathematical learning efficiency.

Keywords: numerosity perception, groupitizing, grouping cues, ATOM, fMRI