

# 数序认知的特征及神经机制

高 航,周路平

湖南师范大学教育科学学院心理系,长沙 410081

**[摘要]** 数序认知是数认知的一个重要方面。研究发现:数序具有进化和个体发育的连续性;行为学上显示了与数量认知相似的行为学效应;但是数序和数量认知的加工在顶区和前额区显示了空间和时间进程上的差异。数序表征是否具有特异性脑区;它和数量表征是否存在两种不同的表征系统,或者它们是部分分离的,有关这些问题的研究结论并不明朗。

**[关键词]** 数序;数量;数认知;神经机制;顶叶

**[中图分类号]** B842

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1000-7857(2007)17-0061-04

## The Characteristics and Its Neural Background of Numerical Order Cognition

GAO Hang, ZHOU Luping

Department of Psychology, College of Education and Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

**Abstract:** Numerical order cognition is one of the most important parts of numerical cognition. Research shows that it has its roots both in evolution and individual's development, and has similar behavioral effects as numerical magnitude cognition. But they are associated with different spatio-temporal courses in parietal and prefrontal cortices. It is inconclusive as to whether the numerical order cognition and the numerical quantity cognition are related with some common underlying mechanisms, or they are related with (at least partially) distinct processes.

**Key Words:** numerical order; numerical magnitude; numerical cognition; neural background; parietal cortex

**CLC Number:** B842

**Document Code:** A

**Article ID:** 1000-7857(2007)17-0061-04

### 0 引言

数概念与空间和时间一样,都是人类抽象思维的基本要素。而个体对数量、数序的表征,是获得数的概念以及发展更高级的数学能力的基础。

在数概念中,数字的意义将随语境的不同而异。Fuson<sup>[1]</sup>认为,这些语境主要有3种:①数的语境(基数性的、量性的和序数性的);②序列顺序语境;③与数无关的语境(非数字性的)。其中,序列知识对以后数学能力的发展具有重要作用。

在此基础上,Wiese<sup>[2]</sup>进一步指出,数字在基数性(Cardinal)、序数性(Ordinal)以及非数字性(Nominal)3种语境中分别代表了数量、数序和非数字意义。在基数性的语境中,数字表达了“多少”的意义,即数的量(如

8);在序数性的语境中,数字表示一个元素在一个序列中的相对位置——“第几”的意义,即数的序(如第8)。非数字意义是指将数字当作标签(如8号)。因此,一个数字不仅能表达数量的意义,而且能传达它在一个常规序列中相对位置的信息,即数的顺序意义。这种顺序意义还广泛地存在于其他非数字序列(Non-numerical order)当中,如字母表、星期和年月等。

在所有的数字意义当中,数量的意义一般被认为是最重要的,大量的数认知研究也主要阐明数量是怎样表征、加工和执行的。例如,Butterworth<sup>[3]</sup>的数字模型表达了个体对数量的把握;Dehaene<sup>[4]</sup>的“数感”(Number sense)指的是关于数字的“量”概念。目前,关于数字的数序研究并不多,对数序的神经基础以及它和数量认知

收稿日期:2007-05-13

作者简介:高 航,湖南师范大学教育与科学学院心理系,研究方向为实验心理学;E-mail: gaohanna@gmail.com

周路平(通讯作者),湖南师范大学教育与科学学院心理系,副教授,研究方向为实验心理学(学习障碍、情绪等);

E-mail: zhilup01@163.com

的关系并不明朗。Wiese<sup>[2]</sup>认为,数序意义是数字的中心特性,对个体的数字认知十分重要。因而对它的研究与探讨是非常有意义的。以下从种系和个体发展、行为学效应、表征模型、神经生理基础几个方面对数序的近期研究进展作一个回顾和述评。

## 1 种系和个体发展

数字符号(如阿拉伯数字、言语数字)在人类的进化史上是一个新近的文化发明,然而人对数字的感觉却是古老的<sup>[5]</sup>。很多研究显示,数量的表征为成人、尚未具备语言能力的婴儿以及一些动物所共有。它具有漫长的进化历史,是人类生而所具有的秉赋,也是形成人类更高级数学能力的基石。

对动物的很多实验研究报道了不具备语言能力的动物具有对数序的理解能力。如 Chen & Swartz<sup>[6]</sup>等人的一项研究发现,猴子具有学习和编码序列顺序位置的能力。Brannon 和 Terrace<sup>[7]</sup>的一项开创性行为学研究发现,猕猴能够表征视觉呈现的数字以及觉察数字顺序的差异性。在实验中,他们首先训练两只猴子学习数字 1~4,并按照数字的升序顺序教猴子(即 1-2-3-4)。然后对猴子进行测验,发现猴子能够对数字 1~9(包括新颖数字 5~9)按升序顺序进行反应。在后续的实验中<sup>[8,10]</sup>,研究发现猴子不能表征降序和随机序列。上述研究反映出物体的顺序序列,不管是图片还是阿拉伯数字,在某些方面的表征是不要语言的。因此,Wiese<sup>[2]</sup>提出:对一个序列当中物体位置表征的非语言能力或语前(Prelinguistic)能力,也许是序列顺序概念理解的前兆,且将影响以后对数字顺序任务确认的经验特性的掌握。

Brannon<sup>[11]</sup>研究了婴儿的“序数知识”的能力。在前两个实验中发现,11个月大的婴儿能区别升序和降序的差异,但9个月大的婴儿却做不到。说明11个月大的婴儿具有区分数字之间谁大谁小的能力,且这种能力是婴儿在9个月到11个月之间发展起来的。在第3个实验中发现,9个月大的婴儿能区分单方块大小变化的序列,说明婴儿非数字顺序判断能力的发展先于数字顺序。此外,Brannon<sup>[9]</sup>的另一项研究考察了2岁和3岁儿童的序数知识能力,结果显示,2岁大的儿童完全具有数字辨别能力,并且他们还能表征6以内的数字顺序关系。但是,那些不具备任何语言数字知识的儿童却不能做出顺序判断。

Fuson<sup>[1]</sup>认为,儿童的数序和数量理解能力的发展是处于不同阶段的。Wynn<sup>[12]</sup>指出,儿童在学习背诵数字序列时,先理解数的顺序概念,然后才发展出对数字数量意义理解的能力,即儿童刚开始并不理解数序相应的数量概念(知道5在4的后面,并不明白5比4大)。数量和数序在个体发展中的这种不同步也许说明存在两种表征系统。

人类的数序表征系统和数量表征一样具有进化和个体发育的连续性,然而人类和动物对数序的表征是否具有相同的神经机制,是一个相当重要而没有得到解决的问题。

## 2 行为学效应

### 2.1 数的距离效应

在数量比较任务当中存在这样一种现象:一个数字与距离它近的数字相比较时,其反应时比距离远的数字要长,这种现象被称为数距离效应(Numerical Distance Effect)。Moyer 和 Landauer<sup>[13]</sup>首次在阿拉伯数字的比较任务当中发现了距离效应。这种效应在一位数字<sup>[13]</sup>、两位数字<sup>[13,14]</sup>、线段长度<sup>[15]</sup>、点阵数量<sup>[16]</sup>、物体大小<sup>[17]</sup>等的比较任务研究中均有发现。它被解释为数量信息汇聚到一个模拟的幅度表征<sup>[18]</sup>,即数字相应数量的抽象表征,是一种从左到右的连续体形式或数字线(Number Line)。测试中在判断非数字序列时也发现了距离效应,例如,字母表<sup>[19]</sup>和月份顺序<sup>[20]</sup>等。这些数据说明,数量和顺序信息的加工可能都是根据一个连续的(数量或非数量)纬度编码的相对位置来进行的。

### 2.2 SNARC 效应

Dehaene<sup>[21]</sup>等人首先发现了数字大小与双手反应速度的关系:对较大的数字,右手比左手反应快,而对较小的数字左手反应比右手快,即一种空间-数字的反应编码联合效应(Spatial Numerical Association of Response Codes, SNARC)。SNARC 效应被认为是一个内部幅度表征自动的激活,它是一种从左至右的数字线的形式(小数在左边,大数在右边)。因此左手对小数字反应快,而右手对大数字反应快。这说明在数字(小/大)和空间(左/右)的抽象表征的水平上,也许存在一个它们交互作用的中心点。近来在对字母表<sup>[19]</sup>、月份顺序<sup>[20]</sup>以及一个星期的天数顺序研究中发现,不管是在顺序相关的任务(如判断字母是在一个给定的标准字母的前面还是后面)还是顺序不相关的任务(如辅音和元音的分类),都显示了 SNARC 效应,表明非数字序列的内部表征也许是空间编码的。

## 3 表征模型

### 3.1 位置编码模型

位置编码模型(Place-coding Models)<sup>[18, 22]</sup>假设每个数字都会很大程度地激活数字线上的相应位置,被激活的顶峰在目标位置,同时向邻近位置传播,并随着距离增大而减弱。例如,数字5激活数字线上5的位置,并传播到相邻数字4和6,距离5越远,激活越弱。因此根据位置编码模型,一个数字仅激活数字线的一部分(限定的),就像一个带通滤波器。

Nieder<sup>[23]</sup>等人的一项研究支持了位置编码效应。实

验中,研究者采用“数字延迟匹配”任务对猴子进行研究时,发现了“数字选择神经元”。这些神经元显示一个典型的位置编码效应特征,即一个神经元对某一个数字最大程度的反应,对其邻近数字的反应随着距离的增加而减弱。

位置编码模型对数序表征只能做部分的解释,因为根据模型数序的编码仅仅局限于目标数字周围的一部分,而不是整个序列。例如,数字 8 激活数字线上 8 的位置以及邻近数字 7 和 9,而数字 3 激活 2、3 和 4,这就很难判断在序列中,3 是出现在 8 的前面还是后面(数字线上没有叠加,分别是 2-3-4 和 7-8-9)。因此位置编码模型不能全面地解释数序表征。

### 3.2 量值编码模型

量值编码模型(Magnitude-coding Models)<sup>[24]</sup>的解释范围包括一个从起始数字到目标数字的完整区域。它就像一个温度计或累加器;一个小数字的激活范围是比它大的数字激活范围的子集。例如数字 4 激活 1、2、3、4,而 3 激活 1、2、3,是 4 激活的范围的子集。数字的内在编码会模拟它所表征的量值,类似于一种数量的分辨。

根据量值编码模型,数序的表征能激活所有比目标数字小的数,是一个无遗漏的范围。数序根据数量信息而推导,例如,可以根据 3 比 5 的量值小而推断 3 在 5 的前面。然而这个模型不能推导到非数字序列,因而它并不全面。

## 4 神经生理学研究

神经生理学研究发现,顶叶是数加工的优势区域,特别是脑顶内沟(Intraparietal Sulcus, IPS)。Dehaene<sup>[25, 26]</sup>和他的同事们认为,数的加工涉及 3 个顶叶环路。① 脑顶内沟的水平部分(Horizontal Segment of the Intraparietal Sulcus)。脑成像显示,它是数加工的一个主要激活部分,且不受数字形式限制,在数量加工时激活增强,可能类似于一个空间的地图或“数字线”(number line)。② 左角回联合左半球的外侧裂周区(Left Angular Gyrus and Left-hemispheric Perisylvian)。这一区域支持言语数字形式的操作。③ 双侧的后上顶叶系统(Bilateral Posterior Superior Parietal System)。这一区域支持心理数字线的注意朝向操作,涉及空间位置的选择。Dehaene 认为 HIPS 区域在基本的数量表征和操作当中,起着一个中心作用。

顶叶区域的激活不局限于数量的加工,研究发现这一脑区的激活也涉及顺序任务的加工。Marshuetz<sup>[27]</sup>等人指出,数量和非数字序列的加工具有相同的神经基质。研究者发现,与数比较任务一样,由先前学习记忆来判断两个字母的顺序,同样激活了双侧顶叶皮质。一项功能性磁共振成像(functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)研究发现<sup>[28]</sup>:数量和非数字序列加工的

联合反应都能激活脑顶内沟(IPS),其中数量任务是比较数字和角度大小,非数字序列任务是判断字母在字母表中的相对位置和一个圈中点的方向。

总之,很多研究都显示顶叶区域也涉及非数字序列任务的加工,不管这些序列任务是从短时记忆<sup>[27]</sup>还是长时记忆<sup>[29]</sup>当中提取,都会激活顶叶区。

字母如同数序一样也是一种顺序的表征,一项以听觉形式呈现刺激的 ERP 研究探讨了这种字母顺序的表征<sup>[29]</sup>。研究采用匈牙利语发音的数字(1, 4, 6, 9 和 5 进行大小比较)和字母(a, d, f, i 和 e 进行顺序判断),结果发现:右顶叶的 N2p 成分在两种条件下的振幅是相反的,这说明数量和字母顺序的编码具有实质性的差异。

Turconi & Jemel<sup>[31]</sup>等人应用 ERP 技术研究数量比较和顺序判断的关系,发现它们的加工存在时空差异。研究采用阿拉伯数字 11 到 19(除 15)与 15 进行数量大小比较和数序判断以及字母顺序判断(判断字母 I 到 Q(除 M)是在 M 的前面还是后面)3 个任务。结果显示,每个任务在时间进程和脑电地形图上都有差异:字母加工的距离效应诱发了位于顶叶双侧的 N1 和 N2;双数字数量加工的距离效应诱发了一个位于顶叶左侧的 P2 成分;数序加工诱发了一个延时的双侧效应;3 个任务都激发了额区,但是数序加工更加显著。

作为数认知的一个中心特性,数序并没有得到应有的关注,它的具体加工脑区并不清楚。目前关于此问题有两种假设:一种可能性就是数序的表征和数量是相同的,数序和相应的数量是直接相连,它们的编码应该都在 IPS 区;另一种假设就是数序和数量加工具有共同的神经基质,但是加工的时间进程和脑区(时空)不同。角回是数序表征一个可能的区域<sup>[29]</sup>,研究发现,这一区域实际上涉及序列的自动提取和言语工作记忆(在序列加工中很重要)。双侧后顶叶区是另一个可能的区域<sup>[19]</sup>,实际上这一区域涉及序列的列举和空间注意。也有研究发现<sup>[32]</sup>,双侧的后顶叶区的激活涉及空间编码和序列中相对位置的加工。

数字数序与人们的日常生活密切相关,方方面面都会涉及,因而对它的研究是非常有意义的。了解数序认知加工的特点和特异性,对于科学地认识数学能力的特征、对今后数学障碍的研究以及数学教学评估均具有启示。且能帮助我们理解数认知的本质,对以后研究高一阶的数学能力作铺垫。然而数序的加工是否存在特异性脑区;数量表征和数序表征是否存在两种不同的表征系统,或者它们是部分分离的。这些都是值得我们进一步探讨的问题。

### 参考文献 (References)

- [1] FUSON K C. Children's counting and concepts of number [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 1988.

- [2] WIESE H. Numbers, language and the human mind [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [3] BUTTERWORTH B. The mathematical brain [M]. London, UK: Macmillan, 1999.
- [4] DEHAENE S, COHEN L. Cerebral pathways for calculation: double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic [J]. *Cortex*, 1997, 33(2): 219–250.
- [5] PIAZZA M, DEHAENE S. From number neurons to mental arithmetic: The cognitive neural science of number sense [M]//GAZZANIGA M S, LEDOUX J E, BIZZI E, *et al.* The cognitive neuroscience. 3rd Edition. MA Cambridge: MIT Press, 2004: 865–875.
- [6] CHEN S, SWARTZ K B, TERRACE H S. Knowledge of the ordinal position of list items in rhesus monkeys [J]. *Psychological Science*, 1997, 8(2): 80–86.
- [7] BRANNON E M, TERRACE H S. Ordering of the numerosities 1 to 9 by monkeys [J]. *Science*, 1998(282): 746–749.
- [8] BRANNON E M, TERRACE H S. Representation of the numerosities 1–9 by rhesus monkeys (*Macaca mulatta*) [J]. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 2000(26): 31–49.
- [9] BRANNON E M. The development of ordinal numerical knowledge in infancy [J]. *Cognition*, 2002(83): 223–240.
- [10] BRANNON E M, TERRACE H S. The evolution and ontogeny of ordinal numerical ability [M]// BECHOFF M, ALLEN C, BURGHARDT G M, Eds. *The cognitive animal*. Cambridge, MA: MIT Press, 2002: 197–204.
- [11] BRANNON E M. The development of ordinal numerical competence in young children [J]. *Cognitive Psychology*, 2001(43): 53–81.
- [12] WYNN K. Addition and subtraction by human infants [J]. *Nature*, 1992(358): 749–750.
- [13] DEHAENE S, DUPOUX E, MEHLER J. Is numerical comparison digital –analogical and symbolic effects in 2 –digit number comparison [J]. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1990, 16(3): 626–641.
- [14] LINK S. Modeling imageless thought—the relative judgment theory of numerical comparisons [J]. *Journal of Mathematical Psychology*, 1990, 34(1): 2–41.
- [15] JOHNSON D M. Confidence and speed in the two category judgment [J]. *Archives of Psychology*, 1939(241): 1–52.
- [16] BUCKLEY PB, GILLMAN C. Comparisons of digits and dot patterns [J]. *Journal of Experimental Psychology*, 1974, 103(6): 1131–1136.
- [17] MOYER R S. Comparing objects in memory evidence suggesting an internal psychophysics [J]. *Perception and Psychophysics*, 1973, 13(2): 180–184.
- [18] DEHAENE S. Varieties of numerical abilities [J]. *Cognition*, 1992(44): 1–42.
- [19] GEVERS W, REYNVOET B, FIAS W. The mental representation of ordinal sequence is spatially organized [J]. *Cognition*, 2003(87): B87–95.
- [20] GEVERS W, REYNVOET B, FIAS W. The mental representation of ordinal sequence is spatially organized: evidence from days of the week [J]. *Cortex*, 2004(40): 171–172.
- [21] DEHAENE S, BOSSINI S, GIRAUX P. The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology [J]. General*, 1993(122): 371–396.
- [22] VERGUTS T, FIAS W, STEVENS M. A model of exact small number representation [J]. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2005, 12(1): 66–80.
- [23] NIEDER A, MILLER E K. A parieto–frontal network for visual numerical information in the monkey [C]. *Proceedings of the National Academy of Science, USA*, 2004(101): 7457–7462.
- [24] GALLISTEL C R, GELMAN R. Preverbal and verbal counting and computation [J]. *Cognition*, 1992(44): 43–74.
- [25] DEHAENE S, COHEN L. Towards an anatomical and functional model of numerical processing [J]. *Mathematical Cognition*, 1995(1): 83–120.
- [26] DEHAENE S, PIAZZA M, PINEL P, *et al.* Three parietal circuits for number processing [J]. *Cognitive Neuropsychology*, 2003(20): 487–506.
- [27] MARSHUETZ C, SMITH E E, JONIDES J, *et al.* Order information in working memory: fMRI evidence for parietal and prefrontal mechanisms [J]. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2000(12, suppl.2): 130–144.
- [28] CALABRIA M, ROSSETTI Y. Interference between number processing and line bisection: a methodology [J]. *Neuropsychologia*, 2005(43): 779–783.
- [29] SZÜCS D, CSÉPE V. Similarities and differences in the coding of numerical and alphabetical order using acoustic stimulation as revealed by event–related potentials in humans [J]. *Neuroscience Letters*, 2004(360): 65–68.
- [30] HUBBARD E M, PIAZZA M., PINEL P, *et al.* Interaction between number and space in parietal cortex [J]. *Nature Review Neuroscience*, 2005(6): 435–448.
- [31] TURCONI E, JEMEL B, ROSSION B, *et al.* Electrophysiological evidence for differential processing of numerical quantity and order in humans [J]. *Cognitive Brain Research*, 2004(21): 22–38.
- [32] ZORZI M, BUTTERWORTH B. A computational model of number comparison [C]//HAHN M, STONESS S C Eds. *Proceeding of the twenty first annual conference of the cognitive science society*. Mahwah, New Jersey: Erlbaum, 1999: 778–783.

(责任编辑 王士泉)