

## 空间量化的心表征<sup>\*</sup>

王一峰 张丽 刘春雷 李红

(认知与人格教育部重点实验室, 西南大学心理学院, 重庆 400715)

**摘要** 空间量化(spacial quantification)是空间知觉的基础, 是对特定空间性质的表达。离散量(discrete magnitude)与连续量(continuous quantity)分别反映了空间分立和连续的性质, 二者有着相似的行为效应, 在神经表达上也有部分重叠, 这些证据暗示了二者可能有共同的表征机制——模拟表征(analog magnitude representation)。数量空间映射(number-space mappings)提供了数量与空间关系的直接证据。但空间量化的研究中还有许多未解之谜, 如: 空间量化的动态表征、量化机制的普遍性、参照点问题、复杂和多维空间的量化等。在具身认知(embodied cognition)的框架下, 空间量化的心理表征研究将对空间的性质做出更深刻的回答。

**关键词** 量化; 空间; 连续量; 离散量; 数量空间映射

**分类号** B842

### 1 引言

物理空间是连续的还是分立的? 这个问题几千年来一直困扰着哲学家和科学家。上个世纪, 量子力学和相对论在物理学领域对之做出了理论回答。现在, 心理学和生理学研究从空间量化的角度也对这一问题做出了部分回答。

与空间的两种可能的性质相对应, 空间的量化表征有连续量和离散量的区别。对于分离的物体, 我们能够表达其具体的数量, 但是我们一眼能够看出的数量又是有限的(Miller, 1956; Cowan, 2000)。当物体数量增多时, 我们倾向于用具有集合性质的词(如“很多”、“一堆”等)来表示其数量。虽然对客体集合的数量(numerosity)表达有时是模糊的, 但此时的心理表征不一定是连续的。而对于水、声音、亮度等连续性事物, 我们虽然能知道并比较其量的多少, 但仍然会用容器、量尺等所代表的离散值来表示其具体的量。同样, 这种离散表达也不能表明对它们的表征是离散的。外在的表达一方面是出于使用的方便, 另一方面也反映了空间量化的心理能力。从数量表征的角度讲, 人和多种动物的大数表征具有连续、近似

的性质, 与连续量的表征表现出相似的特征。通过对连续性的模拟, 大数表征与连续量表征建立起密切的关系, 也搭建起沟通空间的连续性和分立性的桥梁。

数量、时间、亮度及其他连续量的表征都表现出空间特性, 这似乎暗示了空间在量值加工中的核心地位(Walsh, 2003)。但是连续量和离散量都表现出空间特性并不足以表明它们有共同的表征机制, 这种共性也可能是由共同的反应机制产生的。因而, 要证明数量表征确实反映了空间性质, 还必须阐明数量的空间特性是否与空间知觉具有相同的形式。目前关于数量空间映射的研究为此提供了部分证据。本文总结了离散量和连续量的研究, 以及数量空间映射的初步研究, 在此基础上提出了未来研究的设想。

### 2 连续量与离散量的表征

作为对空间知觉的反映, 离散量与连续量是否具有共同的表征机制可以作为鉴别空间认知性质的有效指标。对量值(magnitude)认知的研究表明, 以数量(自然数)为代表的离散量的表征与大小、亮度、音量等各种连续量的表征存在很大的重叠, 它们表现出相似的认知效应和神经机制(Fias, Lammertyn, Reynvoet, Dupont, & Orban, 2003; Cohen, Henik, Rubinsten, Mohr, Dori, Van de Ven, Zorzi, Hendler, Goebel, & Linden, 2005; Kaufmann, Koppelaer, Delazer, Siedentopf,

收稿日期: 2009-10-12

\* 国家社会科学基金“十一五”规划 2008 年度教育学一般课题(BBA080047)和西南大学 211 三期工程国家重点学科建设项目(NSKD08017)资助。

通讯作者: 李红, E-mail: lihong@swu.edu.cn

Rhomberg, Golaszewski, Felber, & Ischebeck, 2005; Cohen & Henik, 2006; Tang, Critchley, Glaser, Dolan, & Butterworth, 2006; Rusconi, Kwan, Giordano, Umiltà, & Butterworth, 2006)。

## 2.1 行为效应

对数量加工的行为研究发现, 数量信息的空间组织表现出一些有趣的现象。首先是距离效应(distance effect, Moyer & Landauer, 1967), 即在比较两个阿拉伯数字的大小时, 其错误率和反应时与数字间的距离成反方向变化。当数字间的距离不变时, 反应时和错误率随数量值的增大而升高, 这就是大小效应(size effect, Dehaene, Dehaene-Lambertz, & Cohen, 1998)。1993 年, Dehaene 等人(Dehaene, Bossini, & Giraux, 1993)发现了空间数字反应编码的联合效应(Spatial Numerical Association of Response Codes, SNARC effect), 即左手对小数字比对大数字反应快, 右手对大数字比对小数字反应快的现象。在多数文化中, 数量的表征按照从左到右递增的顺序排列, 小数排列在左侧, 大数排列在右侧, 这种现象被称为心理数字线(mental number line; Dehaene, Bossini, & Giraux, 1993), 它反映了数量与空间的直接映射关系。Dehaene 等人认为 SNARC 效应与数字在心理数字线上从左到右的排列有关, 而这种数字空间的定向对应关系可能是由文化或教育因素造成的; 在从右向左书写和阅读的文化里, 数量的心理表征也是从右向左的(Zebian, 2005)。这些效应表明, 数量的操作与某些空间知觉的特征存在关联。

有趣的是, 在对连续变量的操作中也表现出与数量加工类似的效果。关于距离/大小效应, 早在 1906 年, Henmon 就在线段长度的比较任务中发现, 随着线段相对长度的减小, 反应时和错误率都升高了(Welford, 1960)。后来, 研究者在多种连续变量的量值加工任务中都发现了距离/大小效应, 比如, 图形大小(Fulbright, Manson, Skudlarski, Lacadie, & Gore, 2003)、符号大小(Tang et al., 2006)、亮度(Cohen & Henik, 2006)、音高(Cohen, Brodsky, Levin, & Henik, 2008)、角度(Fias et al., 2003)等。在抽象的连续性变量任务中同样发现了类似 SNARC 效应的联合编码效应。如, 成人在对音高进行比较时表现出空间音乐反应编码联合效应(Spatial-Musical Association

of Response Codes, SMARC effect, Rusconi et al., 2006), 对时间进行比较时表现出空间时间反应编码联合效应(Spatial-Temporal Association of Response Codes, STEARC effect, Ishihara, Keller, Rossetti, & Prinz, 2008)。

另外, 采用类似 Stroop 任务的范式发现连续变量与离散变量会产生交互作用, 表现出大小一致性效应(size congruity effect)。比如, 面积和数量(Hurewitz, Gelman, & Schnitzer, 2006)、大小和数量(Henik & Tzelgov, 1982)、亮度和数量(Cohen, Cohen, & Henik, 2008)等都会产生交互作用, 即要求被试对其中一个维度进行反应而忽略另一个维度时, 大小一致的配对比大小不一致的配对反应时要短。连续量和离散量之间的交互作用进一步暗示了二者可能共享某些加工过程, 即可能存在独立于刺激的加工量值的神经通路。另外, 这些研究都是以数量为中心展开的, 将来的研究有必要补充连续变量之间相互作用的证据。

## 2.2 神经机制的研究

几乎所有关于数量加工的研究(包括所有的研究方法和手段, 如正常人、脑损伤病人、单细胞记录和神经成像)都记录到顶内沟(the Intraparietal Sulcus, IPS)区域的活动, 但是这一区域是数量(number)加工的特异区域(Brannon, 2006)还是一般地进行量值(magnitude)加工的区域(Walsh, 2003)还存在争议。就一般功能而言, IPS 及周围区域是空间通路(where pathway)的一部分, 它参与到视觉引导的活动中(Goodale, Milner, Jakobson, & Carey, 1991)。IPS 还与顶上小叶(the Superior Parietal Lobe, SPL)共同参与自上而下的注意定向(Sapir, d'Avossa, McAvoy, Shulman, & Corbetta, 2005)。另外, IPS 还具有非空间注意的功能, 例如在注意瞬脱(attentional blink; Marois, Chun, & Gore, 2000)、持续性注意以及要求抑制任务无关信息(Wojciulik & Kanwisher, 1999)的时候也有 IPS 的激活, 此时 IPS 可能对反应相关的维度做出选择。最近有学者(Jung & Haier, 2007)提出顶叶皮层属于顶-额网络的一部分, 二者协调合作以更好地完成智力和推理任务。而在数量加工的研究中同样发现了这一网络的活动(Izard, Dehaene-Lambertz, & Dehaene, 2008)。总之, IPS 参与到多种空间和非空间的注意和工作记忆等任务中, 它在量值加工

中的复杂表现可能与任务要求有很大关系，即使连续量和离散量都是以空间为中心的量值加工，由于不同任务对视空间注意、工作记忆、反应选择等操作的要求不同，IPS 的活动可能同时伴随其他脑区的活动。我们当前所关注的是，在 IPS 内部是否存在连续量和离散量加工的分离？

Cohen 等人(2005)在一项 fMRI (functional Magnetic Resonance Imaging)研究中让被试对数字的数量值、高度和亮度进行比较，发现 IPS 后部在所有任务中都有激活，而且 BOLD 信号的水平受距离效应的调节。这一发现为量值编码的一般性提供了有力的证据。另外一些 fMRI 研究将数量和其他连续维度的量如大小、亮度、角度(Pinel, Piazza, Le Bihan, & Dehaene, 2004)以及连续序列如字母(Fias et al., 2003)的加工过程进行比较，也发现顶内区的激活有很大程度的重叠。单细胞记录方法能够精确区分在成像技术上发现的重叠区域的神经元的不同活动模式。一项对猴子的电生理研究发现猴子的顶内沟腹侧区(Ventral Intraparietal, VIP)有 20% 的神经元能够对数量和长度进行反应，但是其编码方式有所不同(Tudusciuc & Nieder, 2007)。IPS 神经元对连续量和离散量的表征表现出交叉的模式，一些神经元能够同时表征连续量和离散量，一些神经元只表征一种量值，而这些不同的神经元散布在 IPS 中，没有拓扑上的分离。更多的研究表明数量加工比连续量的加工更强烈地激活了 IPS 区域(Eger, Sterzer, Russ, Giraud, & Kleinschmidt, 2003; Castelli, Glaser, & Butterworth, 2006)。有研究者认为这可能是由于人们对数量的自动加工造成的(Cohen & Henik, 2006)，而其他的量值需要转化为模拟的数量进行加工，因而直接的数量加工更加有效地激活了 IPS。

IPS 不仅在数量加工过程中激活，而且参与各种连续量的加工，一种可能的解释就是像大小、长短、时间这些连续量都是以空间为中介表征的 (Vicario, Pecoraro, Turriani, Koch, Caltagirone, & Oliveri, 2008)；另一种可能的解释是量的加工并不共享一套表征系统，而是具有共同的反应机制(Cohen, Lammertyn, & Izard, 2008)。这两种观点都得到了一些证据的支持，比如 Verguts (Verguts, Fias, & Stevens, 2005) 和 Cohen (Cohen, Brodsky, Levin, & Henik, 2008) 等

人发现连续量和离散量在距离和大小上存在共同的决策机制，Cohen 等人(Cohen, Tzelgov, & Henik, 2008)发现二者在大小效应上存在共同的表征机制。

总之，这些证据表明大脑用同样的区域去加工各种类型的量值，连续量和离散量在表征区域上存在一定程度的交叉，在行为上也表现出相似的效应。但是在量值表征中又存在领域一般和领域特殊两种形态。数量加工是一种典型的量值加工，在神经表达上与空间表征的关系更加密切，具有一定的优先性；但我们也能够将二者区分开来，根据任务要求，对离散量和连续量做出灵活的反应。

### 2.3 模拟表征——沟通离散量与连续量的桥梁

空间概念的建立源于独立的物体占有一定的空间(Lefebvre, 1991)，这与最初对离散数量的表征优势是一致的，但是物体数量很多且难以区分的时候，我们则会将其看做一个连续体。模拟表征(analog magnitude representation, Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004; 王乃弋, 罗跃嘉, 李红, 2006)是对大数( $\geq 4$  的自然数)的近似表征(approximate representation)，具有近似、粗略的特点。模拟表征具有连续的性质，因而可能是大数量表征与连续量表征的共同机制。

2004 年, Feigenson 等人(Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004)在总结了行为和神经心理学对数量感(number sense 或 numerosity)的大量研究的基础上提出数量认知的核心系统假说。该假说认为人和动物共享两套数量核心系统：大数的近似表征系统和小数的精确表征系统。一般认为小数的表征是建立在对分离客体的表征和追踪的基础上，允许同时计算其连续特征和数量特征。Kaufman 等人(Kaufman, Lord, Reese, & Volkmann, 1949)把对小数的快速而准确的识别能力称为感数(Subitizing)，用以指代一瞬间就能感知的视野中少量刺激的数目(徐晓东, 刘昌, 2007)。感数是对分离客体的追踪与量化，是对空间以分离的客体形式存在的数量特征的表达。韦伯定律是对中等强度的刺激做出反应时表现出的规律，能够很好地应用于对大数辨别能力的刻画；但小数作为极端值，其在多大程度上符合韦伯定律尚需验证。相反，大量的跨文化研究、发展研究和动物研究表明，从简单的数量比较、数量估计到复杂

的数学运算等多种涉及大数表征的过程都遵循韦伯定律(Piazza, Izard, Pinel, Le Bihan, & Dehaene, 2004; Pica, Lemer, Izard, & Dehaene, 2004; Cantlon & Brannon, 2007; Dehaene, Izard, Spelke, & Pica, 2008; Izard & Dehaene, 2008)。由于韦伯定律是在长度、亮度、频率等连续性变量的辨别中描述感觉差别阈限的基本定律，而大数的模拟表征具有近似性、模糊性和对比率变化的敏感性，这与连续量表征具有同样的特点，同时，连续量与离散量的大脑表征区域存在重叠，因此，基于韦伯定律的模拟表征可能是大数表征和连续量表征的共同机制。

### 3 数量空间映射

数量表征与连续性变量的表征具有许多相似的效果，如距离和大小效应、SNARC效应(SNARC效应和STEARC效应)等，并且大数表征与连续性变量同样遵循韦伯定律，这暗示了空间的量化以及非空间量值的认知具有一般性。其中数量是空间量化的直接、具体的形式，数量空间映射因而可以作为空间量化形式的有效指标。因此，一些学者在心理数字线(Dehaene, Bossini & Giroux, 1993)隐喻的框架下，以数量表征为中心，提出了空间量化的心理表征模型。

1990 年，Dehaene 等(Dehaene, Dupoux, Mehler, 1990)在一个两位数的数字比较任务中采用了被试间平衡的设计，发现被试对小数用左手反应快，对大数用右手反应快的现象。随后在奇

偶判断任务中，他们采用被试内设计进一步确定了这种数字的空间效应(Dehaene, Bossini, Giroux, 1993)，并将其命名为 SNARC 效应。2003 年，Fischer 等人(Fischer, Castel, Dodd, & Pratt, 2003)提供了数字影响空间注意指向的直接证据。2007 年，McCrink 等人(McCrink, Dehaene, & Dehaene-Lambertz, 2007)发现成人在做加法运算时对数量的表征会偏向心理数字线的右侧，做减法运算时则相反，即运算冲动效应(operational momentum (OM) effect)。这一系列研究暗示了数量空间映射可能是自动化的、存在于多个认知层面上的。现在较为一致的观点认为，数量的内部表征以心理数字线的形式存在。Dehaene 和 Changeux (1993)首先提出心理数字线表现为对数收缩(logarithmically compressed)的形式，即相邻数量之间的距离随数量的增大而减小，两个数字的重叠程度依赖于它们之间的比率，距离的变化以对数形式递减，但内部噪音(noise)的值是不变的。在此，内部噪音是指感知处理信息中的随机变化，它是信号出现时的刺激背景，会干扰对刺激的辨别。Gallistel 和 Gelman (2000)则认为心理数字线表现为梯度变化(scalar variability)的线性形式，即相邻数量之间的距离是相等的，但内部噪音的标准差随着数量的增大而增大，表现出一种梯度变化的模式(见图 1)。二者存在两点差异：一是数量间距是否相等，二是心理噪音是否恒定；但这两个模型都预测对数量辨别的行为反应符合韦伯定律。

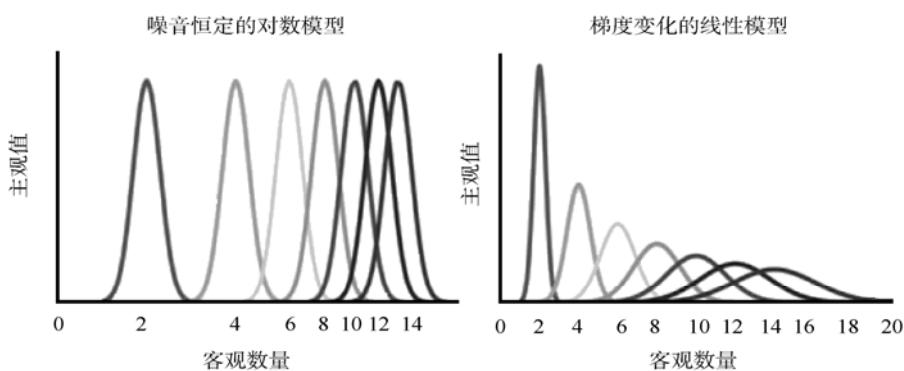


图 1 对数模型和线性模型对客观数量与主观值的关系的预测  
(根据 Cantlon, Cordes, Libertus, & Brannon, 2009 和 Feigenson et al., 2004 绘制)

Fischer (2006)指出数量的空间表征可能是被试在实验任务的要求下采用的一种策略，而不是心理数字线自动表征的结果。有证据显示空间-

数量坐标系的选择确实受到任务要求和文化的影响(Di Luca, Grana, Semenza, Seron, & Pesenti, 2006; Lindemann, Abolafia, Pratt, & Bekker, 2006)。

2008)。在不同的文化中,受到书写和阅读习惯的影响,数量的表征可能是自左向右的,也可能是自右向左的,并且工作记忆任务可以干扰数量的空间表征(Lindemann et al., 2008)。Dehaene 等人(Dehaene, Izard, Spelke, & Pica, 2008)也认为,土著居民与西方儿童在数量空间映射上是类似的,而与西方成人存在一定程度的差异,这种发展可能是由教育因素造成的。认知神经科学的研究同样提供了不一致的证据。Izard 等人(Izard, Dehaene-Lambertz, & Dehaene, 2008)采用习惯化范式(adaptation paradigm)的研究中发现婴儿在对小数(2~3)和大数(4~12)的表征上,其脑电变化表现出连续的模式。Hyde 和 Spelke (2009)采用同样的范式,发现成人的脑电变化在感数范围内(1~3)对绝对数量敏感,而在计数(counting)范围内(8~24)对比率敏感。这些研究暗示了数量空间映射的表征可能是发展的,一方面由于空间认知的发展,对空间的量化形式也不断发展;另一方面由于文化和教育的影响,对空间的量化越来越抽象化,经过对数量的单独操作的训练,数量常用来表达一些非空间特征,因而数量空间映射可能受到扭曲。

总之,当前对数量的心理表征符合哪个模型仍然处于争论之中(Piazza & Izard, 2009),将来研究也许可以对二者做出更精细的检验,如对数模型在高斯坐标(Gaussian coordinate)上应该是成对数刻度分布的,当描绘在线性坐标上时应该表现为向右的偏斜;而线性模型在高斯坐标上应该是成线性刻度分布的,当描绘在对数坐标上时应该表现为向左的偏斜(Dehaene, Izard, Pica, & Spelke, 2009)。通过控制心理噪音的水平,可能实现二者在不同坐标系上的分离。值得关注的是,对连续量和离散量的区分能力可能同时提供表征模式和心理噪音的信息,因此对数量辨别能力的发展研究可能是解决这一问题的另一有效途径。

#### 4 总结与展望

人对空间的认识是从对分离客体的数量表征逐步发展起来的。数量的精确表征分为感数和计数两种策略,而对较大的数量人们往往采用估计的策略,在需要的时候也会采用计数策略。模拟表征把对大数的近似表征和连续量的表征联系起来,构成空间的连续性与分立性相结合的桥

梁。量的表征与空间知觉在一定程度上是吻合的,数量表征反映出空间知觉的形式。人和其他灵长类自然地把数量和其他连续量映射到一维空间的心理数字线上,甚至有研究发现随机的顺序系列也可以被编码为模拟的量(Terrace, 2005),因此,模拟表征可能是量值映射到一维空间上的中介。数量空间映射与连续量一样遵循韦伯定律,研究者提出噪音恒定的对数模型和梯度变化的线性模型来解释当前的研究结果,二者假定量值空间映射有不同的内部机制,但是孰是孰非尚需进一步检验。对数量的辨别能力是发展的,对数量表征的精确化不断修正着数量空间映射的具体表现形式。简言之,我们对于空间的量化表征是不断发展的,从对分离客体的量化到连续性客体的量化,数量空间映射的精确性不断提高。

当前研究集中于以空间为中心的数量与其他连续量的关系以及数量空间映射的表征及其发展,但对于其他连续量是否以空间为中介得到量化还没有定论。数量表征与空间知觉密切相关,但复杂的空间与数量的映射关系还很少有人研究。将来的研究要着力解决以下问题:

(1)数量辨别能力的发展。发展研究表明数量内部表征的精确性随年龄而增长,在生命的第一年里发展最快,这一发展趋势一直持续到儿童晚期(Halberda & Feigenson, 2008),儿童的数量辨别能力从区分比率为 1:2 的项目数发展到能区分比率为 7:8 的项目数(Feigenson et al., 2004)。当前研究表明,人及其他灵长类动物的数量辨别能力都随年龄而发展,最后达到大致相当的水平。数量辨别能力在一定程度上表明空间量化是发展的、动态的,这是对空间是连续的还是分立的这一问题的辩证回答。如引言所述,我们会用离散值表示连续事物的量,同样的行为也适用于当分离的物体足够多、足够密集的时候,如一碗水、一碗米。在面对大数的时候我们可能采用类似连续量的模拟表征,也可能采用类似小数的离散、精确表征。空间量化的动态表征反应了离散量与连续量联结的更深层机制,恰恰与物理学中“观察者角度”的观点相吻合,因此,心理学对这一问题的研究可以促进我们从哲学、物理学上对空间性质的深入理解。

(2)空间的量化的机制具有普遍性吗?已知音高、颜色、时间等非空间变量的表征与长度、

大小等空间变量表现出相似的效应，有研究表明这些非空间变量与数量(Cohen, Henik, & Walsh, 2007)或空间(Vicario et al., 2008)具有直接的系统性关联。这暗示了空间量化的机制可以扩散到其他可以量化的变量中，从而建立起一个以数量空间映射为核心的世界表征体系。但是对于非量化的变量，如在旋转追踪(rotary tracking)、语音记忆(phonological memory)等的比较任务中与数量和空间比较在行为和神经表征上的重叠都很少(Fias, Lauwereyns, & Lammertyn, 2001; Walsh, 2003)。这从反面暗示了数量与连续量的空间映射的共同机制可能不是在反应决策上，而是在表征上。因此需要在综合对各种量值与空间关系研究的基础上，进一步探索物理世界的心理量化问题。

(3)当前的主流观点认为模拟表征是大数量和连续量表征的基本机制，但是大数表征与小数(感数)表征是不是存在分离的机制还处于争论中(Gottlieb, 2007; Nieder & Merten, 2007; Izard et al., 2008; Hyde & Spelke, 2009)。空间认知的研究(Wu, Ooi, & He, 2004)也发现精确的距离知觉只有2~3米，视角、地表材料、放置的物体都会影响距离知觉的准确性。关于小数与大数或离散量与连续量如何相互作用，从而产生复杂的空间认知的研究才刚刚开始，将来需要进一步探索空间量化在复杂空间认知中的作用。

(4)当前关于量值比较的理论认为(Cantlon, Platt, & Brannon, 2009)量值比较是在一个连续体上进行的，以端点值作为参照点，量值比较的难度取决于其与参照点的距离。参照点模型外在表现为语义一致性效应(semantic congruity effect)，即当比较两个较小的数时，对“哪个数更小？”的回答更快，当比较两个较大的数时，对“哪个数更大？”的回答更快(Cantlon & Brannon, 2005)。语义一致性效应是各种模拟表征所共有的(Shaki & Algom, 2002)，并在其他灵长类身上也表现出来(Cantlon & Brannon, 2005)，这表明模拟表征是一种进化上的认知能力。人类知识是以身体为中心组织的(徐献军, 2008)，空间认知尤其如此(Wu, Ooi, & He, 2004)，因此要建立合理的空间认知模型需要在具身认知(embody cognition；李其维, 2008)的框架下展开进一步的以自身为参照的模拟表征研究。

(5)物理空间是多维的，所有的量值都是映射到一维空间上的观点应该受到质疑。有研究发现观察角度能够影响空间认知的精确性(Ooi, Wu, & He, 2001)，二维或三维空间的编码可能与一维空间的编码有所不同。将来需要更多的借助电生理和神经成像的手段去研究是否存在多维空间量化的神经编码模式，进一步探索多维空间的编码和量化机制。

此外，模拟表征不包含感数机制，但是对婴儿感数能力的研究发现客体的连续性特征是感数范围内量值比较的重要线索(Xu, 2003)，这暗示了连续量与离散量之间可能通过模拟表征之外的机制联系起来。同样，对小数、分数、负数的研究方兴未艾，这些数量类型的表征是更加精确、抽象的空间量化指标，这方面的研究对建立完整的空间量化或数量表征体系是必不可少的。

## 参考文献

- 李其维. (2008). “认知革命”与“第二代认知科学”刍议. *心理学报*, 40, 1306–1327.
- 徐献军. (2008). 具身认知论——现象学在认知科学研究范式转型中的作用. 博士学位论文. 浙江大学.
- 徐晓东, 刘昌. (2007). 感数——它能告诉我们什么? *心理科学进展*, 15, 50–56.
- 王乃弋, 罗跃嘉, 李红. (2006). 两种数量表征系统. *心理科学进展*, 14, 610–617.
- Brannon, E., M. (2006). The representation of numerical magnitude. *Current Opinion in Neurobiology*, 16(2), 222–229.
- Cantlon, J. F., & Brannon, E. M. (2005). Semantic congruity affects numerical judgments similarly in monkeys and humans. *PNAS, USA*, 102, 16507–16511.
- Cantlon, J. F., & Brannon, E. M. (2007). Basic math in monkeys and college students. *PLoS Biology*, 5(12), 2912–2919.
- Cantlon, J. F., Cordes, S., Libertus, M. E., & Brannon, E. M. (2009). Comment on “Log or Linear? Distinct Intuitions of the Number Scale in Western and Amazonian Indigenous Cultures”. *Science*, 323, 38b.
- Cantlon, J. F., Platt, M. L., & Brannon, E. M. (2009). Beyond the number domain. *Trends in Cognitive Sciences*, 13, 83–91.
- Castelli, F., Glaser, D. E., & Butterworth, B. (2006). Discrete and analogue quantity processing in the parietal lobe: a functional MRI study. *PNAS, USA*, 103, 4693–4698.
- Cohen, K. R., Brodsky, W., Levin, M., & Henik, A. (2008). Mental representation: What can pitch tell us about the distance effect? *Cortex*, 44, 470–477.

- Cohen, K. R., Cohen, K. K., & Henik, A. (2008). When brightness counts: the neuronal correlate of numerical-luminance interference. *Cerebral Cortex, 18*, 337–343.
- Cohen, K. R., Henik, A. (2006). A common representation for semantic and physical properties: a cognitive-anatomical approach. *Experimental psychology, 53*, 87–94.
- Cohen, K. R., Henik, A., Rubinsten, O., Mohr, H., Dori, H., Van de Ven, V., Zorzi, M., Hendler, T., Goebel, R., & Linden, D. E. J. (2005). Are numbers special? The comparison systems of the human brain investigated by fMRI. *Neuropsychologia, 43*, 1238–1248.
- Cohen, K. R., Henik, A., & Walsh, V. (2007). Small is bright and big is dark in synesthesia. *Current Biology, 17*, R834–R835.
- Cohen, K. R., Lammertyn, J., & Izard, V. (2008). Are numbers special? An overview of chronometric, neuroimaging, developmental and comparative studies of magnitude representation. *Progress in Neurobiology, 84*, 132–147.
- Cohen, K. R., Tzelgov, J., & Henik, A. (2008). A synesthetic walk on the mental number line: the size effect. *Cognition, 106*, 548–557.
- Cowan, N. (2000). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences, 24*, 87–185.
- Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General, 122*, 371–396.
- Dehaene, S., & Changeux, J. P. (1993). Development of elementary numerical abilities: a neuronal model. *Journal of Cognitive Neuroscience, 5*, 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.
- Dehaene, S., Dupoux, E. & Mehler, J. (1990). Is numerical comparison digital? Analogical and symbolic effects in two-digit number comparison. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 16*, 626–641.
- Dehaene, S., Izard, V., Pica, P., & Spelke, E. (2009). Response to Comment on “Log or Linear? Distinct Intuitions of the Number Scale in Western and Amazonian Indigene Cultures”. *Science, 323*, 38c.
- Dehaene, S., Izard, V., Spelke, E., & Pica, P. (2008). Log or linear? Distinct intuitions of the number scale in Western and Amazonian indigene cultures. *Science, 320*, 1217–1220.
- Di Luca, S., Grana, A., Semenza, C., Seron, X., & Pesenti, M. (2006). Finger-digit compatibility in Arabic numeral processing. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 59*, 1648–1663.
- Eger, E., Sterzer, P., Russ, M.O., Giraud, A.-L., & Kleinschmidt, A. (2003). A supramodal number representation in human intraparietal cortex. *Neuron, 37*, 719–725.
- Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences, 8*(7), 307–314.
- Fias, W., Lammertyn, J., Reynvoet, B., Dupont, P., & Orban, G. A. (2003). Parietal representation of symbolic and nonsymbolic magnitude. *Journal of Cognitive Neuroscience, 15*(1), 47–56.
- Fias, W., Lauwereyns, J., & Lammertyn, J. (2001). Irrelevant digits affect feature-based attention depending on the overlap of neural circuits. *Cognitive Brain Research, 12*, 415–423.
- Fischer, M. H. (2006). The future for SNARC could be stark. *Cortex, 42*, 1066–1068.
- Fischer, M. H., Castel, A. D., Dodd, M. D., & Pratt, J. (2003). Perceiving numbers causes spatial shifts of attention. *Nature Neuroscience, 6*, 555–556.
- Fulbright, R.K., Manson, S.C., Skudlarski, P., Lacadie, C.M., & Gore, J.C. (2003). Quantity determination and the distance effect with letters, numbers, and shapes: a functional MR imaging study of number processing. *American Journal of Neuroradiology, 23*, 193–200.
- Gallistel, C. R., Gelman, I. I. (2000). Non-verbal numerical cognition: from reals to integers. *Trends in Cognitive Sciences, 4*(2), 59–65.
- Goodale, M.A., Milner, A. D., Jakobson, L. S., & Carey, D.P. (1991). A neurological dissociation between perceiving objects and grasping them. *Nature, 349*, 154–156.
- Gottlieb, J. (2007). From thought to action: the parietal cortex as a bridge between perception, action, and cognition. *Neuron, 53*(1), 9–16.
- Halberda, J., & Feigenson, L. (2008). Developmental change in the acuity of the “Number Sense”: the approximate number system in 3-, 4-, 5-, and 6-year-olds and adults. *Developmental Psychology, 44*, 1457–1465.
- Henik, A., & Tzelgov, J. (1982). Is three greater than five: the relation between physical and semantic size in comparison tasks. *Memory & Cognition, 10*, 389–395.
- Hurewitz, F., Gelman, R., & Schnitzer, B. (2006). Sometimes area counts more than number. *PNAS, USA, 103*, 19599–19604.
- Hyde, D. C., & Spelke, E. S. (2009). All Numbers Are Not Equal: An Electrophysiological Investigation of Small and Large Number Representations. *Journal of Cognitive Neuroscience, 21*, 1039–1053.

- Ishihara, M., Keller, P. E., Rossetti, Y., & Prinz, W. (2008). Horizontal spatial representations of time: Evidence for the STEARC effect. *Cortex*, 44, 454–461.
- Izard, V., Dehaene, S. (2008). Calibrating the mental number line. *Cognition*, 106, 1221–1247.
- Izard, V., Dehaene-Lambertz, G., & Dehaene, S. (2008). Distinct Cerebral Pathways for Object Identity and Number in Human Infants. *PLoS Biology*, 6(2), e11.
- Jung, R. E., & Haier, R. J. (2007). The parieto-frontal integration theory (P-FIT) of intelligence: converging neuroimaging evidence. *Behavioral and Brain Sciences*, 30, 135–187.
- Kaufmann, L., Koppelaer, F., Delazer, M., Siedentopf, C., Rhomberg, P., Golaszewski, S., Felber, S., & Ischebeck, A. (2005). Neural correlates of distance and congruity effects in a numerical Stroop task: an event-related fMRI study. *Neuroimage*, 25, 888–898.
- Kaufman, E. L., Lord, M. W., Reese, T. W., & Volkmann, J. (1949). The discrimination of visual number. *American Journal of Psychology*, 62, 498–525.
- Lefebvre, H. (1991). *The production of space*. Nicholson-Smith, D. (Trans.). Blackwell Publishing Ltd. pp.1–2.
- Lindemann, O., Abolafia, J. M., Pratt, J., & Bekkering, H. (2008). Coding strategies in number space: Memory requirements influence spatial-numerical associations. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61, 515–524.
- Marois, R., Chun, M. M., & Gore, J. C. (2000). Neural correlates of the attentional blink. *Neuron*, 28, 299–308.
- McCrink, K., Dehaene, S., & Dehaene-Lambertz, G. (2007). Moving along the number line: operational momentum in nonsymbolic arithmetic. *Perception and Psychophysics*, 69, 1324–1333.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63, 81–97.
- Moyer, R.S., & Landauer, T.K. (1967). Time required for judgment of numerical inequality. *Nature*, 215, 1519–1520.
- Nieder, A., & Merten, K. (2007). A labeled-line code for small and large numerosities in the monkey prefrontal cortex. *Journal of Neuroscience*, 27, 5986–5993.
- Ooi, T. L., Wu, B., & He, Z. J. (2001). Distance determined by the angular declination below the horizon. *Nature*, 414, 197–200.
- Piazza, M., & Izard, V. (2009). How Humans Count: Numerosity and the Parietal Cortex. *The Neuroscientist*, 15, 261–273.
- Piazza, M., Izard, V., Pinel, P., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2004). Tuning curves for approximate numerosity in the human intraparietal sulcus. *Neuron*, 44, 547–555.
- Pica, P., Lemer, C., Izard, V., & Dehaene, S. (2004). Exact and approximate arithmetic in an Amazonian indigenous group. *Science*, 306(5695), 499–503.
- Pinel, P., Piazza, M., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2004). Distributed and overlapping cerebral representations of number, size, and luminance during comparative judgments. *Neuron*, 41(6), 983–993.
- Rusconi, E., Kwan, B., Giordano, B. L., Umlita, C., & Butterworth, B. (2006). Spatial representation of pitch height: the SMARC effect. *Cognition*, 99, 113–129.
- Sapir, A., d'Avossa, G., McAvoy, M., Shulman, G. L., & Corbetta, M. (2005). Brain signals for spatial attention predict performance in a motion discrimination task. *PNAS, USA*, 102, 17810–17815.
- Shaki, S., & Algom, D. (2002). The locus and nature of semantic congruity in symbolic comparison: evidence from the Stroop effect. *Memory & Cognition*, 30, 3–17.
- Tang, J., Critchley, H. D., Glaser, D., Dolan, R.J., & Butterworth, B. (2006). Imaging informational conflict: a functional magnetic resonance imaging study of numerical Stroop. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18, 2049–2062.
- Terrace, H. S. (2005). The simultaneous chain: a new approach to serial learning. *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 202–210.
- Tudusciuc, O., & Nieder, A. (2007). Neuronal population coding of continuous and discrete quantity in the primate posterior parietal cortex. *PNAS, USA*, 104, 14513–14518.
- Verguts, T., Fias, W., & Stevens, M. (2005). A model of exact small-number representation. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12, 66–80.
- Vicario, C. M., Pecoraro, M., Turriani, P., Koch, G., Caltagirone, C., & Oliveri, M. (2008). Relativistic Compression and Expansion of Experiential Time in the Left and Right Space. *PLoS ONE*, 3(3), e1716.
- Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 483–488.
- Welford, A.T. (1960). The measurement of sensory-motor performance: survey and reappraisal of twelve years' progress. *Ergonomics*, 3, 189–230.
- Wojciulik, E., & Kanwisher, N. (1999). The generality of parietal involvement in visual attention. *Neuron*, 23, 747–776.
- Wu, B., Ooi, T. L., & He, Z. J. (2004). Perceiving distance accurately by a directional process of integrating ground information. *Nature*, 428, 73–77.
- Xu, F. (2003). Numerosity discrimination in infants: Evidence for two systems of representations. *Cognition*, 89,

- B15–B25.
- Zebian, S. (2005). Linkages between number concepts, spatial thinking, and directionality of writing: the SNARC effect and the reverse SNARC effect in English and Arabic monoliterates, biliterates and illiterate Arabic speakers. *Journal of Cognition and Culture*, 5, 165–191.

## The Psychological Representation of Spacial Quantification

WANG Yi-Feng; ZHANG Li; LIU Chun-Lei; LI Hong

(Key Laboratory of Cognition and Personality (MOE), School of Psychology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** The quantification of space as the basis of spacial perception, is associated with particular spacial characteristics. Discrete magnitude and continuous quantity reflect the discrete and continuous characteristics of space, respectively. Similar behavioral effects and overlapped neural representations were found in the both processes. Evidences from behavioral and neural researches suggested that there may be a common characterization of the two types of magnitude, namely analog magnitude representation. Furthermore, number-space mappings provided a direct evidence for relationships of number and space. However, there are still many mysteries in the domain of spacial quantification now, such as the dynamic representation of spacial quantification, the pervasiveness of quantitative mechanism, the problem of anchor point, the quantification of complex and multi-dimentional space, and so on. Future studies should make a more profound answer to the mental representation of spacial characteristics, within the framework of embodied cognition.

**Key words:** quantification; space; continuous quantity; discrete magnitude; number-space mappings