

语言系统对不同数量系统的影响机制*

王 璿^{1,2} 邓 园¹

(¹中国科学院心理研究所行为科学重点实验室, 北京 100101) (²中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 已有研究较一致地发现语言加工系统对不同的数量加工系统起到不同作用, 表现为语言不影响概略数量和小数加工系统, 主要影响大数的精确加工系统。然而, 其影响机制并不明确。新近几年采用跟踪测验、语言转换、同语言内语音长度操控、双任务等范式来探索数量加工对语言依赖性的行为和脑机制研究。但结论不完全一致。通过记忆中介的视角可以为这些不一致提供新的解释。未来相关研究的思路应包括跟踪语言关键期幼儿的数学系统发展轨迹, 注意区分在记忆不同层面(长时/短时)中介下语言系统对数量系统的影响, 关注语义句法等对数量系统的作用, 以及深入了解基础四则运算的认知神经机制。

关键词 概略数量系统; 精确数量系统; 语言系统; 工作记忆; 长时记忆

分类号 B842

近年来, 关于数学加工系统和语言加工系统之间的关系问题成为了越来越受关注的研究热点。数学能力的发展是否依赖于语言? 在何种程度上数学能力发展依赖于语言? 语言如何影响数学能力发展? 等等问题都有相应研究提出不同的观点和证据。本文力图梳理近年来针对独立于/依赖于语言的数学能力发展的各种最新研究结果, 其中也包括较新的脑科学证据, 以便为未来的研究提供思路。

1 数量表征/加工系统的划分

前人研究认为, 数量的表征/加工系统大致分为两种: 概略数量系统(approximate number system, ANS)和精确数量系统(exact number system)。概略数量系统表现为模糊估计, 粗略地表征和加工物体的数量幅度(贺丽霞, 2012), 其特点在于不精确性(Halberda, Mazzocco, & Feigenson, 2008)。概略数量系统遵循量级比例效应(magnitude ratio effect), 即韦伯定律(当两组量之间的差异比例逐渐接近于 1 时, 判断二者差异的难度会不断增加)。从大脑神经基础上说, 很多

研究发现进行概略数量加工的主要区域是双侧顶内沟区域(intraparietal sulcus, IPS)和前额叶(prefrontal cortex, PFC)(综述见 Cantlon, 2012; Nieder & Dehaene, 2009)。与概略数量系统相对应, 精确数量系统是一种对间隔为 1 的数量进行感知、表征和加工的系统, 如精确地数出物体的个数、精确地进行加减乘除等算术运算。精确数量系统又可细分为小数(小于 4)和大数(大于 4)两个系统。小数系统也被认为是一种原始的数量表征系统, 其激活脑区主要是右侧颞顶联合处(temporo-parietal junction)(王乃弋, 罗跃嘉, 李红, 2006; 贺丽霞, 2012); 而对大数的精确表征/加工会涉及到与多种认知能力如注意、记忆、语言等相关的脑区, 且随着任务的不同激活脑区也会变化。

已有的关于数学与语言关系的研究均涵盖了以上两种数量系统, 既有只针对其中一种数量系统进行研究的也有同时考察两个数量系统的。根据已有研究, 我们发现语言系统和数量系统的关系并不是一成不变的, 语言对不同的数量系统起到的作用有所不同。总的来看, 可以分为 3 种观点: (1)语言不影响概数和小的数量系统; (2)语言对大数精确数量系统起到辅助作用; (3)语言系统对数量系统的影响与工作记忆系统的参与密不可分。以下就从这三方面具体阐述。

收稿日期: 2013-07-30

* 国家自然科学基金资助项目(31271193)。

通讯作者: 邓园, E-mail: dengy@psych.ac.cn

2 概数和小数系统不受语言影响

要考察语言系统是否对数量系统有影响, 最直接的做法就是将没有发展出语言的动物、婴儿以及缺乏数字语言的部落人作为研究对象, 考察这些群体是否仍然具有数量表征及加工的能力。如果发现这些没有数量语言系统的群体与有数量语言系统的成人在数量表征/加工上几乎相同, 那么就可以认为数量系统的存在是具有原始进化基础的, 不受到语言的影响(Pica, Lemer, Izard, & Dehaene, 2004; Gordon, 2004)。

Cantlon 和 Brannon (2005)通过对猴子进行训练, 使猴子学会根据颜色提示从两个数中选择大的或小的数(红色背景时选择小的, 蓝色背景时选择大的)。进行实验的数字为 1 到 9。结果发现, 猴子的行为表现出一种典型的语义一致性效应, 即在小数之间进行比较时(2 比 3), 回答哪个数更小的速度更快, 而在大数之间进行比较时(7 比 9), 回答哪个数更大的速度更快。因为猴子没有语言系统, 所以大小比较的机制可能是一种原始的、不借助于语言的认知机制。更进一步, Cantlon 和 Brannon (2007)比较了猴子和成人进行加法运算的差异。实验过程中在屏幕上间隔地呈现两组点, 之后出现两个备选的答案, 被试任务是进行点数的加法, 选出正确的答案。结果发现, 猴子能够进行加法运算, 尽管其总体正确率比成人的低, 但反应的模式和成人的十分相似, 也就是随着答案点数之间差别的减小, 正确率下降, 遵循概略数量系统的韦伯定律。这一结果说明算术(加法)可能也是独立于语言的、原始进化而来的能力。

很多关于婴儿数学能力的研究表明, 婴儿已经具有了概略数量系统和小数精确系统(总结见刘锋, 陈旭, 2009)。例如, 婴儿对不可能发生的事件(如 $1+1=1$)的注视时间要远远长于可预期的事件(如 $1+1=2$)。Hyde, Parreno 和 Spelke (2012)发现婴儿在点数加法运算时, 在顶叶区域也本能地激活了类似于成人的大脑活动(P2p, 即刺激后 250ms 达到峰值的 ERP 波, 其波幅受到测试点数与实际点数和之比的调节), 表明婴儿和成人使用了相似的数量运算的神经网络。

世界上还存在一些部落群体, 这些人群通常很少受过教育, 几乎没有接触过测量工具, 他们的语言体系里面缺乏对数字的描述(即数词)或只

有 5 以下的数字语言。Butterworth, Reeve, Reynolds 和 Lloyd (2008)以澳大利亚的两个部落里 4~7 岁儿童为被试, 要求他们对数量(2~9)进行记忆。具体做法是逐一地摆放物体给被试看, 分随意和有序两种摆放方式, 然后用垫子盖上, 让被试把动作完全重复出来。结果显示, 这些部落儿童的成绩和正常英语环境下儿童的成绩没有差异。此外, 在有序摆放的条件下, 部落儿童更倾向于按照目标摆放的空间顺序重复。这些结果说明, 对物体数量(甚至包括较大的数)的记忆和匹配是可以脱离数字语言的, 完全可以使用空间策略来辅助记忆。该研究还对比了其它涉及精确数量系统的任务, 诸如记忆个数、声音和个数的跨通道匹配、非言语精确加法等, 结果也没有发现语言差异的效应。Dehaene, Izard, Spelke 和 Pica (2008)以亚马逊部落的 Mundurucu 人为被试。要求他们进行数量空间映射任务(number space mapping task), 即根据数量大小将点数、音调、部落语的数词和葡萄牙语数词放在 0~10 或 10~100 数轴上的相应位置。结果发现, 和受过文化教育的美国人相比, 该部落人的数量空间映射表现出更明显的“对数化”, 即数量越大其空间表征越靠近, 遵循韦伯定律。此外, 一部分受过较多葡萄牙语教育的部落人在葡萄牙数词的摆放上呈现线性(即数量空间表征精确化), 但在对点数和部落语数词的排列上仍是对数化的表现。因此, 研究者认为人类的数量系统的空间表征从对数到线性的过程, 并不是由数词和口头数数能力决定的, 而可能是由测量经验决定, 数字单元对应固定的距离或者由于加减法运算经验使得人们产生了所有连续数字间隔为 1 的直觉。也就是说语言系统对于概数表征系统并没有影响。

3 大数精确数量系统与语言密切相关

以上的研究发现, 数量表征/加工中的概数系统似乎是独立于语言的。然而, 根据其它研究发现, 对数量精确系统的表征和加工则和语言密切相关。例如, Spaepen, Coppola, Spelke, Carey 和 Goldin-Meadow (2011)以听觉丧失且没有学习过手语的 Nicaragua 人为被试, 发现即使他们生活在有精确数量运算的文化环境下, 也不能正确地用手指表示或准确匹配大于 3 的数量。这一结果说明, 个体在缺乏传统语言的输入时不会本能地发

展出大数的精确数量系统,语言是发展大数精确数量系统所必需的。

经过分析,我们发现考察数量精确系统和语言系统之间关系的研究可以归为以下3个核心思路:(1)两个系统是否具有相似的特性?(2)语言系统影响数量系统的表现有哪些?(3)语言系统影响数量系统的内在机制是什么?

3.1 两个系统是否具有相似的特性

语言和数学都是借助抽象符号进行思维的工具,很多研究都发现人类加工语言和数学的认知过程具有相似之处。例如,有研究发现语言和算术具有语义关系的相似性。Bassok, Chase 和 Martin (1998)发现在数学文字题中,当出现类别相关概念时(如“梅花”和“菊花”),人们倾向于将它们视为加法关系;当出现功能相关时(如“苹果”和“果篮”),人们倾向于将它们视为除法关系。陈栩茜、何本炫和张积家(2012)采用语义启动数字匹配的任务范式及其变式,发现数学知识和语义知识的一致性是一种强烈的认知倾向,推测其基础是思维中的类比映射机制。再例如,有研究发现语言和算术的结构具有相似性。王乃弋(2008)采用事件相关电位(ERP)技术,发现对算式的结构加工和对语言的语法加工有着很强的相似性,两者均激发了晚正成分 LPC (late-positive-component) 中的 P600 脑电波形。而在语言研究中发现的 P600 成分被认为是所有按照内在规则构成的认知序列的结构进行加工的一般神经指标。因此,研究者推测对元素之间结构依存关系的加工可能是人类语言加工和数学算式加工的共同机制之一。

3.2 语言系统影响数量系统的表现

3.2.1 跟踪调查

对语言系统和数学系统两者相互影响的研究可以从跟踪调查入手。例如,Passolunghi 和 Lanfranchi (2012)通过纵向跟踪测验和结构方程模型分析,发现幼儿园时期的言语智力能够直接预测小学一年级的数学成绩,也能够通过工作记忆间接影响数感,从而影响早期数学成绩。这些结果说明语言能力和数学能力通过某些相同的认知因素而相互影响。Grimm (2008)对儿童进行了从三年级到八年级的跟踪测验,发现小学早期阅读理解能力能够预测其数学成绩的提高幅度,并且在问题解决和数据解释类题型中的预测力最强。Wei 等(2012)对8到11岁的儿童进行算术(减

法和乘法)、数量加工(数字比较、数量估计、数字序列)、词汇韵脚判断和一般认知(选择反应时、瑞文图形推理和心理旋转)任务等测试。结果发现女生的算术成绩显著好于男生,但是在控制了词汇韵脚判断成绩后,性别差异消失。这一结果表明,女生在算术成绩上的优势很可能是由于其在语言加工上的优势导致的。Vukovic 和 Lesaux (2013)对小学一年级的儿童跟踪到四年级,结果发现语言能力能显著预测其数据分析/概率和几何成绩,但不能预测算术和代数能力。研究者推测语言可能并不是直接参与/影响数量操控和执行运算,而是参与/影响对数学内容的理解。

3.2.2 语言转化范式

很多通过实验操纵来探索语言系统对数量系统影响的研究常采用不同语言转化的研究范式。此范式通过操控被试使用不同语言来测量其数学表现的差异,从而得出语言的变换是否对数量加工有影响。

行为研究方面,Spelke 和 Tsivkin (2001)训练俄-英双语者用一种语言学习7进位制的加法精确运算和立方根估算,之后分别用两种语言进行测试。结果发现,对用训练过语言呈现的精确数量进行运算比对用未训练过语言呈现的精确数量进行运算的表现更好(即语言转换效应),而进行概略运算时在训练过和未训练过的语言之间没有差异。这一结果说明精确运算的算术事实是以学习时的语言来存储,而概略数量的加工并不依赖于语言。张静、王静和陈英和(2009)采用相同的范式进行了新疆语-汉语双语者的训练,也得出了类似的结论。杨佃霞(2007)使用了单通道(听觉)和跨通道刺激(视觉+听觉)的汉-英双语者训练学习和测验,发现在单通道的双语者训练范式下,结果和以往研究类似,语言转换效应只出现在精确数量运算中。但是在跨通道的情况下,用汉语训练但用英语测试(语言转换)对两种计算都有影响,而用英语训练用汉语测试对两种计算都没有影响。

在一些采用语言转化范式的研究中发现一种“提取诱发遗忘”效应(RIF, retrieval-induced forgetting)。该效应是一种在算术中的消极转换,表现为回答乘法问题(如 $4 \times 5 = ?$)将会抑制其相对应的加法问题($4 + 5 = ?$)的回答。利用该效应研究的逻辑是,如果对加法事实的长时记忆是依赖语言的,那么当乘法和加法是同一种语言时,将会

产生 RIF; 而不同语言条件下的乘法提取不会抑制测试中相应的加法事实, 反而会起到促进作用。Campbell 和 Dowd (2012)使用该范式进行了汉-英双语者的研究。结果表明, 在大问题条件下(即两个操作数之和大于 10), 在用相同语言呈现刺激时比用不同语言呈现刺激时的反应时要显著地长 75ms, 即语言特异性的 RIF 效应。这一结果说明较大数量的加法事实是以语言存储的。

脑成像研究方面, Venkatraman, Siong, Chee 和 Ansari (2006)对英-中双语者采用了类似 Spelke 和 Tsivkin (2001)的训练范式, 让被试只用一种语言学习精算和估算, 然后用两种语言分别呈现测试, 用功能磁共振技术扫描测试时的脑区激活情况。结果发现, 精确运算条件下的语言转换效应表现在左侧额下回、左侧顶下小叶、角回等和语言加工相关脑区; 而概略计算条件下的语言转换效应出现在双侧后顶叶皮层、更靠近背侧的左侧额下等更涉及视觉空间、非言语数量加工或注意相关的脑区。Lin, Imada 和 Kuhl (2012)向中-英双语者被试分别呈现第一语言(L1, 汉语)和第二语言(L2, 英语)的听觉刺激, 要求被试进行两位数加法的精确运算和估计运算(即将每个加数四舍五入为整十, 然后相加)。结果发现听觉刺激以 L2 呈现比以 L1 呈现的情况激活了更强的左侧额下脑区活动, 这说明用非熟练语言进行数学运算需要更多的注意和记忆资源。此外, 在 L2 刺激的条件下进行心理运算时, 左侧顶叶下部的激活强度和行为表现呈现显著负相关。研究者推测, 在非熟练语言下进行加法运算比较难从记忆中获得加法事实, 因此需要更多地激活和数量操作加工有关的顶叶区域。该研究支持了加法算术事实以母语的语言形式存储的观点。

事件相关电位(ERP)的研究也支持了算术知识是以早期学习语言存储的。Salillas 和 Wicha (2012)以西班牙语-英语的双语者为被试, 他们均只以其中一种语言学习过算术知识。要求被试对阿拉伯数字和两种语言分别呈现的简单乘法事实进行正误判断, 并进行了被试的语言熟练性测试。结果发现在双语者的大脑中, 对用早期学习语言呈现的乘法事实进行判断比用另一种语言呈现时产生的脑电激活更强, 前者更类似于阿拉伯数字呈现时的脑电激活, 表明算术的表征是建立在学习时语言的基础上, 并且和母语或熟练语无

关。该研究控制了双语训练范式中的语言熟练度干扰, 进一步证实了算术事实(尤其是乘法)存储对语言的依赖。

3.2.3 同种数字语言内部进行语音操控

跨文化或双语的研究无法排除教育、经验或语言熟练度等因素的影响, 而在一种语言内部通过操纵语音长度能直接地考察语言对算术精确运算的影响。然而此类的研究非常少。Klessinger, Szczerbinski 和 Varley (2012)利用英语中的“Seven”(7)具有两个音节而其他的数词只有一个音节的特点, 将加法算术中涉及的语音长度分为 3 种: short_1 (例如 $45+18$, 5 个音节)、short_2 (例如 $48+15$, 5 个音节)、long (例如 $47+16$, 6 个音节)。结果发现, 年轻被试表现出显著的语音长度效应, 即音节越长反应越慢。而在年长被试(47~75 岁)里没有这一效应。这些结果或许表明语音对于数学不熟练者起到了一种辅助的作用。

3.2.4 双任务范式

双任务, 即在同一时间内执行两种不同的任务。就数学研究而言, 如果一种算术任务需要某种类型的认知资源, 而这种认知资源被另一种任务占用, 则会干扰该算术任务的完成效果, 从而确定该算术任务是否需要某种类型的认知资源。

采用双任务探讨语言与数量加工关系的研究通常采用语音任务作为干扰任务, 考察其对精确数量加工的影响。研究发现, 语音干扰还会抑制精确数量的匹配。例如, Frank, Fedorenko, Lai, Saxe 和 Gibson (2012)给英语者被试呈现精确数量匹配任务, 同时给予语音干扰任务。通过和 Frank, Everett, Fedorenko 和 Gibson (2008)对亚马逊地区部落 Pirahã 人的测试结果进行对比, 结果发现受到语音干扰的英语被试在精确数量匹配任务上的表现和 Pirahã 人类似。研究者推测在语音干扰下, 英语者比较难运用语音或其他策略来辅助进行数量表征, 只能按照原始进化的概略数量表征来进行匹配。进一步的实验也表明语音干扰效应在精确数量匹配的编码阶段要强于提取阶段, 而且语音干扰强于空间干扰。章雷钢和水仁德(2012)发现字母辨认能够影响大数(>5)的辨认, 而不影响小数(<4)的辨认, 并推测小数是空间表征, 而大数的精确表征则是语义表征, 需要语音回路的参与。还有研究证实, 语音干扰任务会影响乘法运算(Lee & Kang, 2002), 并进一步认为乘法事实是

通过语音存储的(Moeller, Klein, Fischer, Nuerk, & Willmes, 2011)。然而, 语音任务的干扰似乎并不会影响减法运算(Lee & Kang, 2002), 减法任务却会被空间图形判断的干扰任务所影响(Moeller et al., 2011)。来自脑成像的研究也证实了乘法运算和减法运算在脑区活动上存在分离(Prado et al., 2011; Yu et al., 2011; Benn, Zheng, Wilkinson, Siegal, & Varley, 2012)。乘法相对于减法其更大地激活颞中回(MTG)和额下回(IFG), 即更多地依赖于言语加工所需要的脑区(Prado et al., 2011; Mutreja, Prado, & Booth, 2012)。

还有研究考察了语法复杂性对精确算术加工的影响, 但是结果存在争议(Fedorenko, Gibson, & Rohde, 2007; Evans, Caplan, & Waters, 2011), 并不能确定句法/语法加工是否会影响精确算术的运算过程。

3.3 语言系统影响数量系统的内在机制

根据以上对已有文献的分析, 比较一致的观点认为概略及小数数量的表征/加工系统相对独立于语言, 而依赖于大数量的精确数量表征及加工则更多地受到语言的影响。然而, 目前仍不清楚的是语言系统是如何影响数量系统的表征和数量加工的。关于这一点的研究甚少, 也没有得到清晰的结论。如前所述, 语言和数学都是借助抽象符号进行思维的工具, 因此两个系统或许存在共同的基础, 也可以说语言系统对数量系统的影响可能是通过某种中介系统实现的。其中, 最有可能相关的系统就是记忆系统。

从编码的角度来看, 比较典型的模型是Dehaene(1992), Dehaene和Cohen(1996)提出的三编码模型(triple-code model)。该模型认为, 数量表征有3个基本模块: 类比数量编码、视觉-阿拉伯数字编码和听觉-言语编码。输入形式的不同决定了编码的不同, 不同模块和不同的数学认知功能相联系。具体来说, 类比数量编码主要和数字比较、估算, 即和独立于语言的概略表征系统有关。视觉编码主要负责奇偶性判断、数位空间操作。听觉-言语编码主要负责数数、数学事实(主要是存储在长时记忆中便于快速提取的加法和乘法事实)的存储和提取, 表明了语言和长时记忆系统与大数精确加工的关系。研究者还认为, 该模型的3个模块之间可以相互转换, 复杂的心理算术可能同时涉及了视觉-空间和听觉-言语编码的共同表征。

从加工过程的角度来看, 已有很多以往研究发现工作记忆在数量加工中扮演重要角色(Zago et al., 2008; 连四清, 林崇德, 2007)。Baddeley和Hitch(1974)提出了被广泛应用的三成分工作记忆模型, 其中包含语音回路、视空间面板和中央执行功能。而语音回路是工作记忆系统中与语言关系最紧密的核心成分, 所以语言也极有可能是通过语音工作记忆系统来对精确数量系统的操作产生影响的。

以上两个理论的角度各有不同, 三编码模型主要侧重数量表征形式, 和长时记忆有关, 而语音环路的理论主要侧重了数量加工操作过程, 和短时记忆有关。统合以上两种理论, 以下从任务分析的角度来看以往研究范式中对数学语言的操控, 具体来说就是看语言是如何通过辅助数学事实的长时记忆和工作记忆来影响数量表征和加工的。

先看关于缺乏数词的原始部落人群的研究, 有研究证据表明他们是能够进行较大数量(如2~9)的精确数量匹配或重复的(Butterworth et al., 2008)。但是, 对于更大/更精确数量的加工任务, 对工作记忆有更高的要求, 此类个体往往不能完成。例如, Frank等(2008)以一个来自亚马逊地区部落的Pirahã人为被试, 发现这些部落人群可以很好地完成不掩盖目标物的一对一精确匹配任务, 但在需要记忆的掩盖目标物的匹配任务上, 表现出不精确性。这一结果表明, 语言似乎并不是表征精确数量加工所必需的, 而是一种在需要记忆/加工大数量时的辅助认知策略。而当缺乏这种策略时, 精确数量的数学任务完成有困难。

再看双语者训练范式和RIF效应, 或许可以看成是在探索语言在数学事实的长时记忆存储中的作用。具体来说, 双语者训练是通过用不同的语言学习新的算术事实(如非10进制制加法), 将该算术事实存入长时记忆。如果该算术事实是通过某一语言存入记忆的, 那么在测试中变换一种语言, 被试需要经历一次翻译的过程, 所以反应时和正确率都会有所变化。RIF则是利用算术网络的激活和抑制来探索算术事实的长期记忆存储方式。如果这些记忆的存储形式是语音的, 那么换一种语言加工就不会有抑制作用。而一篇跨通道的双语范式研究之所以得到了不太一致的结果(杨佃霞, 2007), 可能是由于被试用第二语言(英

语),以语音的方式存储在长时记忆中的数学事实还不牢靠,在视听跨通道条件下,试被有了可以进行视觉空间加工的机会,因而运用了其他辅助策略来完成精确表征任务,所以才没有看到语言对数学运算的影响。这一现象可以用 Dehaene 和 Cohen (1996)的理论进行解释:当面临复杂的算术运算时,存储在长时记忆中,以听觉-言语形式表征的数学事实不能迅速提取,就会在3种编码之间转换,以其他的编码方式完成数学的认知加工任务并产出相应答案。

最后,双任务范式和同种语言内数学语言的语音长短控制可以看作是对数学事实所依赖的工作记忆进行操控。很多研究结果比较一致地表明,需要短时记忆的精确数量加工任务往往需要语音的辅助(例如较大数量的精确数量匹配),而不依赖于短时记忆,更多依赖数量操纵的精确数量任务与语言关系则较小(例如减法运算)。来自神经成像的证据也支持这种功能的分离(Pinel & Dehaene, 2010; Zhou, Lu, Prado, & Booth, 2012)。

综上,两种理论在解释不同记忆层面下语言对精确大数量加工各有优势,二者也有相通之处,即在语言作为一种数学事实的记忆辅助的策略失效时,均存在视觉空间表征来辅助精确大数量的短时记忆或加工,脑神经研究(Cantlon, Platt, & Brannon, 2009; Cantlon, Libertus, et al., 2009)也表明符号和非符号数量表征均会激活顶叶皮层(和空间认知有关),也一定程度上反映了空间加工对于数量表征的作用。

4 结论及展望

综合以往的研究,关于概略数量系统和小数精确系统与语言的关系逐渐清晰化。总的来说,概略数量系统和小数的精确数量系统都属于独立于语言的、原始的能力,而对大数(大于4)进行表征和加工的精确数量系统则包含着更多复杂的认知能力。语言对大数的精确数量表征和加工起到重要的辅助作用,尤其是在需要记忆的情况下,但不同的大数精确算术因涉及的记忆提取程度不同,语言对其的影响程度也不同。其中,乘法事实的存储和提取对语音系统具有较高的依赖性;减法运算对语言的依赖性较低;语言的综合理解能力则参与更高级数学的理解。

为了更清晰地描绘语言和精确数量表征的复

杂关系及其影响机制,以后的研究需要考虑以下一些问题:

首先,未来需要更多地开展追踪性的研究,特别是围绕语言获得敏感期的范围。通过对比幼儿在语言获得前后数量表征/加工上的差异,考察语言的获得及发展对数量系统的发展有何影响。

其次,未来的研究应更注重从记忆中介的角度考察语言加工与数量加工的对比/相互影响,特别是需要区分语音回路系统的不同方面(例如,短时/长时)。以往的研究范式通常只是独立地从记忆的其中一个角度来进行探索,而且采用的精确数量任务也不一样,所以并没有从整体上清晰地回答在记忆的不同层面上语言对精确数量任务的影响是怎样的。

再次,未来的研究应更多地考察语言的其它方面/水平的加工对数量表征/加工系统的影响。以往大部分的研究主要探索了语音对精确数量系统的影响机制。但是,关于语言的其他成分,如语义、句法/语法是如何影响精确数量加工的研究则非常缺乏。少量研究揭示了语言中语义、语法和算式规则具有一致的认知倾向。还有少量研究探索了语法对算术的影响,但所得结论并不一致。由于语言中的语义和句法比语音更为复杂,而且它们对基本数学认知的影响可能是以其它一般认知系统为中介的,因此探索起来并不容易,在实验设计及思路上需要更加精细和巧妙。

最后,未来的研究应该更深入地研究数量系统里最基础的四则运算所依赖的认知机制和神经基础。目前行为和脑成像的证据都较一致地认为加法和乘法对语言较为依赖。有研究认为减法更依赖空间认知加工,但也有不一致的结论。而对于更为复杂的运算除法几乎没有涉及。减法和除法作为加法和乘法的逆运算,在学习过程中可能无法直接通过语言记忆达到快速运算的效果,但其中到底包含了哪些认知过程和策略、借助了哪些大脑网络仍然不得而知。研究基础的数学运算所依赖的认知过程不仅对基础的数学认知理论有贡献,而且必然会对数学教学实践、数学加工障碍的矫治起到重要的推进作用。

参考文献

陈树茜,何本炫,张积家.(2012).加法运算中数学知识和语义知识的整合.《心理学报》,44(6),720-734.

- 贺丽霞. (2012). 数学能力的脑与认知科学研究及其对早期数学教育的启示. *全球教育展望*, 41(9), 41–46.
- 连四清, 林崇德. (2007). 工作记忆在数学运算过程中的作用. *心理科学进展*, 15(1), 36–41.
- 刘锋, 陈旭. (2009). 婴儿的数认知核心系统. *心理科学进展*, 17(1), 78–85.
- 王乃弋, 罗跃嘉, 李红. (2006). 两种数量表征系统. *心理科学进展*, 14(4), 610–617.
- 王乃弋. (2008). *数学算式结构加工的ERP研究* (博士学位论文). 西南大学, 重庆.
- 杨佃霞. (2009). *语言转换对数字计算的影响* (硕士学位论文). 山东师范大学.
- 张静, 王静, 陈英和. (2009, 11月). 语言对数字精确表征和近似表征的影响: 一个双语学习研究. 第十二届全国心理学学术大会论文摘要集. 济南.
- 章雷钢, 水仁德. (2012). 语义信息在大小数量表征中的作用. *应用心理学*, 18(1), 32–39.
- Baddeley, A.D., & Hitch, G. (1974). *Working memory*. In G.H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (Vol. 8, pp.47–89). New York: Academic Press.
- Bassok, M., Chase, V. M., & Martin, S. A. (1998). Adding apples and oranges: Alignment of semantic and formal knowledge. *Cognitive Psychology*, 35(2), 99–134.
- Benn, Y., Zheng, Y., Wilkinson, I. D., Siegal, M., & Varley, R. (2012). Language in calculation: A core mechanism? *Neuropsychologia*, 50(1), 1–10.
- Butterworth, B., Reeve, R., Reynolds, F., & Lloyd, D. (2008). Numerical thought with and without words: Evidence from indigenous Australian children. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(35), 13179–13184.
- Campbell, J. I. D., & Dowd, R. R. (2012). Interoperation transfer in Chinese-English bilinguals' arithmetic. *Psychonomic Bulletin & Review*, 19(5), 948–954.
- Cantlon, J. F. (2012). Math, monkeys, and the developing brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(Suppl 1), 10725–10732.
- Cantlon, J. F., & Brannon, E. M. (2005). Semantic congruity affects numerical judgments similarly in monkeys and humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(45), 16507–16511.
- Cantlon, J. F., & Brannon, E. M. (2007). Basic math in monkeys and college students. *Plos Biology*, 5(12), e328.
- Cantlon, J. F., Libertus, M. E., Pinel, P., Dehaene, S., Brannon, E. M., & Pelphrey, K.A. (2009). The neural development of an abstract concept of number. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21(11), 2217–2229.
- Cantlon, J. F., Platt, M. L., & Brannon, E. M. (2009). Beyond the number domain. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(2), 83–91.
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44, 1–42.
- Dehaene, S., & Cohen, L. (1996). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition*, 1, 83–120.
- 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(5880), 1217–1220.
- Evans, W. S., Caplan, D., & Waters, G. (2011). Effects of concurrent arithmetical and syntactic complexity on self-paced reaction times and eye fixations. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18(6), 1203–1211.
- Fedorenko, E., Gibson, E., & Rohde, D. (2007). The nature of working memory in linguistic, arithmetic and spatial integration processes. *Journal of Memory and Language*, 56(2), 246–269.
- Frank, M. C., Everett, D. L., Fedorenko, E., & Gibson, E. (2008). Number as a cognitive technology: Evidence from Pirahã language and cognition. *Cognition*, 108(3), 819–824.
- Frank, M. C., Fedorenko, E., Lai, P., Saxe, R., & Gibson, E. (2012). Verbal interference suppresses exact numerical representation. *Cognitive Psychology*, 64(1–2), 74–92.
- Grimm, K. J. (2008). Longitudinal associations between reading and mathematics achievement. *Developmental Neuropsychology*, 33(3), 410–426.
- Gordon, P. (2004). Numerical cognition without words: evidence from Amazonia. *Science*, 306(5695), 496–499.
- Halberda, J., Mazocco, M. M., & Feigenson, L. (2008). Individual differences in non-verbal number acuity correlate with maths achievement. *Nature*, 455(7213), 665–668.
- Hyde, D., Parrero, K., & Spelke E. (2012). Common neural mechanisms of arithmetic in educated adults and preverbal infants. *The proceedings of Cognitive Neuroscience Society Conference*. Chicago, IL.
- Klessinger, N., Szczerbinski, M., & Varley, R. (2012). The role of number words: The phonological length effect in multidigit addition. *Memory & Cognition*, 40(8), 1289–1302.
- Lee, K. M., & Kang, S. Y. (2002). Arithmetic operation and working memory: Differential suppression in dual tasks. *Cognition*, 83(3), B63–B68.
- Lin, J. F., Imada, T., & Kuhl, P. K. (2012). Mental addition in bilinguals: An fMRI study of task-related and performance-related activation. *Cerebral Cortex*, 22(8), 1851–1861.
- Moeller, K., Klein, E., Fischer, M. H., Nuerk, H. C., & Willmes, K. (2011). Representation of multiplication facts—evidence for partial verbal coding. *Behavioral and Brain Functions*, 7, 25.
- Mutreja, R., Prado, J., & Booth, J. R. (2012). The neural development of arithmetic: Task dependent recycling of numerical and verbal mechanisms. Paper presented at the meeting of the *proceedings of Cognitive Neuroscience Society Conference*. Chicago, IL.
- Nieder, A., & Dehaene, S. (2009). Representation of number

- in the brain. *Annual Review of Neuroscience*, 32, 185–208.
- Passolunghi, M. C., & Lanfranchi, S. (2012). Domain-specific and domain-general precursors of mathematical achievement: A longitudinal study from kindergarten to first grade. *British Journal of Educational Psychology*, 82(Pt 1), 42–63.
- Pica, P., Lemer, C., Izard, V., & Dehaene, S. (2004). Exact and approximate arithmetic in an Amazonian indigene group. *Science*, 306(5695), 499–503.
- Pinel, P., & Dehaene, S. (2010). Beyond hemispheric dominance: Brain regions underlying the joint lateralization of language and arithmetic to the left hemisphere. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(1), 48–66.
- Prado, J., Mutreja, R., Zhang, H. C., Mehta, R., Desroches, A. S., Minas, J. E., & Booth, J. R. (2011). Distinct representations of subtraction and multiplication in the neural systems for numerosity and language. *Human Brain Mapping*, 32(11), 1932–1947.
- Salillas, E., & Wicha, N. Y. Y. (2012). Early learning shapes the memory networks for arithmetic: Evidence from brain potentials in bilinguals. *Psychological Science*, 23(7), 745–755.
- Spaepen, E., Coppola, M., Spelke, E. S., Carey, S. E., & Goldin-Meadow, S. (2011). Number without a language model. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(8), 3163–3168.
- Spelke, E. S., & Tsivkin, S. (2001). Language and number: A bilingual training study. *Cognition*, 78(1), 45–88.
- Venkatraman, V., Siong, S. C., Chee, M. W. L., & Ansari, D. (2006). Effect of language switching on arithmetic: A bilingual fMRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(1), 64–74.
- Vukovic, R. K., & Lesaux, N. K. (2013). The language of mathematics: Investigating the ways language counts for children's mathematical development. *Journal of Experimental Child Psychology*, 115(2), 227–244.
- Wei, W., Lu, H., Zhao, H., Chen, C. S., Dong, Q., & Zhou, X. L. (2012). Gender differences in children's arithmetic performance are accounted for by gender differences in language abilities. *Psychological Science*, 23(3), 320–330.
- Yu, X. D., Chen, C. S., Pu, S., Wu, C. X., Li, Y. N., Jiang, T., & Zhou, X. L. (2011). Dissociation of subtraction and multiplication in the right parietal cortex: Evidence from intraoperative cortical electrostimulation. *Neuropsychologia*, 49(10), 2889–2895.
- Zago, L., Petit, L., Turbelin, M. R., Andersson, F., Vigneau, M., & Tzourio-Mazoyer, N. (2008). How verbal and spatial manipulation networks contribute to calculation: An fMRI study. *Neuropsychologia*, 46(9), 2403–2414.
- Zhou, X., Lu, J., Prado, J., & Booth, J. R. (2012). Common and distinct neural correlates of mathematical number series, geometric and word problems. Paper presented at the meeting of the proceedings of Human Brain Mapping Conference. Beijing, China.

The Effect of Language System on Different Numerical Systems in Human Cognition

WANG JIN^{1,2}; DENG YUAN¹

(¹ Key Laboratory of Behavioral Science, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Previous studies consistently found that the language processing system plays different roles in different kinds of numerical systems. Specifically, language processing influences the exact number system, whereas, there is no relationship between language and either the approximate number system or small number system. The mechanism underlying these relationships remains unclear. Recent behavioral and brain researchers have explored the reliance of numerical processing on language by using different paradigms such as longitudinal tests, language switching, dual tasks and phonological length operation within the same language.. However, these studies have not reached a consensus. Here we propose a novel explanation for this inconsistency from a perspective of memory mediation. Future research should include the number system development trace of children during their language-acquiring age. In addition, more studies should be done to see how long term and short term memory systems have effect on the relationship between language and number, how semantic and grammar influence number system, and to investigate the cognitive and neural basis of four basic number operations.

Key words: approximate number system; exact number system; language system; working memory; long-term memory