

## 数字加工的认知神经基础\*

南云 罗跃嘉

(中国科学院心理研究所心理健康重点实验室, 北京 100101)

**摘要** 数学作为人类最重要的发明, 越来越引起认知神经科学家的重视与关注, 究竟什么才是人类数学知识的脑基础? 脑成像的研究已经证实了一个参与数学运算加工的神经网络, 包括顶叶皮质、侧前额叶皮质、内前额叶皮质、和小脑。实验证明: 人脑对于数字具有一种模拟表达, 类似于将数量在脑内部作为一种内心的数字线上的点来操作。神经心理学的研究证实数字加工的这种数量表达分布于两半球, 其优势区位于下顶叶皮质区。

**关键词** 数字加工, ERP(事件相关电位), 下顶叶。

**分类号** B842.3

### 1 数字加工的生物进化特征

近年来, 许多研究已经证明了尚未掌握语言的婴幼儿具有数字辨别能力和基本计算能力。经典习惯化-恢复实验(habituation-recovery of looking time)的视觉数字辨别作业表明: 婴幼儿天生具有数字的辨别能力<sup>[1]</sup>。6个月的婴儿已经可以识别视觉事件的数量: 如洋娃娃跳了两下或三下。另有证据表明, 6~8个月的婴儿具有跨通道的数字匹配能力<sup>[2]</sup>。可见, 婴幼儿在生命的第一年里就已经具有了与视听通道相关的数字抽象概念。

进一步研究关于婴幼儿数字表达转化成近似于加、减等内部算术计算的程度问题, Wynn的“期望违背范式”(violation-of-expectation paradigm)实验表明婴儿已经逐渐形成一种近似于 $1+1=2$ 和 $2-1=1$ 之类的最简单数学运算的期望, 能够对场景内的物体进行抽象的内隐或外显编码<sup>[3]</sup>。

动物同人类婴儿一样, 也具有基本的数学能力。教给猴子和猩猩识别1~9阿拉伯数字后, 发现它们可以用这些数字标识出物体的大致数目<sup>[4]</sup>。这表明动物具有对于数字的抽象的非符号表征, 并且能够在特定情况下以数字的象征意义来指导行为。对于不同数量的两堆食物, 猩猩可以自动地选择总数量大的那一堆, 表明猩猩是进行了两堆食物各自的近似意义上的加法和对它们结果的比较<sup>[5]</sup>。这表明了动物也具有基本的算术计算能力。

然而对动物的数字能力所对应的脑区仍然是未知的, 推测与空间视觉有关的枕-顶通路在数字提取中起重要作用。这与研究发现的成人的数字加工区——双侧下顶叶皮质的结果是一致的<sup>[6]</sup>。

从表面上来看, 动物和人的数字表达之间的区别是显而易见的, 动物的数字加工反映了一种近似于人类的特定的生物学决定的神经系统, 但动物的数字能力局限在基本的近似的非符号的计算, 而人的数字加工则可以发展到一种更高水平的数学能力。两种主要的相似之处是: 数字的距离效应和数字的大小效应。即使将数字以符号呈现也会发生数字的距离效应, 这说明了人脑能够内在地将数字的符号形式转化成连续的以数量为基础的相似模式。而数字的大小效应是韦伯定律(差别阈限与刺激量近似为恒定正比关系)的一种形式。

成人对于点的识别表现出一种随着数字的增加而发生的非精确性的增加<sup>[7]</sup>。当进行比较和计算时, 无论以阿拉伯数字呈现还是以单词形式呈现, 二者都表现了同样的数字大小效应。数字大小效应说明了我们

收稿日期: 2002-11-13

\* 中国科学院百人计划、全国优秀博士学位论文作者专项基金资助。

通讯作者: 罗跃嘉, email: luoyj@psych.ac.cn

人类对物体的数目的认知能力的有限性：在 3 或 4 以下可以快速认知，但大于此数后认知速度明显放慢。

总之，认知心理学的证据表明在各种数字加工任务中，人类和动物同样可以快速地产生产有关数量的表达，并且随着数目的增长这种表达越来越模糊。

初等数学加工生物决定的脑基础理论（即认为初等数学加工无论是在动物还在人脑中都有其特定的脑基础的理论）缺乏实验证据，目前尚无同一范式下的有关动物、婴儿、成人行为的比较研究。而且婴儿的算术研究被局限在很小的数字范围内（只能到 4 或是 6）。婴儿和动物的下顶叶区皮质在数字加工中的作用仍是一种推测。目前有关的数字加工的损伤和脑成像研究仍然很少。

根据目前的相关研究可以得到以下结论：对于数字进行表达和推理的能力是人类头脑中遗传结构的一部分。人类拥有特异性的智力装置机制，而且这一机制也是由自然选择所进化而来的，与其它种属动物所共有<sup>[8]</sup>。

## 2 对数学知识本身的探讨

许多科学家认为：有关动物的数字加工假说只有在用所有其它的非数字证明都不足以解释观察到的行为时才成立<sup>[9]</sup>。当一组物体中的个别项目发生置换时，数字可以定义为其中唯一不变的特性，它能概括所有其它的非数字的物理参数的变化。通常根据这一标准来表明动物和婴幼儿在面对物体特征如大小、颜色、形状、空间位置、通道（视、听觉）及呈现模式（同时的还是序列的）等的变化时所表现出来的数字抽象表达能力。这一标准也用于定义成人的数字抽象语义表达和判断脑损伤患者的数学能力。正常成人的数量抽象表达是一种独立于感觉通道与呈现方式（以单词、阿拉伯数字、点数来表现）的现象<sup>[10]</sup>。

数字在不同的语言环境下有不同的意义。Fuson<sup>[11]</sup>区分出了算术意义（基本的、序数的、计量的）、顺序意义和非数字意义。一个数字的基本意义即代表了它的数量，也就是所说的算术意义。例如，在表达式  $4 \times 3 = 12$  中，有 4 个组，每组都为 3，而构成的数量为 12。顺序意义是对于一个系统而言的，如一周里的星期几、一年里的月份或是字母表中的字母。非数字意义是指将数字当作标签，如第 4 频道等等。

解决算术问题需要几种不同的认知成分：首先，算术知识（如  $5 \times 2$ ，或是  $6 + 3$ ）是被储存在长时记忆中并从那儿直接提取出来的<sup>[12]</sup>。其次，程序性知识指导多位数运算的算法和步骤<sup>[13]</sup>。第三，概念性知识是理解算术运算操作和规则的基础。

在初等数学领域，认知神经科学家假定至少存在两种数字表征方式：一种是以语言为基础的模式，用来储存精确数学知识（如乘法表）；一种是不依赖于语言系统的模式，它呈现数字的大小，用于数量运算和近似估计<sup>[14]</sup>。

Dehaene 等首先揭示了数字大小与两侧手反应速度的关系，并且把这种效应标明为 SNARC 效应（反应编码的空间数字联系，spatial numerical association of response codes）。让被试按键对平常数字和新奇数字加以区分。较小的数字总是左手反应得比右手快，而较大的数字却相反。实验证实 SNARC 效应起源于数字的语义数量表征，类似于在头脑中一条由左向右的数字加工途径<sup>[15]</sup>。因此，出现了左手反应与小数字和右手反应与大数字之间的对应。

Groen 与 Parkman<sup>[16]</sup>提出了问题大小效应和一致性效应。问题的大小效应是指解决问题所用时间和错误率都随着问题所涉及数目的增大而增加。一致性问题是指具有两个相同的操作数的运算，如  $2 + 2$  或是  $3 \times 3$ 。一致性效应是指相对于同类运算，一致性问题解决速度较快。Gallistel 和 Gelman<sup>[17]</sup>给出了关于一致性效应的基于编码的解释。他们认为，问题的操作数必须和头脑内部的一条数字线进行匹配，而对于一致性问题，因为两个操作数具有同样的心理数量表征，匹配只需要进行一次，他们将一致性效应归因于对于操作数的心理表征的激活。后来，Blankenberger<sup>[18]</sup>据实验提出了修正，将一致性效应归因于早期的视觉加工。

### 3 数字加工的认知模型

#### 3.1 McCloskey 模型

McCloskey 等<sup>[19]</sup>在 20 世纪 90 年代初提出的这一模型是基于数字加工、计算和中心语义系统的。数字加工的成分是指理解和输出阿拉伯数字形式和单词形式数字的认知机制。计算系统的成分包括算术运算符号的理解、算术知识的提取和算术运算程序的执行。这一模型认为每一步数字和算术加工都必须通过中心语义系统表征激活从而详细说明数字数量来完成。

#### 3.2 McCloskey 修正模型

Cipolotti 与 Butterworth<sup>[20]</sup>提出了 McCloskey 模型的修正版本, 将非语义的代码转换加工合并到原始模型中去。主要的修正是增加了参与数字加工但并不参与数字的语义表征的 3 个非语义路径。

#### 3.3 三联体模型

是由 Dehaene 与 Cohen<sup>[21]</sup> 1995 年提出来的, 基于 3 种编码——听觉口语编码、视觉数字形式、近似的数量表征的模块化数字系统。第一种编码专门负责口语的输入和输出、计数以及记忆中的加法和乘法知识的提取。这一模型认为加法和乘法问题是储存在记忆中的口语信息, 而视觉的阿拉伯数字形式则是参与了阿拉伯数字的操作, 近似的数量表征描述了一个数字的量并在比较和求近似值时起到作用<sup>[12]</sup>。此模型的修正版本提出了有关在左和右半球的数字加工的功能和解剖结构的明确的论断。认为数字的视觉形式对应于两半球的枕颞区中部的联结式激活, 近似数量表征是由两半球的顶枕颞联合区所加工的。

三联体模型基于以下 3 点基本假设<sup>[9]</sup>: 数字信息以 3 种形式进行加工: 一种是近似于数量的表征, 此时数字以数字线上的活性分布来代表; 一种是口语方式, 数字以单词串来表达 (如 thirty-seven); 另一种是视觉的阿拉伯数字形式的表征, 数字以一串数字来表达 (如 37)。信息可以直接由一种形式的编码转换成另一种形式, 如可以将一个阿拉伯数字转换成相对应的数字单词 (如从 3 到 three), 而不需要经过数量 3 的语义表达阶段。正是这一假设使三联体模型不同于其它的数字加工模块化模型<sup>[22]</sup>而更符合词语加工的多路径模型。假设每一个数字加工任务都基于一套固定的输入和输出编码。例如, 假设数字比较是依靠数字在数字线上的数量编码来进行的, 乘法表是储存在记忆中的由单词串表达的数字之间的语言联系; 减法, 主要依靠数量表达储存到记忆中去, 而不是依靠机械语言学习。多位数运算则使用视觉的阿拉伯数字编码和空间展开的数字排列表达来进行。

#### 3.4 三联体模型的应用

Gerstmann<sup>[23]</sup>报道了同时发生失写症、计算不能、手指失认症以及左右侧认识不能的顶叶损害病例, 这种四联体的损害称为古茨曼综合征 (Gerstmann's syndrome, 脑顶枕叶症候群)。引起古茨曼综合征计算不能的损害一般位于顶内沟中心, 即紧邻角回的背后 (Brodmann 39 区)。损害有时会十分的严重。病人可能连诸如  $2+2$ 、 $3-1$  或是  $3\times 9$  这样的简单运算都不会计算。一些特征表明这种缺陷是发生在一个相当抽象的加工水平。首先, 病人可能完全能够理解并说出各种形式的数字。其次, 无论是以听觉还是以视觉呈现, 也不论口头回答还是书面回答, 甚至仅仅只是判断一下所给出的结果是否正确, 他们都表现了同样的计算障碍。因此, 计算并不能归因于病人不能识别数字或是说出运算结果。在胼胝体损伤的病人中, 数字比较任务在两侧半球都是可以完成的。如果存在着双侧性的数量表达, 为什么在古茨曼综合征的病人只要一侧下顶叶区的损伤就足以损害其数量操作呢? 损伤实验的数据表明, 尽管右半球包含着数量的表达 (右侧下顶叶皮质在计算过程中被强烈地激活), 但在具有正常优势半球的被试, 单独左侧损伤就能引起古茨曼综合征的计算不能症状<sup>[24]</sup>。

三联体模型可以解释这一表面上矛盾的结果。依据模型, 只有左半球具有语言编码及其所依靠的计算能力。一侧左下顶叶区损伤的病例, 其右半球顶叶区的数量表达系统是完整的, 但其与左半球的语言系统的联系从功能上被切断了。因此, 这样的病人虽然大部分地保留比较数字以及从事纯粹数量操作的能力,

但不能运用这种数量知识来指导数学常识的提取和数字输出，因此他们在简单算术运算方面有令人惊异的损害。这个模型也可以解释为什么右半球胼胝体损伤的病人不能大声地读数字或是用它们来进行计算。但最终解释计算不能病例中左半球的特殊作用还需要更为深入的研究<sup>[9]</sup>。

#### 4 数字加工的脑损伤研究

数字加工与两半球下顶叶区的特定神经网络有关。首先，神经心理学研究表明，脑损伤患者其下顶叶区域损伤会选择性地损伤内部的数量表征<sup>[25]</sup>。其次，脑成像研究表明，各种数字加工任务都能够激活这一区域<sup>[26]</sup>。

语言半球的下顶叶区的损伤会引起数字加工的缺陷。有时，数字的理解、产生和计算能力全部受损。有时只有选择性的计算损害，而对于阿拉伯数字形式和单词形式的数字的读、写、说的认知和输出并没有受到影响<sup>[25]</sup>。Dehaene 认为：顶区损伤所致计算力缺失的核心是有关数量的抽象语义表达的解体而并非计算过程本身的损害<sup>[25]</sup>。Roland 和 Friberg<sup>[27]</sup>首先在计算过程中追踪血流的变化。当被试从一个给定的数目连续减 3 时，双侧下顶叶皮质和前顶叶皮质的活性都增强了。这些定位后来也被 fMRI 所证实<sup>[28]</sup>。

现已证实下顶叶皮质活性反映了特定类别数量系统的抽象操作，而且与输入和输出通道及计算任务无关。在词的分类任务中，ERP 记录到晚期的顶叶皮质活动，而且这种活动只与具体数字单词有关，不能被其它长度与频率都相匹配的刺激如适当的名字、动词、动物名称或是子字符串等等引发<sup>[29]</sup>。在数字比较任务的 ERP 记录中发现下顶叶皮质的活性由所比较的数字之间距离调节，而与数字的呈现方式无关<sup>[26]</sup>。因此，距离效应和大小效应都可以追溯到下顶叶皮质。

在数字比较任务的 ERP 研究中，右侧下顶叶皮质活性较强<sup>[26]</sup>。这种一侧化的结果与神经心理学的实验是一致的，即单侧损伤下顶叶区就足以破坏精确的数学计算操作，但仍可以保留完整的对两个数字进行比较的能力。现在还没有谁能够以实验为证据明确地判断哪个单独的脑区承担了整个数学领域的知识和能力。但目前研究已经证明，数字意义的核心——有关数量和数字之间关系的知识是在下顶叶区编码的，而其它方面的数字加工如数字识别、多位数计算、数字理解和输出、机械算术记忆等等则由一个更广泛的脑神经网络参与。简单计算也要依靠许多区域的合作才能实现。因此，神经心理学的分析证实了数学是一门多方面领域知识的理论。例如，数字知识受到损伤的患者但却保留了完整的代数知识， $(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$ ，这表明了代数知识和数学知识涉及到了不同的回路<sup>[30]</sup>。同样地，在数字加工的三联体模型中，乘法表是以一种非语义的方式存储在记忆中的，它的形式是单词的机械序列。左侧基底节损伤而具有完整的下顶叶皮质的患者不能背诵乘法口诀表，却仍能比较数字、解决简单的加减问题、判断数字区间等。

综上所述，下顶叶区皮质的数量表征仅仅是编码数字的众多脑区之一，但它是最重要的一个，这种主要的数量意义的表征也是整个数学学科赖以发展的基础。

#### 5 数字加工的细胞水平研究

目前，有关数字加工的细胞基础方面的认知神经科学研究也取得了进展，改变了过去一直很少得到重视的局面。Nieder 等<sup>[31]</sup>报告了他们所发现的位于短尾猴侧前额叶皮层的数字编码神经元。同时，Sawamura 等<sup>[32]</sup>也发现了位于猴顶叶皮层的数字反应神经元。这些新的发现证明了在单细胞水平上研究基本数学能力的脑基础具有令人兴奋的前景。但是上面 2 个研究中也分歧之处，主要是关于前额叶皮层及顶叶皮层在数字加工中的各自的贡献问题，现有的实验数据不能给出很好的评价。Sawamura 等发现 31% 的数字神经元位于顶叶皮层而只有 14% 的数字神经元位于前额叶皮层<sup>[32]</sup>。Nieder 等人则认为数字神经元主要位于前额叶皮层<sup>[31]</sup>。为了进一步解决这个分歧，也为了最后得到有关数字加工神经回路的全貌，还需要更多的电生理实验，也许还要结合功能成像及可复性损伤实验一起来进行研究才能够最后找到答案<sup>[33]</sup>。

但是这些新的发现也迫使我们承认这样一点事实，即我们人类的数学有时被昭示为人类活动的智慧顶

峰,其实是植根于我们的灵长类动物脑中的、长期以来由进化而成的有关基础性概念。显然,我们人类并不是掌握数学诀窍的唯一物种。

## 6 数字加工的半球分布

数字加工的半球分布是怎么样的?是否两半球都能够进行数量表征,都能够进行计算?从胼胝体损伤的患者入手进行了这个问题的研究。胼胝体是连接大脑两半球的一束纤维。当它被损伤或是被外科手术切断时,可以评价割裂半球的认知能力<sup>[34]</sup>。在外科手术的割裂脑病例中首先进行了一系列的有关数学能力的实验<sup>[34,35]</sup>。这些结果不断被重复,并被扩展应用到一位自成年起后胼胝体损伤的患者<sup>[24]</sup>。在两种实验装置中,数字在一侧视野闪现,因此只与一侧半球发生联系,要求患者从事各种复杂程度的数字加工任务。

目前认为两个半球都能够加工数字和数量。当两个数字同时呈现于一侧视野时,分裂脑患者可以没有困难地判断其异同(但由于分开而无法将由两侧视野传递的数字进行比较)。因此,两半球都能够分析数字的外形,而且两半球都能够区别数字的大小以及比较一位数或是两位数与给定的参数的大小<sup>[9]</sup>。因此,两半球都能够对于数字进行数量表征。但是关于分裂脑的研究尚需排除以下两种情况:是否一些半球间的通路在功能上是保留的,或有无可能患者已经生成了一些代偿的脑结构。

左半球和右半球对于数学的能力有两方面明显的区别。首先,呈现于左半球的数字能够被正常地命名,而呈现于右半球的则不能。这与为大家所熟知的左半球的语言优势侧一致。其次,分裂脑的病人只能够计算呈现于他们左半球的数字,当数字呈现于右半球时,他们连加 2、乘 3、减 10、或是除以 2 的简单操作都无法完成,甚至也无法完成选择正确答案或是以非言语的方式判断正误的任务。割裂脑病人右半球所具有的唯一计算能力只是求近似值,患者不能够判断  $2+2$  是 4 还是 5,但可能会很容易判断出  $2+2$  并不等于 9<sup>[24]</sup>。

## 7 数学——一种生物学决定的知识范畴

总的说来,数字加工的研究给认知神经科学提出了新的挑战,它促使认知神经科学家联合从认知心理学借鉴的方法学、神经心理学和脑成像方法而致力于解决数学思维问题。总结目前的研究工作,可以得到以下结论:

(1)人脑内部有一种数字量的近似表征,它好比是一条“数字线”。这种表征对于交流数字信息的多种输入和输出符号系统(如单词或是阿拉伯数字)都是共有的,而且不依赖于这些系统。它易于受到距离和数量级的影响。

(2)大脑两半球都能够进行数量表征,但是数学能力有区别。

(3)位于优势半球的下顶叶皮质损伤会引起数量的心理操作的障碍,尤其是减法和数字对分任务。

(4)在正常被试从事简单的计算任务时,左、右侧下顶叶皮质都被激活。活性的强度、持续时间、一侧化决定于所参与的操作的难易程度和性质,而难易程度和性质又与所涉及的数字大小和数字之间距离有关。然而,这些与呈现数字的通道或是数字呈现方式无关。

在下顶叶皮质的一些神经回路包含了一个部分由先天形成的、生物学决定的数量表征,一个天赋的特定范畴的系统倾向于获取数字和对数字信息进行加工。有以下几点实验证据<sup>[6,25,17]</sup>:首先,非人类的灵长类,也包括其它种属如老鼠、鸽子、海豚都表现出了不同寻常的数字提取和对数字进行操作的能力。更有甚者,同人类一样,它们也对于数字的距离和大小效应敏感,提示它们的数学能力是在种属遗传上与人类相对应的,而并不仅仅是与我们在表面上相似。这支持这样一个观点,即我们的大脑可能在进化的过程中形成了一个专用的数字表征。其次,获得语言前的婴儿也表现了一种不同寻常的数字加工能力,支持了在早期发育中特异性数字感觉的自动化理论。第三,许多发育过程中的计算损害的病例——即高选择性的、数字加工的模块缺陷,看来合理地与早期的脑损伤相对应——但还保留了其它的语义加工能力。这支持一

个特异性脑回路的存在，它是特别地为获取初等数学知识而准备的，它的损害很大程度上损伤了识数和计算能力。第四，成人脑的下顶叶皮质在计算中的特殊角色普遍存在，而且与个人所获得的文化、教育、或是数字的符号系统无关的。因此，古茨曼综合征的计算不能病人的脑损伤区域在不同的国家、文化情况下都是相似的，而且在计算过程中下顶叶皮质的激活在各个国家的被试中都可以见到。

尽管如此，目前得出下顶叶皮质是特异性的、生物学决定的数字表达区之类的论断还是为时过早，因为人类仍然面临许多难题，例如：在人类下顶叶皮质区是否存在数字加工的特异性区域？或者是否和参与空间表达、注意转移、手动、以及心理旋转任务的区域之间有一些重叠？是否下顶叶皮质在婴儿期就有可以被激活？这种激活是否是婴儿初等数学能力的基础？当婴儿获得正常的数学规则时，其用于数字加工的大脑回路是怎么修正自身的？数学的专业知识是怎样由下顶叶皮质结构实现的？

#### 参考文献

- [1] Starkey P. et al. Perception of numbers by human infants. *Science*, 1980, 210(4473): 1033~1035
- [2] Starkey P. et al. Detection of intermodal numerical correspondences by human infants. *Science*, 1983, 222(4620): 179~181
- [3] Wynn K. Addition and subtraction by human infants. *Nature*, 1992, 358(6389): 749~750
- [4] Boysen S T. The Development of Numerical Competence: Animal and Human Models. In: Capaldi E J ed. Hillsdale, NY: Erlbaum, 1993
- [5] Rumbaugh D M et al. Summation in the chimpanzee (*Pan troglodytes*). *J Exp Psychol Anim Behav Process*, 1987, 13(2): 107~115
- [6] Dehaene S, Dehaene-Lambertz G, Cohen L. Abstract representations of numbers in the animal and human brain. *Trends Neurosci*, 1998, 21: 355~361
- [7] van Oeffelen M P, Vos P G. A probabilistic model for the discrimination of visual number. *Percept Psychophys*, 1982, 32(2): 163~170
- [8] Wynn K. Psychological foundations of number: numerical competence in human infants. *Trends in Cognitive Sciences*, 1998, 2: 296~303
- [9] Dehaene S. Cerebral bases of number processing and calculation. In: M S Gazzaniga ed. *The New Cognitive Neurosciences*. Cambridge, Massachusetts. London, England. The MIT Press, 2000. 1013~1022
- [10] Dehaene S, Akhavein R. Attention, automaticity, and levels of representation in number processing. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 1995, 21(2): 314~326
- [11] Fuson K C. *Childrens Counting and Concepts of Number*. New York: Springer-Verlag, 1988
- [12] Dehaene S. Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 1992, 44(1-2): 1~42
- [13] McCloskey M. Cognitive mechanisms in numerical processing: evidence from acquired dyscalculia. *Cognition*, 1992, 44: 107~157
- [14] Dehaene S, Spelke E, Pinel P. et al. Sources of mathematical thinking: behavioral and brain-imaging evidence. *Science*, 1999, 284: 970~974
- [15] Dehaene S, Bossini S, Giraux P. The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, 1993, 122: 371~396
- [16] Groen G J, Parkman J M. A chronometric analysis of simple addition. *Psychological Review*, 1972, 79: 329~343
- [17] Gallistel C R, Gelman R. Preverbal and verbal counting and computation. *Cognition*, 1992, 44: 43~74
- [18] Blankenberger S. The arithmetic tie effect is mainly encoding-based. *Cognition*, 2001, 82: B15~B24
- [19] McCloskey M, Aliminoso D, Sokol S M. Facts, rules and procedures in normal calculation: evidence from multiple single-patient studies of impaired arithmetic fact retrieval. *Brain and Cognition*, 1991, 17: 154~203
- [20] Cicolotti L, Butterworth B. Towards a multiroute model of number processing: impaired transcoding with preserved calculation skills. *Journal of Experimental Psychology, General* 1995, 124: 375~390
- [21] Dehaene S, Cohen L. Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition*, 1995, 1: 83~120
- [22] McCloskey M, Macaruso P, Whetstone T. The functional architecture of numerical processing mechanisms: Defending the modular model. In: J I D Campbell ed. *The Nature and Origins of Mathematical Skills*. Amsterdam: Elsevier, 1992. 493~537

- [23] Gerstmann J. Syndrome of finger agnosia disorientation for right and left agraphia and acalculia. *Arch Neurol Psychiatry*, 1940,44: 398~408
- [24] Cohen L, Dehaene S. Cerebral networks for number processing: Evidence from a case of posterior callosal lesion. *NeuroCase*, 1996, 2: 155~174
- [25] Dehaene S, Cohen L. Cerebral pathways for calculation: double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. *Cortex*, 1997, 33(2): 219~250
- [26] Dehaene S. et al. Cerebral activations during number multiplication and comparison: a PET study. *Neuropsychologia*, 1996, 34(11): 1097~1106
- [27] Roland P E, Friberg L. Localization of cortical areas activated by thinking. *J Neurophysiol*, 1985, 53(5): 1219~1243
- [28] Burbaud P. et al. Lateralization of prefrontal activation during internal mental calculation: a functional magnetic resonance imaging study. *J Neurophysiol*, 1995, 74(5): 2194~2200
- [29] Hittmair-Delazer M. et al. Impaired arithmetic facts but intact conceptual knowledge: a single-case study of dyscalculia. *Cortex*, 1995, 31(1): 139~147
- [30] Hittmair-Delazer M. et al. Concepts and facts in calculation. *Brain*, 1994, 117 (Pt 4): 715~728
- [31] Nieder A, Freedman D J, Miller E K. Representation of the quantity of visual items in the primate prefrontal cortex. *Science*, 2002, 297(5587): 1708~1711
- [32] Sawamura H, Shima K, Tanji J. Numerical representation for action in the parietal cortex of the monkey. *Nature*, 2002, 415(6874): 918~922
- [33] Dehaene S. Neuroscience. Single-neuron arithmetic. *Science*, 2002, 297(5587): 1652~1653
- [34] Sperry R W. Mental unity following surgical disconnection of the cerebral hemispheres. In: *The harvey Lectures*. New York: Academic Press, 1968. 62
- [35] Seymour S E, Reuter-Lorenz P A, Gazzaniga M S. The disconnection syndrome: Basic findings reaffirmed. *Brain*, 1994, 117: 105~115

## Cognitive Neuroscience Research Status Quo of Number Processing

Nan Yun, Luo Yuejia

*(Key Laboratory for Mental Health, Institute of Psychology, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)*

**Abstract:** Numbers as one of the most important culture inventions are being paid more and more attention by cognitive neuroscientists now, who are focusing on the puzzle that what on earth is the cerebral basis of the human competence for mathematics. Neuroimaging studies have indicated a network of brain regions, including the parietal cortex, lateral prefrontal cortex, medial prefrontal cortex, and cerebellum, as being involved in arithmetic processing. Experiment evidences demonstrated that the human brain contains an analogical representation of numerical quantities, in which numerical quantities are internally manipulated as points on the mental “number line”. Neuropsychological studies of number processing indicated that this representation is distributed in the two hemispheres and its dominant site points to inferior parietal cortex.

**Key words:** number processing, ERP (event-related potential), inferior parietal lobe.