

心算的加工机制：来自认知神经科学的研究^{*}

刘 昌 王翠艳

(南京师范大学教育科学学院暨认知神经科学实验室, 南京 210097)

摘 要 心算加工分编码(表征)、运算(或提取)和反应三个阶段,这三个阶段相互影响。不同输入形式的数字表征在顶叶的不同区域完成。算术知识提取主要与左脑顶内沟有关,但当心算变得更复杂时而需要具体运算时,左脑额叶下部出现明显激活。所有与心算有关的脑区涉及大脑前额皮层和颞顶枕联合皮层的综合作用,并总体表现为左脑优势,但估算、珠心算以及某些具有特殊心算能力的人的心算还依赖视空间表征,这与右脑额顶区和楔前叶的活动有关。

关键词 心算,珠心算,认知神经科学。

分类号 B845

心算(mental arithmetic or calculation)指在没有外界工具(如纸笔、计算器等)的帮助下所进行的算术操作活动。作为日常生活中一种重要的思维活动和技能,心算已经成为心理学家们高度关注的研究主题。1972年, Groen和Parkman首次从认知心理学角度探讨心算的认知加工机制^[1]; 1985年, Roland和Friberg首次从神经影像学角度探讨心算的神经活动机制^[2]。最近10年更是心算研究的蓬勃发展时期。我们曾先后两次分别对心算的认知加工机制和心算的神经活动机制进行过评述^[3,4]。在以前评述的基础上, 本文将从认知心理学和神经科学相结合的角度评述心算研究的一些新进展, 同时梳理以前评述中所未涉及的一些重要方面, 以此对心算有一个更系统的认识。

1 心算的加工环节

心算涉及一系列的认知加工环节。一般认为心算的加工环节主要包括三个部分: 编码(表征)、运算(或提取)和反应(给出答案)^[5]。首先是编码阶段, 即要将外部刺激转化为适当的内部表征, 然后是算术知识的提取或算术运算加工阶段。一般来说, 对于一些简单的心算, 如 $9+6$ 、 3×5 等, 我们可以很快脱口说出答案, 因为在不断的运用过程中, 一些简单的算术问题已经和它的答案结合在一起, 当被试看到问题时会自动提取答案, 并不需要使用

任何形式的运算规则。但对于 $434-87$ 、 26×38 这样需要进位或借位的复杂心算, 如果我们并没有记住它的现成答案, 那只能通过一定的运算程序进行计算才能得到答案。这个过程不仅有提取, 还有运算加工。心算的第三个加工环节就是给出答案并做出反应。

1.1 心算的编码加工

在编码阶段, 刺激可以有多种输入形式。从输入通道看, 有视觉的方式, 有听觉的方式; 从输入语言形式看, 有阿拉伯数字的输入方式, 有各种言语(汉语、英语等)的输入方式。不同刺激的内部表征只有一个还是多个, 不同的理论有不同的解释。抽象代码模型(abstract code model)^[6]认为阿拉伯数字、言语数字等不同输入都转化为同一个抽象的、语义数量表征, 这一表征参与完成随后的运算操作。三重代码模型(triple code model)^[7]则认为根据任务性质的不同, 表征方式可以有多种, 比如听觉的言语编码专门负责书写的或口语的言语输入、输出以及记忆中简单加法和乘法知识的提取。视觉的阿拉伯数字形式则是参与了阿拉伯数字的输入、输出和多位数运算。近似的数量表征支持近似的运算、估算和数字比较等任务。编码复杂性模型(encoding complex model)^[8]也认为表征不止一个, 并且每一种表征可以参与多个认知过程, 即不特异于某类任务, 这是与三重代码模型不同的地方。多个表征的存在得到了很多行为和神经成像研究证明。Dehaene等^[9]认为, 大脑顶叶主要负责数字加工。在具体分工上, 双侧顶内沟的水平段(the bilateral horizontal

收稿日期: 2007-12-31

^{*} 高等学校全国优秀博士学位论文专项资金(200006)资助。

通讯作者: 刘昌, E-mail: cglew@163.com

segment of the intraparietal sulcus, HIPS) 主要负责数量表征, 位于 HIPS 后下部的左侧角回主要参与言语形式的数字表征, 双侧顶叶的后上部 (posterior superior parietal lobule) 则主要负责视空间注意以及运动反应等。因此, 数字加工贯穿多个认知过程、并通过多个脑区共同完成的 (详见下文)。

上述心算的三个加工环节是相互独立的, 还是相互作用的呢? 如果是独立的, 那么各阶段的操作是互不影响的。编码阶段完成后, 提取或运算阶段就会依顺序进行, 不受编码阶段的影响。如果是相互作用的, 那么编码阶段的加工会直接影响后面的提取或运算。如上所述, 抽象编码模型认为, 不同的刺激都会转化为同一个内部表征来完成后面的加工, 因此编码阶段的加工不会对随后的加工产生影响。尽管三重代码模型承认多个表征的存在, 但认为一旦输入被转化为适当的内部表征, 加工就以独立于输入的同一方式进行。因此, 与抽象编码模型类似, 三重代码模型也认为心算加工的各子系统仍旧是顺序的、相互独立进行的, 编码和后面的运算操作并没有相互作用。只有编码复杂性模型认为心算的各个加工阶段不是机械的, 相互独立的依次进行, 而是相互作用, 相互影响的。这比较符合大脑复杂、高效的加工模式, 同时也得到了大量行为研究的证明。Noel 等^[10]用罗马数字和阿拉伯数字呈现乘法问题以考察不同输入形式对心算过程的影响, 作为比较, 他们还设计了数字比较任务, 用于估计言语数字和阿拉伯数字的编码时间。在比较任务中, 他们先给被试呈现两组一定数量的圆点, 然后出现阿拉伯数字对或言语数字对, 被试通过按键判断这些数字是否与之前呈现的圆点数量一致。实验记录了同一任务在两种输入条件下反应时, 并计算出二者的差异。结果显示乘法任务中, 言语反应时是阿拉伯数字反应时的 2.5 倍, 两者相差 335ms。相比之下, 比较任务中言语数字的反应时仅比阿拉伯数字长 140ms。这样, 言语乘法中近 200ms 的反应时是不能用编码阶段的耗时差异来解释的, 研究认为数字输入方式的不同不仅影响心算的编码阶段, 而且还影响随后的心理操作。采用类似上述范式, Campbell 等^[11-14]进行了一系列的行为研究, 结果都倾向证明不同的输入形式不只影响心算的编码阶段, 同时也会影响随后加工阶段。但这方面的认知神经科学证据却很少。我们运用脑事件相关电位技术和行为实验相结合的方式, 发现不同的输入形式

不仅影响编码阶段, 同时也影响心算的提取过程, 表明心算的输入、编码、提取等阶段并不是相互独立的依次进行, 为编码复杂性模型提供了直接的证据*。

1.2 心算中的提取和运算加工

前已述, 对于一些简单的心算, 如 $9+6$ 、 3×5 等, 人们一般直接从自己的长时记忆库直接提取现成的答案。但对于 $434-87$ 、 26×38 这样的复杂心算, 一般需要通过一定的运算程序进行计算才能得到答案, 这个过程不仅有提取, 还有运算加工。已有一些研究采用正电子发射断层扫描 (PET) 或功能磁共振成像 (fMRI) 等神经影像技术对心算活动中这两种加工方式的脑生理活动进行了观察。Hayashi 等^[15]运用 PET 技术研究考察了连续减法 (100 连减 9) 和背诵乘法表两种心算过程的脑区, 结果显示两种心算活动所依赖的脑区除部分交叠外, 还出现了分离。进行连续减法时前额皮层明显激活, 但在背诵乘法表时并没有激活, 背诵乘法时激活了基底神经节的一些区域。Kazui 等^[16]类似研究发现, 当背诵九九乘法表 (即直接提取算术答案) 时, 左脑顶内沟、前运动区、辅助运动区以及额下回激活; 当进行连续减法运算时, 除这些脑区激活外, 右脑顶区和两侧前额区也激活。所有被试左脑的顶内沟激活最为强烈。他们推测, 有关九九乘法表的记忆储存在左脑顶内沟, 而对这些知识的利用则由前运动区、辅助运动区以及额下回等位于额叶的脑区完成。在连续减法中, 右脑顶区和两侧前额区与实际的计算活动有关。

与可以从长时记忆库中直接提取答案的简单问题相比, 复杂的心算问题还需要除了提取以外的加工, 比如一些基本算式规则的运用, 如进位、借位以及加工过程的分解、中间结果的保持等, 这需要借助工作记忆的参与才能完成。Logie 等^[17]采用双任务 (dual task) 实验范式证明了工作记忆在心算中的作用。研究发现, 干扰工作记忆的中央执行成分和语音环均对心算成绩产生明显影响。这一结果提示工作记忆的中央执行成分和语音环在心算活动中发挥了作用。一些研究显示心算复杂性相关脑区主要位于额叶、顶叶和中央区^[18,19], 而这些区域与工作记忆的关系密切。Kong 等^[20]发现随着问题难度的增

* 王翠艳, 刘昌. 不同输入形式影响心算活动的脑事件相关电位研究. 2008, 待发表

加, 左侧顶内沟和左侧额下回和双侧扣带回出现明显激活, 并且双侧的扣带回特异于借位和进位操作, 而扣带回与工作记忆的执行功能关系密切。Gurber 等^[21]认为顶叶背外侧的角回、顶叶内侧的后扣带回、楔前叶是参与心算的专一脑区, 若心算变得更复杂而需要应用一些计算规则时, 左脑额叶下部出现明显激活, 而该脑区与语言和工作记忆关系密切。Zago 等^[22,23]还进一步观察到类似 32×24 这样的复杂乘法活动中激活了负责视空间工作记忆的左侧顶额网络 (parietal-frontal network) 以及与视空间表征相关的双侧额下回。由此可见, 参与工作记忆的脑区与参与心算加工的额叶和顶叶等脑区存在相当大的重叠, 表明心算与工作记忆存在密切联系, 而这方面的直接研究证据甚少。我们利用 fMRI 技术*, 采用 Logie 等使用的双任务实验范式直接研究了干扰工作记忆的中央执行成分时心算加工的脑活动特点。相对于简单乘法的算术知识提取活动 (如 3×8), 复杂乘法运算 (如 43×9) 激活了双侧辅助运动区、双侧额中回以及双侧沿顶内沟区。当进行乘法运算时干扰中央执行成分, 双侧辅助运动区和左侧额中回的激活增强, 而双侧沿顶内沟区的激活显著且弱于无干扰时的激活; 同样, 当进行简单乘法知识提取时, 干扰中央执行成分对双侧沿顶内沟区的激活没有任何影响。顶内沟区的这种变化表明顶内沟是数字加工的特异性脑区, 而前者双侧辅助运动区和左侧额中回的激活增强表明这些脑区可能是工作记忆与心算的共同活动区域, 并意味着复杂运算依赖工作记忆的中央执行功能。该研究首次从顶叶和额叶这两个最重要的心算脑区中成功分离出与工作记忆和数字加工相关的脑区。

综上所述, 简单心算问题的解决主要是从长时记忆中直接提取出答案, 主要激活顶内沟以及语言环路相关的角回等脑区, 而对于复杂的心算问题, 则需要工作记忆的参与, 主要激活左脑的额叶下部以及右脑负责视空间表征的区域。

2 不同运算方式之间的差异

2.1 四种基本运算之间的差异

加、减、乘、除无论在日常生活还是在学校教育中都是最基本的运算。在学校里, 儿童总是先学习加减法, 并通过计数、凑整以及竖式等程序策略

来获得相应知识, 而通过背诵乘法表来掌握乘法, 进而学习除法。那么, 这四种运算过程及其神经基础是否也有所不同呢? 大量的神经心理学研究显示, 各种运算方式会选择性地受到影响。例如, 割裂脑患者 JW (连接大脑两半球的胼胝体被切除) 的右半球在完成加法和减法任务时, 成绩在随机水平之上, 乘法和除法的成绩却只有随机水平, 而左半球完成各种任务相对都比较好^[24]; 另有病人减法和除法运算严重受损, 但加法和乘法相对完好^[25]; 其他或减法比乘法受损更严重, 或乘法则比减法更差^[26]。神经心理学的研究发现似乎乘法和其他运算的差异较大^[27]。在使用双任务范式的行为研究中, Lee 等发现语音环路的双任务影响乘法运算, 而不影响减法运算。但是, 视空间的双任务只影响减法, 却不影响乘法^[28]。这可能是由于减法和乘法运算拥有不同表征方式: 乘法主要运用听觉的言语表征方式, 因此受到语音环路次级任务的影响, 而减法主要依赖视空间表征和与心理数字线相关的近似数量表征, 因而视空间次级任务对其的影响比较大。这一结论得到的神经成像研究的证实。与减法相比, 乘法运算主要激活了左脑外侧裂周围的语言区^[29]。神经心理学的研究也显示, 左脑外侧裂周围脑区受损的被试的乘法和除法能力也严重不足, 却相对保留了加法和减法运算^[30]。只有乘法依赖语言相关的脑区, 还是以直接提取来获取答案的运算都依赖语言相关的脑区? 如前所述, 数字知识的直接提取, 不管是那种运算都会激活语言相关的脑区。所以不能简单地认为, 只有乘法 (或除法) 依赖语言环路。当然, 也不能认为乘法就一定只依赖言语表征。Zago 等^[22]发现在 26×38 这样的复杂乘法活动中两侧额下回被明显激活, 以往的大量研究已得到明确结论, 额下回的活动与视觉信息的加工有密切关系。这意味着, 复杂的乘法心算活动也存在视觉空间表征, 而单独依赖言语表征。因此在比较各种运算方式之间的神经基础时, 应该将提取和运算分开, 即将简单的可以直接提取出答案的问题与复杂的运算分开, 否则将无法区分运算类型和运算方式之间的差异。

基于此, 在控制了任务难度的基础上, Kawashima 等^[31]的 fMRI 研究发现, 一位数简单加法、减法和乘法都激活了左侧额中回、双侧额下回、双侧枕叶外侧和顶内沟区, 但只有加法和减法激活右侧额区。Kong 等^[20]则比较了实际运算的加法和减法

* Liu C, Shen L, Weng X. Mental multiplication and the central executive component of working memory: A dual-task fMRI study. Manuscript to be published, 2008

的神经基础，他们发现加法所激活的脑区在减法时同样出现激活，除此之外，减法还激活了一些特异性的脑区，包括右侧顶下小叶、左侧楔前叶和左侧顶上小叶等。研究认为这是因为减法的掌握是在加法的基础上获得的，因此，加法和减法并不存在各自独立的加工区域，而是在一些共同神经基础之上有所不同^[20]。这与Fehr等^[19]研究一致，他们比较加、减、乘、除四种运算发现，所有的运算都激活了一些共同的脑区，比如右侧楔前叶、双侧额上、额中区，其他脑区则是特异性的，主要分布在枕叶和中央区。因此，各种运算方式的神经基础并不完全分离，而是以一些脑区为共同基础，不同运算方式又涉及不同的神经网络。总体上，各种运算方式之间的差异，目前的研究并不多，这也是以后心算研究的一个方向。

2.2 精算和估算

所谓精算(exact arithmetic)是指给出算术问题的准确答案，而估算(approximate arithmetic)则只需要给出近似的答案或从备选答案中选出最接近正确答案的选项。相对于前者，后者只需进行粗略的计算即可。对一些脑损伤病人的研究发现，这两种运算的脑区活动存在分离。左侧额叶皮层损伤的人不能进行精确的运算，但能比较好地完成数量比较、估算和感数的加工；而顶下小叶受损的病人正相反，可以较好的完成和提取有关的精确运算，但在需要对数量进行表征的任务中表现出缺陷^[26,32]。一些土著人只掌握很少的言语数字，5 以内的数字甚至不超过 2 个，研究发现，这些土著人只能在所掌握的言语数字范围内才可以完成精算，超出则不能较好的完成，但估算却不受影响。这进一步表明，精算主要依赖言语表征，而估算则较少依赖言语表征^[33,34]。

功能神经影像的研究也发现这两种心算过程的脑激活模式有所不同。Dehaene等^[35]利用fMRI研究发现，在精算活动中，左半球前额叶下部、前扣带回以及左右脑角回等脑区存在明显激活（其中以左半球前额叶下部激活最突出），这些脑区都是与语言功能有关的脑区；而在估算活动中，大脑左右两半球顶叶的顶内沟、中央前沟、左脑额上回、右脑楔叶、小脑左侧等脑区存在明显激活（其中以左右两侧的顶内沟激活最突出），这些脑区均与视觉空间信息加工有关，而与语言功能关系不大。进一步采用脑事件相关电位技术分析发现，精算和估算的

脑活动差别在题目出现后的300ms之前已经出现。由于这种差异出现在备选答案呈现之前（备选答案在题目出现400ms后呈现），可以肯定上述脑活动差异是由两种不同的心算加工方式引起，而不是由于题目呈现之后再呈现备选答案时被试选择答案时所引起的。因此，精算活动依赖于特定的言语表征，主要在左半球前额叶下部脑区完成；估算活动依赖于数的视觉空间表征，主要在左右顶叶的顶内沟完成。

Venkatraman等^[36]对英汉双语者的研究则提供了进一步的证明，他们训练被试使用两种语言完成精算和估算任务，其中一半被试以英语完成精算，以汉语完成估算。另一半则正相反，以英语完成估算，以汉语完成精算。最后考察完成两类任务时，从训练过的语言转换到另一种没有训练过的语言的脑区激活情况，即语言切换效应(language switching effects)的发生情况。实验预测，在精算过程中，如果数字知识的存储和提取依赖语言，那么就会发生语言切换效应，并且激活的脑区该与言语加工的脑区一致。在估算任务中，激活的区域不会是言语相关的网络，而可能是参与近似数量表征的一些脑区，但也会出现语言切换效应，因为大脑必须对新奇的刺激特征（使用没有训练过的语言）转换成相应的语义表征（类似使用过的语言）。研究证实了上述预测，在精算任务中，在左侧额下回、左侧顶下小叶以及角回等言语相关区域发现了语言切换效应。而在估算任务中，语言切换效应仅发生在双侧顶内沟的后部以及背侧的额叶皮层。可见，精算更多运用言语表征，主要激活大脑左半球的额顶区域和语言相关的神经网络，而估算加工则更多涉及近似数量表征和空间表征，主要激活双侧的顶内沟。

2.3 珠心算与普通心算

珠心算是传统的珠算和心算相结合的产物，即把抽象的数字变成直观的盘珠影像，并在头脑中进行类似于在算盘上的心算。与普通的心算相比，珠心算者运用特殊的运算法则，经过长时间的训练形成了特殊的数字结构以及编码、提取等信息加工方式。珠心算在完成复杂的心算问题时，速度快，准确率高。一些行为研究表明珠算能手的数字记忆能力要超过常人，在完成任务时容易受到视觉—空间干扰任务的影响，这表明珠心算者可能是运用形象的“心理算盘”这一特殊方式来加工数字信息的^[37]。Hishitani 等^[38]的研究证明了这一点。他们以两种听

觉的方式呈现给珠算能手和普通被试一定数量的数字,一种采用分离的形式,即 3456 数字串以 3、4、5、6 这样单独数字依次呈现,另一种是整体的形式,即 3456 以“三千四百五十六”的读法呈现,然后出现探测指示,指导被试回忆相应位置的数字。结果珠算能手在两种呈现方式间没有差异,而非珠算者的差异却十分明显;普通被试的反应时随着探测位置的增加而增加,而在想象能力之内,珠算者的反应时却没有增加,在超出想象能力之外,珠算能手的反应时也增长,但不如普通被试的明显,并且,想象能力越小,反应时的波动越大。这些结果证实了前面的观点,珠算能手能立即将数字串转化为心理算盘,进行形象加工,这样他们就可以根据内部的算盘形象直接进入探测位置,反应时也大大缩短,而普通被试只能通过言语编码,进而进行系列加工,反应时也会随探测位置的增加而增加。因此,经过珠算技能训练的人具有与普通人不同的数字加工模式,前者更多利用了是空间的信息表征方式。

神经机制的研究也证明了这一点。Tanaka 等^[39]以延迟样本匹配任务(delayed match to sample task)范式考察数字记忆,即判断某一探测数字在之刺激呈现之前是否出现过。非珠算者完成上述任务主要激活的是包括 Broca 区在内言语工作记忆脑区,而珠算能手激活双侧额上沟(bilateral superior frontal sulcus)和顶上小叶(superior parietal lobule)这些视空间工作记忆所依赖的脑区。Hanakawa 等^[40]采用三种心理操作任务:心算、空间和言语任务,这些任务都需要被试不断地根据刺激来更新心理表征。每个任务都由启动刺激(prime stimulus)和指示刺激(instruction stimulus)组成。在数字任务中,两类刺激都是阿拉伯数字,被试的任务是将呈现的阿拉伯数字全部相加并报告最后的结果。在空间任务中,启动刺激是由 9 个正方形组成的一个格子,当中有一标记;指示刺激是一个或一对箭头,被试需要根据箭头的指示来移动标记的位置。在言语任务中,启动刺激是代表星期的日本汉字,指示刺激是阿拉伯数字,被试需要根据指示对星期数进行转化,比如“2”代表在原有的星期数上增加两天。研究发现在完成空间和言语任务时,两组激活脑区差异不大。在完成心算任务时控制组(普通被试)和专长组(珠心算能手)激活了一些共同的脑区,包括中央前沟上部、顶内沟、顶叶后部、梭状回和小脑等,但是专长组这些脑区都是双侧激活,而非珠算者则

偏向左半球,除此之外,珠算者的楔前叶还出现了明显的激活。而楔前叶和右半球的额顶区域则反映的是视空间和视觉运动表象加工。可见,珠心算者主要是利用是空间策略来进行心算加工的。只在控制组出现激活的脑区有前额叶、Broca 区、前扣带回皮层以及前辅助运动区(presupplementary motor area)和外侧顶叶等。这些区域的激活表明控制组可能主要运用言语相关策略来完成任务的。Chen 等^[41]在比较珠算能手和普通被试在完成默读(一位或两位的阿拉伯数字)、一位数和两位数心算加法时的脑区差异时,发现珠心算者在完成心算任务时出现了右侧背外侧前运动区(视觉运动表象加工)和双侧顶叶和额叶网络(视空间加工)的激活。普通被试由于缺乏有效的策略,需要更多地依赖执行功能的参与来进行费时的系列加工,所涉及的脑区更多,且主要激活左侧额下皮层。可见,珠心算者与普通心算者在数字加工方面的确存在者差异,前者更多依赖右脑加工。除了珠心算者具有超越一般人的心算能力,非珠心算者中也有心算天才,他们也能在很短的时间内基本准确地完成在一般人看来相当复杂的算术题。Pesenti 等人^[42]的研究报告了一个叫 Gamm 的心算天才的案例。他在两位数的乘法、正弦、除法的计算方面表现出与众不同的能力。他能很快地准确说出象 995、539、sin287 这样题目的结果,另外对某些更复杂题目,如 973487 的平方根,计算结果与正确答案也十分接近。Gamm 有意识的训练获得了这样非凡的心算能力。行为研究发现,Gamm 具备良好的短时记忆、情景记忆和语义记忆(如有关计算算法的知识)能力。神经成像的研究发现,一般心算者在心算时大脑左右两半球均有激活,但总体上都表现为左脑优势。所有心算者的两侧缘上回、顶内沟、枕叶、额下沟,以及左脑颞枕联合区、额中回均有激活。但是,Gamm 还存在一些独有的激活脑区,其右脑颞枕联合区、额叶内侧、旁海马回、前扣带回上部,以及左脑中央旁小叶这 5 个脑区激活,而在一般心算者中这 5 个区恰表现为去激活。这几个脑区活动基本上都与情景记忆活动有关,它们负责情景记忆信息的编码和提取。Gamm 在事后的内省报告中也说自己通过视觉表象对数字信息进行编码和提取。该个案表明,心算天才者表现得与众不同确实与一些特定的脑区活动有关,这些特定的脑区活动能够将费时费力的以短时记忆为中介的加工方式转化为直接高效的情景记忆

编码和提取, 自动运用合适的计算算法, 同时监控这一计算过程。这一系列过程与如上所述的右脑特定脑区有关。从心理活动方式来看, 也表明存在长时工作记忆(long-term working memory)方式, 心算天才通过这一方式直接以情景记忆的编码和提取策略准确高效地完成了一般人难以企及的复杂心算题目。

综上所述, 珠算能手与一般心算天才既有相似的地方, 也分别具有各自的特点。两者都很少依赖容量有限的短时记忆, 而是运用特定的视觉表象从长时记忆中对数字信息进行编码和提取。所不同的是, 珠心算者的特定表象来自“心理算盘”, 而一般的心算天才则从丰富的情节记忆中建构适合自己的特定视觉表象来帮助运算, 两者都明显依赖大脑右半球。

3 结语

到目前为止, 有关心算活动的认知心理和神经科学的研究结果可大致归纳为如下: 心算加工分编码(表征)、运算(提取)和反应产生三个阶段, 这三个阶段相互影响。不同输入形式的数字表征在顶叶的不同区域完成。算术知识提取主要与左脑顶内沟有关, 但当心算变得更复杂时而需要具体运算时, 左脑额叶下部出现明显激活。所有与心算有关的脑区涉及大脑前额皮层和颞顶枕联合皮层的综合作用, 并总体表现为左脑优势, 但估算、珠心算以及某些具有特殊心算能力的人的心算还依赖视空间表征, 这与右脑额顶区和楔前叶的活动有关。总体上, 各种运算方式都以一些共同的神经网络为基础, 但这些运算的加工方式又各有不同层面的侧重。对心算加工机制的进一步揭示有赖于更巧妙完善的实验设计、多个不同侧面(行为研究、影像学、神经心理等)的综合研究和研究者的长期不懈努力。

参考文献

- 1 Groen G J, Parkman J M. A chronometric analysis of simple addition. *Psychological Review*, 1972, 79(4): 329~343
- 2 Roland P E, Friberg L. Localization of cortical areas activated by thinking. *Journal of Neurophysiology*, 1985, 53: 1219~1243
- 3 刘昌, 李德明. 心算活动机制的研究. *心理学报*, 1999, 31: 111~117
- 4 刘昌. 心算的认知神经科学研究. *心理科学*, 2006, 29: 30~33
- 5 Campbell J I D. *Handbook of mathematical cognition*. New York: Psychology Press, 2004. 347~360
- 6 McCloskey M, Macaruso P. Representing and using numerical information. *American Psychologist*, 1995, 50: 351~363
- 7 Dehaene S, Cohen L. Toward an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition*, 1995, 1: 83~120
- 8 Campbell J I D. Architectures for numerical cognition, 1995, 53: 1~44
- 9 Dehaene S, Piazza M, Pinel P, et al. Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 2003, 20: 487~506
- 10 Noel M P, Seron X. On the existence of intermediate representations in numerical processing. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and cognition*, 1997, 23: 697~720
- 11 Campbell J I D. The surface form \times problem size interaction in cognitive arithmetic: evidence against an encoding locus. *Cognition*, 1999, 70: 25~33
- 12 Campbell J I D, Kanz C L, Xue Q. Number processing in Chinese-English bilinguals. *Mathematical cognition*, 1999, 5: 1~39
- 13 Campbell J I D, Fugelsang J. Strategy choice for arithmetic verification: effects of numerical surface form. *Cognition*, 2001, 80: 21~30
- 14 Campbell J I D, Parker H R, Doetzel N L. Interactive effects of numerical surface form and operand parity in cognitive arithmetic. *Journal of Experiment Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 2004, 30: 51~64
- 15 Hayashi N, Ishii K, Kitagaki H, et al. Regional differences in cerebral blood flow during recitation of the multiplication table and actual calculation: a positron emission tomography study. *Journal of the Neurological Sciences*, 2000, 176: 102~108
- 16 Kazui H, Kitagaki H, Mori E. Cortical activation during retrieval of arithmetical facts and actual calculation: a functional magnetic resonance imaging study. *Psychiatry and Clinical Neuroscience*, 2000, 54: 479~485
- 17 Logie R H, Gilhooly K J, Wynn V. Counting on working memory in arithmetic problem solving. *Memory and Cognition*, 1994, 22(4): 395~410
- 18 Kou H, Iwaki S. Modulation of neural activities by the complexity of mental arithmetic: An MEG study. *International Congress Series*, 2007, 1300: 539~542
- 19 Fehr T, Code C, Herrmann M. Common brain regions underlying different arithmetic operations an revealed by conjunct fMRI-BOLD activation. *Brain Research*, 2007, 1172(3): 93~102
- 20 Kong J, Wang C, Kwong K, et al. The neural substrate of arithmetic operations and procedure complexity. *Cognitive Brain Research*, 2005, 22: 397~405
- 21 Gruber O, Indefrey P, Steinmetz H, et al. Dissociating neural correlates of cognitive components in mental calculation. *Cerebral Cortex*, 2001, 11: 350~359
- 22 Zago L, Pesenti M, Mellet E, et al. Neural correlates of simple

- and complex mental calculation. *NeuroImage*, 2001, 13: 314~327
- 23 Zago L, Tzourio-Mazoyer N. Distinguishing visuospatial working memory and complex mental calculation areas within the parietal lobes. *Neuroscience Letters*, 2002, 331: 45~49
 - 24 Funnell M G, Colvin M K, Gazzaniga M S. The calculating hemispheres: Studies of a split-brain patient. *Neuropsychologia*, 2007, 45: 2378~2386
 - 25 Delazer M, Karner E, Zamarian L, et al. Number processing in posterior cortical atrophy: A neuropsychological case study. *Neuropsychologia*, 2006, 44: 36~51
 - 26 Lemer C, Dehaene S, Spelke E, et al. Approximate quantities and exact number words: Dissociable systems. *Neuropsychologia*, 2003, 41: 1942~1958.
 - 27 Campbell J I D. *Handbook of mathematical cognition*. New York: Psychology Press, 2004. 347~360
 - 28 Lee K M, Kang S Y. Arithmetic operation and working memory: Differential suppression in dual tasks. *Cognition*, 2002, 83: 63~68
 - 29 Lee, K M. Cortical areas differentially involved in multiplication and subtraction: A functional magnetic resonance imaging study and correlation with a case of selective acalculia. *Annals of Neurology*, 2000, 48: 657~661
 - 30 Cohen L, Dehaene S, Chochon F, et al. Language and calculation within the parietal lobe: a combined cognitive, anatomical and fMRI study. *Neuropsychologia*, 2000, 38: 1426~1440
 - 31 Kawashima R, Taira M, Okita K, et al. A functional MRI study of simple arithmetic: a comparison between children and adults. *Cognitive Brain Research*, 2004, 18: 227~233
 - 32 Dehaene S, Cohen L. Cerebral pathways for calculation: Double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. *Cortex*, 1997, 33: 219~250
 - 33 Gordon P. Numerical cognition without words: Evidence from Amazonia. *Science*, 2004, 306: 496~499.
 - 34 Pica P, Leme C, Izard V, et al. Exact and approximate arithmetic in an Amazonian indigene group. *Science*, 2004, 306: 499~503
 - 35 Dehaene S, Spelke E, Pinel P, et al. Sources of mathematical thinking: behavioral and brain -imaging evidence. *Science*, 1999, 284: 970~974
 - 36 Venkatraman V, Siong S C, Michael W L, et al. Effect of Language Switching on Arithmetic: A Bilingual fMRI Study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2006, 18: 64~74
 - 37 高民, 沈泓. 珠心算的心理机制实验研究述评. *心理科学*, 1999, 22(5): 419~422
 - 38 Hishitani S. Imagery experts: How do expert abacus operators process imagery? *Applied Cognitive Psychology*, 1990, 4: 33~46
 - 39 Tanaka S, Chikashi M, Tatsuro K. Superior digit memory of abacus experts: An event-related functional MRI study. *Neuroreport*, 2002, 12(17): 2187~2191
 - 40 Hanakawa T, Honda M, Okada T, et al. Neural correlates underlying mental calculation in abacus experts: a functional magnetic resonance imaging study. *NeuroImage*, 2003, 19: 296~307
 - 41 Chen C L, Wu T H, Cheng M C, et al. Prospective demonstration of brain plasticity after intensive abacus-based mental calculation training: An fMRI study. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2006, 569: 567~571
 - 42 Pesenti M, Zago L, Crivello F, et al. Mental calculation in a prodigy is sustained by right prefrontal and medial temporal areas. *Nature neuroscience*, 2001, 4: 103~107

Mental Calculation: Studies from Cognitive Neuroscience

LIU Chang, WANG Cui-Yan

(Lab of Cognitive Neuroscience and School of Educational Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract: Mental calculation is complex cognitive procedure, which includes three tightly related processing stages: converting the stimulus into the appropriate internal codes, retrieving or calculating the answer, and producing the answer. Different numbers in different input formats are represented in different areas of the parietal lobe. The left intraparietal sulcus is mainly involved in arithmetic facts retrieval, moreover, and the left inferior frontal lobe is additionally involved in actual computation when mental arithmetic problems become more difficult. While the prefrontal cortex and the occipito-temporo-parietal regions are generally involved in mental arithmetic, predominant activation is typically found in the left hemisphere. It is also shown that approximate arithmetic, abacus mental calculation and mental calculation in a prodigy are more dependent on visual-spatial representation, involving the right prefrontal cortex and precuneus.

Key words: mental calculation, abacus mental calculation, cognitive neuroscience.