

组块破解形态顿悟的脑认知机理

黄福荣¹, 和美², 罗劲^{3*}

1. 江西师范大学心理学院, 江西省心理与认知科学重点实验室, 南昌 330022;

2. 中国人民大学劳动人事学院, 北京 100872;

3. 首都师范大学心理学系, 学习与认知北京市重点实验室, 北京 100048

* 联系人, E-mail: luoj@psych.ac.cn

2017-07-28 收稿, 2017-09-05 修回, 2017-09-07 接受, 2017-10-13 网络版发表

国家自然科学基金(31700956, 31671124)、北京市教委市属高校创新能力提升计划(TJSH20161002801)和北京成像技术高精尖创新中心项目(BAICIT-2016018)资助

摘要 组块破解是把过去经验中形成的完整的认知组块分解成基本元素并加以重组和利用, 它是一种能够获得顿悟的创造性思维过程. 自从理论心理学家Ohlsson S.于20世纪80年代提出组块破解概念以来, 关于组块破解的认知与神经机制研究已经开展了30余年. 迄今, 组块破解形态顿悟的脑认知机理已经基本被探索清楚, 主要发现有: (1) 组块破解具有“突发性”、“直指性”等典型的顿悟属性; (2) 组块破解是在知觉水平上发生的特殊形态顿悟, 初级视觉皮层和高级视觉皮层的活动存在“失协性”, 背侧视觉通路和腹侧视觉通路的活动具有“协同性”; (3) 阻碍组块破解形态顿悟发生的障碍有多重, 多重障碍源还会产生“叠加放大效应”, 不仅增强了腹侧视觉通路和背侧视觉通路的调控连结, 而且也增强了腹侧视觉通路终端到背侧视觉通路终端之间的调控连结; (4) 组块破解形态顿悟是大脑左右半球协同作用的产物, “蔡格尼克效应”存在右半球偏侧性; (5) 组块破解形态顿悟是意识与无意识的综合体, 或许新颖性加工是无意识的、有效性加工是有意识的, 又或许酝酿期是无意识的、而顿悟期和验证期是有意识的.

关键词 顿悟, 组块破解, 视觉通路, 多重障碍源

顿悟在1917年首次用来描述“突发式”问题解决现象, 以区别逐渐发生的“尝试-错误”过程. 格式塔学派沿用和发展了顿悟概念, 提出问题解决者可以重构问题情境的完形, 以顺利解决问题^[1]. 从问题解决现象和经验上看, 顿悟往往是在极短的一瞬间突然发生的, 正确的解决方案直接凸显在意识中, 不需要额外的认知加工就成功地解决了问题, 顿悟过程中还会有伴随情感释放的“啊哈”体验^[2-4]. 然而, 格式塔心理学家并没有解释顿悟的本质, 也没有说明顿悟的发生条件.

20世纪80年代, 理论心理学家Ohlsson基于信息加工理论重新定义了顿悟. Ohlsson^[5-7]认为, 顿悟是

在问题解决出现了僵局的情况下发生的, 顿悟事件包括“打破僵局”和“执行解决方案”两个部分. 如果在打破僵局之后, 问题解决者执行解决方案能够顺利地解决问题, 那么传统意义上的“完全顿悟”就发生了; 如果在打破僵局之后, 问题解决者执行解决方案不能够成功地解决问题, 那就只是发生了“部分顿悟”. 心理学研究的顿悟一般是指传统意义上的“完全顿悟”. 顿悟问题解决行为的最显著特征是, 问题解决者具备解题能力却还是会进入思维僵局. 那么, 既然问题解决者具备解决问题的能力, 为什么还会进入僵局? 僵局又是如何打破的? 解释顿悟的本质必须回答上述两个关键问题.

引用格式: 黄福荣, 和美, 罗劲. 组块破解形态顿悟的脑认知机理. 科学通报, 2017, 62: 3594-3604

Huang F R, He M, Luo J. The cognitive and neural mechanism of chunk decomposition: A particular form of insight (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 3594-3604, doi: 10.1360/N972017-00693

顿悟问题解决过程中出现僵局,可能是因为问题表征不合理^[7,8]。问题表征是问题解决者对问题的主观解释,包括对问题的起始状态、目标状态和允许的操作等问题空间成分的认识。问题解决过程就是在问题空间中搜索和选择适用的算子,从而把问题的起始状态转变成目标状态^[1]。如果问题表征不正确,问题解决者无法在问题空间中搜索到适用的算子,就会进入思维僵局^[7]。不恰当的问题表征可能表现为:(1)问题情景的知觉和解释不恰当,导致对问题的起始状态的认识不合理;(2)自上而下预期的约束,导致对问题的目标状态的认识不合理;(3)思维定势或固着效应,导致无法搜索到合理的算子或者无法识别正确的算子。

僵局的打破和顿悟的实现需要转换不合理的问题表征^[7]。对于不同障碍源所造成的僵局,问题表征转换的机制不尽相同:(1)如果僵局源于对问题的起始状态的不合理认识,僵局的打破和顿悟的实现就必须更新问题情境的知觉和解释。作为重要的问题解决机制,组块破解(chunk decomposition)是通过拆分与重构既有知觉组块而生成新的知觉组块、赋予新的解释^[9]。(2)如果僵局源于对问题的目标状态的认识不合理,僵局的打破和顿悟的实现就必须消除知识经验的主观约束,并且重新设置正确的目标状态,这个过程就是约束松懈(constraint relaxation)^[9];(3)如果僵局源于允许的算子不合理,僵局的打破和顿悟的实现就需要重新搜索、提取和识别适用的算子,可能要在算子搜索过程中打破思维定势、放弃经验引导的惯用启发法策略^[10],也有可能是在算子的识别过程中消除语义或功能固着,即抑制算子的凸显意义或功能、激活非凸显的意义或功能^[11]。

由于诱发僵局的障碍源不同、打破僵局的机制也不同,组块破解、约束松懈、固着解除和思维定势打破分别代表了不同形态的顿悟问题解决行为。具体而言:(1)组块破解类顿悟问题的障碍源包括主观的知识经验和客观的刺激结构特征,主、客观的多重障碍源可能会在组块破解过程中发生交互作用,甚至产生叠加放大效应。而约束松懈、固着解除和定势打破类顿悟问题的障碍主要来源于主观的知识经验;(2)在约束松懈、固着解除和思维定势类顿悟问题解决中,获取顿悟的关键是自上而下地纠正主观假设,而在组块破解类顿悟问题解决中,获取顿悟的关键是自下而上地重构刺激的知觉结构,甚至改变知觉

形成的脚本,具有突出的视觉空间信息加工特性。相比较而言,组块破解是一种特殊形态的顿悟。

所以,本文基于认知神经科学视角,先介绍什么是组块破解、它有哪些顿悟属性,然后分别从组块破解的视觉空间信息加工特性、组块破解的多重障碍源等两个方面揭示组块破解形态顿悟的特殊性脑认知机理,最后阐述组块破解形态顿悟与其他形态顿悟的共性脑认知机理,如大脑右侧半球优势效应、意识与无意识分离等。

1 组块破解的顿悟属性

作为组块效应(chunking)的反过程,组块破解是把已经自动化形成的知觉组块拆分成基本构成元素,然后再重新组合成新的知觉组块^[6,7]。组块破解可以在不同水平上发生。例如,松散水平的组块破解过程中拆分的是松散组块,紧密水平的组块破解过程中拆分的是紧密组块。松散组块的亚结构可以作为有意义的独立组块而存在,内部元素之间的捆绑程度不高,如罗马数字“IV”(构成元素“I”和“V”);紧密组块的亚结构没有意义,不能作为独立的组块而存在,内部元素之间的捆绑程度很高,例如罗马数字“V”(构成元素“\”和“/”)^[9]。

在组块破解研究的早期阶段,Knoblich等人^[9]采用罗马算式问题为实验材料,探明了组块破解的认知加工规律。罗马算式问题是由火柴棒拼成的罗马数字和运算符号构成的错误等式,问题解决者能且仅能移动一根火柴棒使不等式转变成正确的等式。研究者将罗马算式问题划分为两类:(1)松散水平组块破解,例如问题“IV=III+III”(答案是“VI=III+III”),问题解决者只需要把“IV”拆分成“I”和“V”,并且把“I”移动到“V”的右边,其中“I”和“V”本身都是有意义的组块、可以独立存在;(2)紧密水平组块破解,例如问题“XI=III+III”(答案是“VI=III+III”),问题解决者必须把“XI”拆分成“\”、“/”和“I”,并且重组为数字“VI”才能构建出正确的等式,其中“\”和“/”本身没有任何意义、不能独立存在。实验发现,相对于松散水平的组块破解,紧密水平的组块破解的成功率更低、反应时间更长。基于此,Knoblich课题组总结出了两条认知规律:(1)组块破解有难度差异,组块破解的难度与组块内部元素的紧密程度成正比,松散水平的组块比较容易破解,紧密水平的组块破解的难度较大;(2)组块破解有优先级差异,组块破解是从松

散水平开始的,只有当松散水平的组块破解持续失败之后才会考虑紧密水平的组块破解^[9]。

除此之外,Knoblich等人^[12]还比较了松散水平和紧密水平的组块破解的动态进程。实验中采用眼动技术记录了被试解决罗马算式问题过程中的注视轨迹,然后把整个问题解决进程划分成3个均等的时间段,分别计算每一个时间段内,问题解决者对各个问题元素(数字、运算符号)的注视时间的分布。实验发现:(1)相对于松散水平的组块破解,紧密水平的组块破解过程中的凝视时间更长,尤其是在临近成功的第三阶段。凝视意味着认知加工出现了停滞,它说明紧密水平的组块破解过程中经历了更多的僵局;(2)在紧密水平的组块破解的第一和第二阶段,问题解决者对于关键元素的注视时间都不长,但是第三阶段对关键元素的注视时间出现了陡增,说明问题解决者突然转移注意力完成了问题表征的转换。由此可见,紧密水平的组块破解具有“突发性”和“直指性”等两大顿悟特征,证实了它的顿悟属性。

罗马算式问题作为实验材料,虽然已经应用于组块破解形态顿悟的行为实验^[9-11]、电颅磁研究(tDCS, transcranial direct current stimulation)^[13]和脑损伤研究^[14],但是,它并不适用于神经成像研究。因为罗马算式问题的数量(变式)有限,无法满足脑电和脑成像数据分析的“叠加平均”技术要求。为了克服这个难题,Luo和Knoblich^[15,16]联合开发了一套与罗马算式问题类似的组块破解材料——汉字拆分任务。汉字是典型的象形文字,它由部件、笔画等不同层次的结构组成。利用汉字的结构特点,可以系统地操纵组块破解的水平。在部首水平上拆分和重构汉字属于松散水平的组块破解,因为部件包含着汉字的语音或语义信息,可以作为独立结构而存在;在笔画水平上拆分和重构汉字属于紧密水平的组块破解,因为笔画是汉字中最简单和最基本的成分,本身不包含任何意义,也不可以作为独立结构而存在。与罗马算式问题相比,汉字拆分任务具有数量多、变式丰富、易于控制难度等明显优势,非常适用于组块破解的神经成像研究。

初始版的汉字拆分任务中设置了两个汉字,任务要求被试从右侧的汉字中拆分出一部分结构(部件或笔画)嫁接到左侧的汉字中,转变成两个其他汉字。(1)松散水平的组块破解:从右侧汉字中拆分出部件,嫁接到左侧的汉字中,例如将“由江”变成“油

工”;(2)紧密水平的组块破解:把右侧汉字拆分成独立的笔画,并且把关键笔画从右侧汉字中转移到左侧汉字中进行结构重组,例如把“干学”转变成“平字”。简化版的汉字拆分任务中只设置了一个汉字,任务要求被试移除部分结构(部首或笔画),使之转变成其他汉字,例如把“河”破解成“可”——松散水平的组块破解,或者是把“夹”破解成“夫”——紧密水平的组块破解。相对于初始版任务,简化版任务简化了组块破解的重构子过程。

由于顿悟式组块破解的难度较大,被试往往不能够解决成功,或者需要很长的思考时间,不利于在有限的脑成像扫描时间内收集足够数量的试次。为了克服这个弊端,研究者舍弃了自主解决的“催化顿悟”范式,改用线索或答案“诱发顿悟”。例如在汉字拆分任务中,标记出必须拆分和移动的部件或笔画^[15,17-20]。尽管线索诱发的顿悟不完全等同于自主解决催化的顿悟,但是诱发顿悟与自发顿悟的认知加工是相似的^[21,22],特别是诱发顿悟中也包含了自发顿悟的核心成分——认知重构^[15,22]。所以,诱发顿悟范式也有助于揭示组块破解形态顿悟的认知神经机制。

2 组块破解的视觉空间信息加工特性

从2005年开始,本课题组尝试用功能性磁共振成像技术(functional magnetic resonance imaging, fMRI)研究组块破解的认知神经机制^[17]。实验中采用了初始版的汉字拆分任务及其线索诱发范式。依据问题呈现、线索呈现和答案呈现的时间节点,把整个问题解决过程划分成了“自主解题阶段”、“线索提示阶段”和“答案理解与判断阶段”,锁时分析了线索提示阶段的大脑活动水平,其中松散水平的组块破解条件只分析自主解题阶段顺利解决了的问题,紧密水平的组块破解条件只分析自主解决失败、在线索提示下成功解决了的问题。结果发现,汉字拆分任务广泛地激活了视知觉相关的顶-枕叶皮层,与松散水平的组块破解相比,紧密水平的组块破解更少地激活了初级视皮层(双侧楔叶(cuneus)、舌回(lingual gyrus)(17, 18区)),更多地激活了高级视皮层(双侧枕下回(inferior occipital gyrus, IOG)、枕中回(middle occipital gyrus, MOG)(18, 19区))。实验结果在一定程度上揭示了顿悟式组块破解的脑认知规律:抑制初级视皮层内的自动化知觉组块效应,并且激活高级视皮层

进行知觉组块的重组;初级视皮层的特征分析功能与高级视皮层的特征整合功能存在失协调性^[17]。

在后续的神经营像研究中,研究者还发现组块破解过程中广泛地激活了顶叶皮层,它们可能与知觉组块破解过程中的空间表征操作和转换有关^[18-20]。有趣的是,顶上小叶和顶下小叶在组块破解过程中的激活模式不一致^[19]。在采用参数设计的脑成像研究中,Tang^[19]等人操纵了组块破解水平(松散、中等紧密、高度紧密),发现组块破解水平与顶上小叶的激活水平成正相关、与顶下小叶的激活水平成负相关。鉴于顶上小叶参与目标引导的自上而下的注意定向,顶下小叶参与刺激引导的自下而上的注意定向,研究者推测,顶上小叶的激活可能与知觉组块重构的心理操作有关,顶下小叶的抑制可能反映了自下而上系统中无关信息的过滤,双重注意系统协同完成组块破解过程。

与初级视觉皮层、顶下小叶等顶-枕区被抑制的神经营像结果一致的是,Wu等人^[23]使用脑电图技术(electroencephalogram, EEG)研究顿悟式组块破解的时间进程,发现顶-枕区出现了alpha波(10.14 Hz)频射。实验中放弃了“线索诱发范式”,采用更能体现出创造性的“自主解决范式”,要求被试解决了问题就马上做出按键反应,锁时分析按键前3 s内的电生理活动。结果显示,与松散水平的组块破解相比,在被试完成紧密水平的组块破解前的500 ms左右,在顶-枕区出现了更多的alpha波(10.14 Hz)频射。alpha波(10~12 Hz)是大脑内的低频活动波,alpha波频射意味着大脑皮层转入了休息期或间隙期。所以,实验中发现的alpha波频射,也说明顶-枕区在紧密水平的组块破解过程中的激活水平低于松散水平的组块破解。

除了视知觉皮层的定位研究之外,Wu等人^[24]还探明了视觉通路的功能连接性的变化规律。实验中选择视觉通路始端的左侧枕下回(inferior occipital gyrus, IOG)、背侧视觉通路末端的左侧顶上小叶(superior parietal lobule, SPL),以及腹侧视觉通路末端的左侧颞下回(inferior temporal gyrus, ITG)作为感兴趣区,采用动态因果模型(DCM, dynamic causal modeling)分析了双侧视觉通路内的功能连接性的变化。结果显示,组块破解增强了背侧视觉通路内的功能连接性,也增强了腹侧视觉通路内的功能连接性,甚至还可能会增强背侧与腹侧视觉通路末端之间的功能连接性,这说明组块破解是在背侧视觉通路与

腹侧通路的协同作用下完成的^[24]。因为组块破解不仅需要通达“拆分什么元素”和“重构出什么新组块”等“是什么”(what)信息,而且需要确认“拆分元素的空间位置”和“如何进行恰当的组合排列”等“在哪儿”(where)信息。

总之,研究人员在神经成像研究中揭示了组块破解形态顿悟的视觉空间信息加工特性,及其神经机理:(1)顿悟式组块破解不仅要抑制自动化的知觉组块效应、打破已经自动形成的知觉组块,而且需要对知觉组块的内部元素进行重组以生成新的组块;(2)顿悟式组块破解过程中,抑制了自下而上注意与初级视觉皮层的特征分析功能、激活了自上而下注意与高级视觉皮层的特征整合功能。初级视觉皮层与高级视觉皮层、自下而上注意系统与自上而下注意系统的活动存在“失协性”;(3)顿悟式组块破解增强了背侧视觉通路内的功能连接性以获取where信息,也增强了腹侧视觉通路内的功能连接性以获取what信息,甚至还会增强背侧与腹侧视觉通路末端之间的功能连接性,它是在背侧和腹侧视觉通路的协同作用下发生的。

3 组块破解的多重障碍源

作为自动化组块效应的反过程,组块破解需要抑制自动化组块效应或者是拆分已经自动形成的知觉组块,那么,促进和诱发自动化知觉组块效应的因素都是阻碍组块破解的障碍源。自动化知觉组块效应是刺激的结构特征和知识经验共同作用的结果^[25,26],一方面,物理结构上相邻、相似、连续、闭合的刺激会被知觉为一个组块;另一方面,随着知识经验的积累,知觉组块效应的自动化程度也会趋于增强。所以,组块破解过程必须克服组块的紧密性、空间分布等结构特征和知识经验的障碍,来自主、客观的多重障碍源可能还会发生交互作用,甚至产生“1+1>2”的叠加放大效应。

3.1 组块的紧密性

组块的紧密性是整体性知觉组块的一种结构特征,它是指组块的内部元素之间镶嵌或捆绑的紧密程度。如果组块的基本构成元素有意义、可以独立存在,那么该组块属于松散组块;如果组块的基本构成元素没有任何意义、也不能作为独立单元而存在,那么该组块属于紧密组块。根据拆分组块的紧密性,可

以把罗马算式问题划分为松散水平组块破解(例如问题“ $IV=III+III$ ”的答案是“ $VI=III+III$ ”)和紧密水平组块破解(例如问题“ $XI=III+III$ ”的答案是“ $VI=III+III$ ”)。实验发现,在5 min时间之内,松散水平组块破解的成功率高于紧密水平组块破解、反应时间短于紧密水平组块破解^[9]。

在使用汉字拆分任务的研究中,也发现松散水平的组块破解通常只需要1~2 s就能够完成,而紧密水平的组块破解常常不能够完成或者需要花费更长的时间才能够完成。这都说明,松散水平的组块破解容易,而紧密水平的组块破解比较困难^[17,19,27]。在严密地控制了空间关系因素之后,依然发现了松散与紧密组块破解之间的难度差异^[28,29]。此外,Tang等人^[19]还采用参数设计,更加精细地操纵了汉字拆分任务中组块的紧密性(松散水平、中等紧密水平、高度紧密水平)。实验发现,在成功率方面,松散水平高于中等紧密水平的组块破解,中等紧密水平高于高度紧密水平的组块破解;在反应时间方面,松散水平低于中等紧密水平的组块破解,中等紧密水平低于高度紧密水平的组块破解。并且,组块破解相关的顶-枕区和执行系统的激活水平都随着组块的紧密性变化而呈现出线性变化趋势,严密地证明了组块的紧密性是影响组块破解难度的重要因素。

3.2 组块的空间分布

组块的空间分布是指组块的基本构成元素在二维空间的水平维度和垂直维度上的分布,也是知觉组块的一种结构特征。对于分布在不同空间维度(例如水平维度、垂直维度、复合维度等)上的基本构成元素,拆分和重构的难度不同。吴丽丽^[28]在实验中比较了三类汉字的组块破解:(1)左右结构的汉字(例如“盯”):一个部件位于汉字的左侧,另一部件位于汉字的右侧;(2)上下结构的汉字(例如“贺”):一个部件位于汉字的上部,另一部件位于汉字的下部;(3)复合结构的汉字(例如“连”):一个部件包围着另一个部件。三类结构的汉字都属于松散组块,但是基本构成元素的空间分布不同,所以组块破解是在不同的空间维度上发生的。具体而言,左右结构的汉字的组块破解是在水平维度上发生的,上下结构的汉字的组块破解是在垂直维度上发生的,而复合结构的汉字的组块破解是在水平维度和垂直维度上同时进行的。实验结果显示,水平维度的组块破解的反应时间

短于复合维度、成功率高于复合维度;虽然上下维度与复合维度的组块破解的反应时间没有差异,但是上下维度的组块破解的成功率高于复合维度,都说明双重维度的组块破解比单一维度更难。实验结果还显示,水平维度的组块破解的反应时间短于上下维度、成功率高于上下维度,说明水平维度比上下维度的组块破解的难度更低,可能是因为左右结构的汉字比上下结构的汉字具有更高的特征提取优势,有助于组块破解过程中辨别和确认拆分的基本构成元素。组块的空间分布对松散水平的组块破解的影响,应该同样适用于紧密水平的组块破解。

3.3 组块紧密性与熟悉性的交互作用

除了接近律、相似律、连续律和闭合律等整体性知觉组织原则之外,知识经验作为引导自动化知觉组块效应的重要因素^[30],也是阻碍组块破解的主要障碍源。刺激的熟悉性越强,知识经验引导的自动化知觉组块效应越强,组块拆分的难度就会越大。

为了验证组块破解形态顿悟中的多重障碍源假设,Wu等人^[20]在实验中同时操纵了组块的熟悉性和紧密性。用高频的真汉字代表熟悉的组块,用完全不存在的假汉字代表不熟悉的组块。形成的4种组块破解条件分别是:熟悉(真字)&松散水平、不熟悉(假字)&松散水平、熟悉(真字)&紧密水平和不熟悉(假字)&紧密水平。行为数据显示,熟悉水平比不熟悉水平的组块破解的正确率低、反应时间更长;紧密水平比松散水平的组块破解的正确率低、反应时间更长。神经成像数据显示,熟悉水平比不熟悉水平的组块破解更多地激活了双侧额下回,诱发了更大的P3a成分;与松散水平的组块破解相比,紧密水平的组块破解更多地激活了双侧顶叶上回、顶叶下回、枕叶中回等高级视觉皮层,诱发了更大的晚期正成分(LPC)。这说明组块的熟悉性和紧密性都是组块破解的障碍源,支持了顿悟的多重障碍假说^[31]。

更加重要的发现是,组块的熟悉性和紧密性交互地影响了组块破解的正确率和反应时间,以及脑内前扣带回(anterior cingulate cortex, ACC)的激活水平^[20]。具体而言,对于熟悉的组块,紧密水平比松散水平的组块破解的正确率低、反应时间更长、更多地激活了ACC;对于不熟悉的组块,紧密水平与松散水平的组块破解的正确率、反应时间和ACC激活水平都没有显著差异。可能是因为:(1)熟悉组块的惯用

意义会对紧密水平的组块破解产生非常强的干扰,但是对松散水平的组块破解的干扰较弱。因为松散组块的基本元素本身具有明确的意义,利于新组块意义的通达; (2) 不熟悉组块本身并没有任何意义,也不会对松散或紧密组块破解产生任何干扰^[20]。所以,对于熟悉的组块而言,紧密水平的组块破解中的认知冲突非常大,松散水平的组块破解中的认知冲突较小;对于不熟悉的组块而言,松散水平和紧密水平的组块破解中的冲突都不大。由此可见,组块的熟悉性和紧密性交互式地影响了组块破解进程,说明组块破解形态顿悟的多重障碍源可能会发生交互作用;并且,在单个思维过程中同时克服两个或两个以上困难的现象,证实了组块破解的“非线性”特征。

3.4 组块紧密性与熟悉性的叠加放大效应

组块的熟悉性和紧密性都是组块破解的障碍源,而且会发生交互作用,那么双重障碍会产生“ $1+1<2$ ”的“叠加缩小效应”,还是“ $1+1>2$ ”的“叠加放大效应”? Wu等人^[24]采用动态因果模型(dynamic causal modeling, DCM),分析组块破解过程中背侧视觉通路(where)和腹侧视觉通路(what)的功能连接性变化,发现了多重干扰的“叠加放大效应”。

鉴于组块破解具有典型的知觉加工特异性,组块拆分和重构过程中广泛地激活了大脑的视知觉皮层,研究者选择视觉通路始端的左侧枕下回、背侧视觉通路末端的左侧顶上小叶、腹侧视觉通路末端的左侧颞下回作为感兴趣区,采用DCM分析不同兴趣区之间的功能连接性变化^[24]。结果显示,熟悉性的增强使得where通路的调控连结增强,紧密性的增强使得what和where通路的调控连结增强。可能是因为,相对于不熟悉的假字,熟悉的真字的组块破解需要更多的方位确定与控制;紧密水平的组块破解不仅难以确认拆分笔画的空间位置,也难以将成分元素作为独立单元来识别,所以需要更多“在哪里”(where)和“是什么”(what)加工。DCM结果还显示,组块的熟悉性和紧密性同时出现,不仅增强了what通路和where通路的调控连结,而且也增强了what通路终端到where通路终端之间的调控连结,说明组块熟悉性和紧密性等多重障碍源同时出现会产生“叠加放大效应”,使原本无需参与的脑-认知过程加入其中。

简而言之,顿悟式组块破解可能会遭遇组块的整体性组织原则、组块的空间分布、知识经验等多种

障碍源,支持了顿悟的多重障碍源假设。来自主、客观的多重障碍不仅会发生交互作用,而且还可能产生多重干扰的“叠加放大效应”。而约束松懈、定势打破和固着消除等顿悟形态都只有单一的知识经验障碍源,再次证明组块破解是一种特殊形态的顿悟。

4 组块破解的大脑右侧半球优势效应

创造性思维的右脑理论由来已久,只是一直都存在争议^[32]。在顿悟问题解决的神经成像研究中,有研究者发现了右半球偏侧化,或者是双侧半球的激活,也有研究者发现了左半球偏侧化^[33]。对于研究结果的分歧,除了实验材料、范式和方法学的差异之外,另一种可能的解释是,顿悟的右半球偏侧性仅仅出现在问题解决过程中的局部加工阶段。正如Bowden等人^[34-36]采用半视野技术,研究了组合远距离联想问题解决行为的半球偏侧性,发现右半球优势主要体现在问题解决失败之后的再加工阶段。可能是因为大脑右半球能够对失败的难题进行持续加工,有助于问题答案的生成或相关解题线索的识别。与此类似,唐晓晨等人^[27]采用事件相关电位技术(ERP, event-related potential),发现组块破解的“蔡格尼克效应”(未解决的问题比已解决的问题的记忆保持效果更好)存在右半球偏侧性。

在实验中,唐晓晨等人^[27]依据问题呈现、线索呈现和答案呈现等3个时间节点,把整个问题解决过程划分成了“问题呈现与自主解决”、“线索提示与再次解决”以及“正确答案呈现与理解”3个阶段,重点分析和比较自主解决阶段(按键反应后1 s)和线索提示阶段(线索呈现后1 s)内大脑左、右半球的电生理活动状态。结果显示,在自主解决阶段,解决成功的问题在左半球诱发了更大的P150成分,解决失败的问题在右半球激发了更大的P150成分。在排除了任务难度因素之后,研究者认为P150的半球偏侧性可能是因为大脑对成功和失败问题的认知加工方式不同;对于已经成功解决的问题,大脑会自主清除工作记忆中与问题相关的信息,这主要依赖于左半球的执行功能;而对于得到负反馈的解决失败的问题,右半球会把问题相关信息继续保持在记忆中,以便能够在进入僵局之后继续加工。所以说,对于解决失败的问题的相关信息记忆存在右半球的偏侧性。

在线索提示与再次解决阶段,初次解决失败和成功的问题的提示线索都在双侧半球诱发了P2成分,

其中左半球中两类问题诱发的P2没有差异,但是在右侧半球中,解决失败比解决成功的问题诱发的P2波幅更高.可能是因为左半球负责处理与当前任务相关的信息,初次解决成功或失败的问题的提示线索出现时都会诱发出目标识别过程中注意增强相关的P2.然而,右半球可能会根据问题是否已经解决来选择不同的处理方式,初次解决失败的问题的提示线索不仅与任务相关,而且也与被试的内在需求(由于未能解决问题而产生的主观需求)相关,所以比初次解决成功的问题的提示线索得到了更多的注意资源、诱发出了更大的P2,该结果说明对于初次解决失败的问题的相关线索的识别存在右半球的偏侧性^[27].

综合来看,在自主解决阶段和线索提示阶段内,对于初次解决失败的问题的信息加工存在右半球优势效应,揭示了顿悟的蔡格尼克效应的右半球偏侧性,即大脑右半球会对解决失败的问题进行持续关注 and 加工,从而对解题线索的识别更加敏感.由此可见,顿悟中的右侧半球偏侧性可能只是发生在某些局部加工阶段内,尤其是遭遇失败之后的僵局期以及僵局打破期,而不一定贯穿于整个问题解决进程中.

5 组块破解的意识与无意识分离

格式塔心理学家认为顿悟是突然进入“眼前”的,问题解决者意识到解决方案,却不知道解决方案是如何形成的.口语报告法研究发现,顿悟问题解决者对于答案的“温暖感”是突增、而不是渐增的,个体无法清楚地意识到答案搜索的进程^[2,37].行为学研究还发现,工作记忆能力越强的个体在顿悟问题解决中的表现越差^[38],借助酒精或药物等方法降低工作记忆能力反而促进了顿悟问题解决^[39],也说明顿悟问题的解决可能是无意识的、不需要自上而下的意识控制,但是,也有研究发现工作记忆能力与顿悟问题解决能力成正相关^[39].究竟顿悟需要还是不需要意识控制?这是一个长期争执却没有定论的问题,对于组块破解也不例外.

神经心理学研究发现组块破解形态顿悟不需要意识控制^[13,14].Chi和Snyder^[13]采用经颅直流电刺激技术(tDCS, transcranial direct current stimulation)暂时性地削弱了假设驱动的自上而下加工,促进了顿悟问题的解决.实验包括3个阶段:第一阶段,要求被

试解决或理解27道组块破解问题,这些练习问题都只需要把“X”拆分并重组为“V”就能解决,例如“Ⅲ=Ⅸ-I”(答案“Ⅲ=Ⅳ-I”).第二阶段,让实验组被试接受5 min的经颅直流电刺激来抑制左侧颞前叶、激活右侧颞前叶,控制组被试不接受任何电刺激.第三阶段,要求被试解决两道测试问题,分别是“Ⅵ=Ⅵ+Ⅵ”(答案“Ⅵ=Ⅵ=Ⅵ”)和“Ⅸ=Ⅵ-Ⅲ”(答案“Ⅸ=Ⅵ=Ⅲ”).结果显示,与控制组相比,实验组被试解决测试问题的速度更快,在限定的6 min时间内解决问题的概率更高.虽然连续解决或理解27道相同规则的组块破解问题会形成思维定势,但是通过经颅直流电刺激抑制左侧颞前叶削弱了假设驱动的认知加工促进了测试问题的解决,说明组块破解和思维定势打破都不需要自上而下的意识控制.Reverberi等人^[14]在脑损伤研究中发现,对于约束松懈问题(如问题“Ⅵ=Ⅵ+Ⅵ”的答案是“Ⅵ=Ⅵ=Ⅵ”),外侧前额皮层损伤患者比正常被试表现更好(82% vs. 43%),对于组块破解问题(如问题“Ⅱ=Ⅲ+Ⅰ”答案是“Ⅲ=Ⅱ+Ⅰ”),两组被试没有差异.研究者认为,背外侧前额皮层是建构假设驱动的问题反应空间的关键脑区,损伤背外侧前额皮层会削弱问题空间构建过程中的自上而下控制^[14].脑损伤者在顿悟问题解决中的表现与正常被试相当或者更好,都说明组块破解和约束松懈不需要自上而下的意识控制.

然而,以正常成年人作为被试的脑功能成像研究发现,顿悟式组块破解激活了前额皮层、扣带回等执行控制和元认知功能区^[17-20],说明组块破解形态顿悟需要意识控制,可能是因为诱发顿悟范式中的线索唤醒了被试的意识.对于研究结果的分歧,除了方法学差异之外,还存在另一种可能性解释:顿悟式组块破解可能是意识加工与无意识加工的综合体,不同阶段或属性加工的意识水平不同.

或许,顿悟的某些加工阶段是无意识的,另一些加工阶段是有意识的.(1)顿悟问题解决可以划分为准备阶段、酝酿阶段、顿悟阶段和验证阶段^[40],或许酝酿阶段的加工是无意识的^[41,42],而顿悟瞬间及其之后的验证阶段的加工应该是有意识的;顿悟问题解决也可以划分为搜索阶段、僵局阶段和表征重构阶段^[43],工作记忆能力主要影响顿悟问题解决的搜索阶段加工,而不是重构阶段加工^[44],说明搜索阶段是有意识控制的,而表征重构阶段则不是.(2)顿悟阶段有广义和狭义之分^[6],狭义的顿悟阶段仅指僵局

的打破,它可能是在完全无意识的状态下发生的、不需要自上而下的控制;广义的顿悟阶段包括僵局的打破和解决方案的执行,解决方案的执行需要监测和解决认知冲突,应该是有意识进行的,尤其是复杂解决方案的执行可能需要更多的意识控制。正如 Reverberi^[14]发现前额皮层损伤者在问题空间较小的顿悟问题上比正常被试表现更好或没有差别,但是在问题空间较大的顿悟问题上(如问题“ $IV=III-I$ ”答案是“ $IV-III=I$ ”)却比正常被试表现更差。

又或许,顿悟的某些属性的加工是无意识的,另一些属性的加工是有意识的。在新近的研究中,Huang等人^[18]分离了组块破解中新颖性加工和合理性加工的神经基础,发现新颖性加工激活了程序性记忆系统的核心区域——基底核,合理性加工激活了陈述性记忆系统的核心区域——海马,可能意味着顿悟式组块破解的新颖性加工和合理性加工分别是无意识和有意识的。组块破解的新颖性加工涉及到旧的认知模式的打破和新的认知模式的建立,这种与习惯修正或改变相关的加工应该是无意识的;而合理性加工会建立与任务目标相关的有效联结,它作为目标导向性活动应该是有意识的。与此观点一致的是,Yang等人^[45]发现无意识思考比有意识思考更有利于促进创造力的新颖性,而不是合理性。

6 总结与展望

迄今,组块破解形态顿悟的基本脑认知机理已经被探索清楚。本文基于认知神经科学视角,全面介绍了组块破解形态顿悟的认知与神经特征:(1)组块破解具有“突发性”、“直指性”等典型的顿悟属性;(2)组块破解是在知觉水平上发生的特殊形态顿悟,初级视觉皮层和高级视觉皮层的活动存在“失协性”,背侧视觉通路和腹侧视觉通路的活动具有“协同性”;(3)阻碍组块破解形态顿悟发生的障碍有多重,多重障碍源还会产生“叠加放大效应”,不仅增强了腹侧视觉通路和背侧视觉通路的调控连结,而且也增强

了腹侧视觉通路终端到背侧视觉通路终端之间的调控连结;(4)组块破解形态顿悟是大脑左右半球协同作用的产物,“蔡格尼克效应”存在右半球偏侧性;(5)组块破解形态顿悟是意识与无意识的综合体,或许新颖性加工是无意识的、有效性加工是有意识的,又或许酝酿期是无意识的、而顿悟期和验证期是有意识的。

顿悟式组块破解的脑认知机理研究,还有助于揭示创造性思维的一般性认知神经规律。比如,顿悟式组块破解过程中发现的顶-枕区抑制现象,类似于组合远距离联想活动中顶-枕区抑制现象^[46],支持“顿悟需要抑制视觉输入”的假设^[47],说明顿悟或创造性思维可能需要排除外源刺激的干扰,或者说由外源注意转向内源注意更有利于创造力^[48]。再比如,Huang等人^[18]分离组块破解和约束松懈类顿悟问题解决行为的新颖性与合理性特征的认知神经机制的研究发现,大脑内可能存在一套具有优先级的层级加工系统,赋予不同种类加工的优先级不同,优先级顺序由高到低依次是常规有效、常规无效、新颖有效、新颖无效的加工。所以,在任何问题情境中,大脑都会优先选择常规思路来理解、思考和解决问题。脑内的层级加工系统很好地解释了“为什么在创造性思维活动中要克服常规思路的干扰”^[49],也有利于揭示“知识经验如何阻碍创造性思维活动”。

当然,我们也清楚地意识到,组块破解只是多种顿悟形态之一。自从21世纪初开创了顿悟的认知神经科学研究热潮,十余年来,组块破解、组合远距离联想和原型启发形态顿悟都获得了相对系统地研究,但是,约束松懈、功能固着解除等其他形态顿悟的研究依然处于零星状态,尚且不能够系统地回答“为什么会进入僵局”,“僵局是如何被打破的”以及“打破僵局之后又发生了什么”等问题。鉴于顿悟形态的多样性与复杂性,未来的研究应该继续贯彻“类型化研究”思路,分别探明每一种形态顿悟的特异性和一般性心理与神经基础,然后才能够建构出完整的顿悟认知神经理论。迄今,顿悟的研究依然是任重而道远。

参考文献

- 1 Eysenck M, Keane M. Cognitive Psychology: A Student's Handbook. London: Psychology Press, 2010
- 2 Metcalfe J, Wiebe D. Intuition in insight and non-insight problem solving. Mem Cogn, 1987, 15: 238-246
- 3 Schooler J W, Ohlsson S, Brooks K. Thoughts beyond words—When language overshadows insight. J Exp Psychol Gen, 1993, 122: 166-183
- 4 Smith R W, Kounios J. Sudden insight: All-or-none processing revealed by speed-accuracy decomposition. J Exp Psychol Learn Mem

- Cogn, 1996, 22: 1443–1462
- 5 Ohlsson S. Restructuring revisited.1. Summary and critique of the Gestalt theory of problem solving. *Scand J Psychol*, 1984, 25: 65–78
- 6 Ohlsson S. Restructuring revisited.2. An information processing theory of restructuring and insight. *Scand J Psychol*, 1984, 25: 117–129
- 7 Ohlsson S. Information processing explanation of insight and related phenomena. In: Gilhooly K J, ed. *Advances in the Psychology of Thinking*. London: Harvester-Wheatsheaf, 1992. 1–44
- 8 Kaplan C, Simon H. In search of insight. *Cogn Psychol*, 1990, 22: 374–419
- 9 Knoblich G, Ohlsson S, Haider H, et al. Constraint relaxation and chunk decomposition in insight problem solving. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 1999, 25: 1534–1555
- 10 Ollinger M, Jones G, Knoblich G. Investigating the effect of mental set on insight problem solving. *Exp Psychol*, 2008, 55: 269–282
- 11 Duncker K. On problem solving. *Psychol Monographs*, 1945, 58: 270
- 12 Knoblich G, Ohlsson S, Raney G E. An eye movement study of insight problem solving. *Mem Cogn*, 2001, 29: 1000–1009
- 13 Chi R P, Snyder A W. Facilitate insight by non-invasive brain stimulation. *PLoS One*, 2011, 6: e166552
- 14 Reverberi C, Toraldo A, D’Agostini S, et al. Better without (lateral) frontal cortex? Insight problems solved by frontal patients. *Brain*, 2005, 128: 2882–2890
- 15 Luo J, Knoblich G. Studying insight problem solving with neuroscientific methods. *Methods*, 2007, 42: 77–86
- 16 Luo J, Knoblich G, Lin C. Neural correlates of insight phenomena. In: Kraft E, Gulyás B, Pöppel E, eds. *Neural Correlates of Thinking*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 253–267
- 17 Luo J, Niki K, Knoblich G. Perceptual contributions to problem solving: Chunk decomposition of Chinese characters. *Brain Res Bull*, 2006, 70: 430–443
- 18 Huang F R, Fan J, Luo J. The neural basis of novelty and appropriateness in processing of creative chunk decomposition. *NeuroImage*, 2015, 113: 122–132
- 19 Tang X C, Pang J Y, Nie Q Y, et al. Probing the cognitive mechanism of mental representational change during chunk decomposition: A parametric fMRI study. *Cereb Cortex*, 2016, 26: 2991–2999
- 20 Wu L L, Knoblich G, Luo J. The role of chunk tightness and chunk familiarity in problem solving: Evidence from ERPs and FMRI. *Human Brain Map*, 2013, 34: 1173–1186
- 21 Abraham A. Creative thinking as orchestrated by semantic processing vs. cognitive control brain networks. *Front Hum Neurosci*, 2014, 8: 95–95
- 22 Kroger S, Rutter B, Stark R, et al. Using a shoe as a plant pot: Neural correlates of passive conceptual expansion. *Brain Res*, 2012, 1430: 52–61
- 23 Wu L L, Knoblich G, Wei G X, et al. How perceptual processes help to generate new meaning: An EEG study of chunk decomposition in Chinese characters. *Brain Res*, 2009, 1296: 104–112
- 24 Wu Q Y, Wu L L, Luo J. Effective connectivity of dorsal and ventral visual pathways in chunk decomposition. *Sci China Life Sci*, 2010, 53: 1474–1482
- 25 Glicksohn A, Cohen A. The role of Gestalt grouping principles in visual statistical learning. *Atten Percept Psychophys*, 2011, 73: 708–713
- 26 Quinlan P T, Cohen D J. Grouping and binding in visual short-term memory. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 2012, 38: 1432–1438
- 27 Tang X C, Pang J Y, Luo J. Zeigarnik effect in Insight problem solving: Hemispheric difference in brain activities following problem solving and during hint presentation (in Chinese). *Chin Sci Bull (Chin Ver)*, 2009, 54: 3464–3474 [唐晓晨, 庞娇艳, 罗劲. 顿悟中的蔡格尼克效应: 左右脑在解题失败与提示信息加工时的活动差异. *科学通报*, 2009, 54: 3464–3474]
- 28 Wu L L. Multiple Causes of Difficult in Insightful Chunk Decomposition: Evidence From Behavior and Brain Imaging (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2010 [吴丽丽. 顿悟式汉字组块破解过程中的多重困难: 来自行为和脑成像的证据. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2010]
- 29 Zhang Z L, Zhang J H, Song X X, et al. P300 and creative chunk decomposition (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 2494–2501 [张忠炉, 张嘉卉, 宋欣欣, 等. P300 与创造性组块分解. *科学通报*, 2016, 61: 2494–2501]
- 30 Gobet F, Lane P, Croker S, et al. Chunking mechanisms in human learning. *Trends Cogn Sci*, 2001, 5: 236–243
- 31 Kershaw T C, Ohlsson S. Multiple causes of difficulty in insight: The case of the nine-dot problem. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 2004, 30: 3–13
- 32 Mihov K M, Denzler M, Forster J. Hemispheric specialization and creative thinking: A meta-analytic review of lateralization of creativity. *Brain Cogn*, 2010, 72: 442–448
- 33 Dietrich A, Kanso R. A review of EEG, ERP, and neuroimaging studies of creativity and insight. *Psychol Bull*, 2010, 136: 822–848
- 34 Beeman M J, Bowden E M. The right hemisphere maintains solution-related activation for yet-to-be-solved problems. *Mem Cogn*, 2000, 28: 1231–1241
- 35 Bowden E M, Beeman M J. Getting the right idea: Semantic activation in the right hemisphere may help solve insight problems. *Psychol*

- Sci, 1998, 9: 435–440
- 36 Bowden E M, Jung-Beeman M. Aha! —Insight experience correlates with solution activation in the right hemisphere. *Psychon Bull Rev*, 2003, 10: 730–737
 - 37 Metcalfe J. Feeling of knowing in memory and problem solving. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 1986, 12: 288–294
 - 38 Decaro M S, van Stockum C A, Wieth M B. When higher working memory capacity hinders insight. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 2015, 42: 39–49
 - 39 Wiley J, Jarosz A F. How working memory capacity affects problem solving. *Psychol Learn Motiv*, 2012, 56: 185–227
 - 40 Wallas G. *The Art of Thought*. New York: Harcourt Brace, 1926
 - 41 Gilhooly K J. Incubation and intuition in creative problem solving. *Front Psychol*, 2015, 7: 1807
 - 42 Ritter S M, Dijksterhuis A. Creativity-the unconscious foundations of the incubation period. *Front Hum Neurosci*, 2014, 33: 3–6
 - 43 Sandkuhler S, Bhattacharya J. Deconstructing Insight: EEG correlates of insightful problem solving. *PLoS One*, 2008, 3: 498–498
 - 44 Lv K. The involvement of working memory and inhibition functions in the different phases of insight problem solving. *Mem Cogn*, 2015, 43: 709–722
 - 45 Yang H, Chattopadhyay A, Zhang K, et al. Unconscious creativity: when can unconscious thought outperform conscious thought? *J Consum Psychol*, 2012, 22: 573–581
 - 46 Jung-Beeman M, Bowden E M, Haberman J, et al. Neural activity when people solve verbal problems with insight. *PLoS Biol*, 2004, 2: 500–510
 - 47 Salvi C, Bricolo E, Franconeri S L, et al. Sudden insight is associated with shutting out visual inputs. *Psychon Bull Rev*, 2015, 22: 1814–1819
 - 48 Salvi C, Bowden E M. Looking for creativity: where do we look when we look for new ideas? *Front Psychol*, 2016, 7: 161
 - 49 Gupta N, Jang Y, Mednick S C, et al. The road not taken: Creative solutions require avoidance of high-frequency responses. *Psychol Sci*, 2012, 23: 288–294

Summary for “组块破解形态顿悟的脑认知机理”

The cognitive and neural mechanism of chunk decomposition: A particular form of insight

HUANG FuRong¹, HE Mei² & LUO Jing^{3*}

¹ Department of Psychology, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;

² School of Labor and Human Resources, Remin University of China, Beijing 100872, China;

³ Department of Psychology, College of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China

* Corresponding author, E-mail: luoj@psych.ac.cn

Chunk decomposition refers to decompose familiar patterns into their component elements so that they can be re-grouped in a meaningful manner. It is a creative process that can lead to insight. According to the Representation Change Theory, chunk decomposition can help problem solvers to update their interpretation of the problem situation and then restructure the starting states of the problem's representation. The concept chunk decomposition was put forward by theoretical psychologist Ohlsson S. in 1980s. Since then, studies about the cognitive and neural mechanisms of chunk decomposition have been going on for more than thirty years. Up to now, it has been largely explored. The main findings are as follows: Firstly, chunk decomposition has typical insight attribute, such as “suddenly” and “directly” finding right solution. Secondly, it is a particular form of insight that occurs at the perceptual level. The early visual cortex shows a tendency of negative activation, whereas the higher visual cortex shows a tendency of positive activation. It suggests that, in order to successfully decompose a chunk, the higher visual areas must at least partly be ‘disconnected’ from the input provided by early visual processing. This allows simple features to be rearranged into a different perceptual chunk. Meanwhile, chunk decomposition activates both the dorsal visual pathway and the ventral visual pathway, suggesting that subjects need to perceive both where the chunks are and what the chunks are. Thirdly, there are multiple causes of difficulty to block chunk decomposition, which may exert a “1+1>2” enlarged effect. For example, the factors of chunk tightness and familiarity increase the effective connectivity not only between the “what” and the “where” pathways, but also the functional connection from LITG to LSPL, i.e., from the terminal of the “what” pathway to the terminal of the “where” pathway. Fourthly, chunk decomposition is a product produced by the co-operation of brain's left and right cerebral hemisphere. The right hemispheric lateralization advantage is limited to the stage after the failure in insight problem solving. The Zeigarnik effect shows that, the right hemisphere might be more positive in preserve the unsolved problem in mind and also more responsive to the external hint for problem solving. Fifthly, chunk decomposition is the synthesis of consciousness and unconsciousness processing. Probably, the novel processing of insight problem solving is unconscious, while the appropriate processing is conscious; or maybe the incubation stage in Wallace's four-stage model of problem solving is unconscious, whereas both the illumination and verification stages are conscious.

insight, chunk decomposition, visual stream, multiple causes of difficulty

doi: 10.1360/N972017-00693