

· 主编特邀(Editor-In-Chief Invited) ·

编者按:

刘勋研究员发表于本期的论文《认知控制的模块化组织》，概括性地综述了其研究团队在认知控制的心理和神经机制方面的研究成果。该综述首先概述了认知控制在正常人和认知障碍群体生活中发挥的重要作用，之后介绍了研究者们常用的刺激-反应协同性效应以及冲突适应效应，综述了近期通过此类冲突加工范式探索认知控制的实证研究，并通过课题组的系列研究，阐明了基于不同冲突类型的认知控制模块化组织，提出了冲突监测特异而冲突解决共享的认知控制模型。该综述从刘勋研究员在该领域多年的研究积累出发，对认知控制的模块化组织进行了全面的总结，对认知控制的计算建模总结非常新颖，为进一步探索认知控制的模块化组织提供了新的视角。

(责任编辑：罗劲)

认知控制的模块化组织*

刘 勋¹ 南威治^{1,2} 王 凯^{1,2} 李 琦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 认知控制是人们在目标导向的行为时所表现出的高级认知机能，亦是当前认知神经科学研究的热点之一。研究者们常用刺激-反应协同性效应以及冲突适应效应等，通过考查冲突加工来揭示认知控制的机制。综述了近期利用冲突加工范式探索认知控制的实证研究，并基于 Kornblum 等的维度重叠理论和 Botvinick 等的冲突监测理论，提出了冲突监测特异而冲突解决共享的认知控制模块化组织模型。

关键词 认知控制；刺激-反应协同性效应；冲突适应效应；计算建模

分类号 B842

1 认知控制介绍

认知控制(cognitive control)，也称作执行控制(executive control)，是指个体在信息加工中，根据当前任务目标，自上而下地对相关信息进行储存、计划和操控的过程。当需要人们克服自动化的行为，或者当前任务是不熟悉的、危险的、需要规划和决策的时候，认知控制能力显得尤为必要(Gazzaniga, Ivry, & Mangun, 2009)。研究表明，

多种精神或神经疾患，如精神分裂症(Vercammen et al., 2012)、多动症(De Zeeuw, Weusten, van Dijk, van Belle, & Durston, 2012)、抑郁症(Disner, Beevers, Haigh, & Beck, 2011)、老年痴呆(Geffen, Bate, Wright, Rozenbils, & Geffen, 1993)等患者在认知控制功能及其相关的脑结构上，都存在不同程度的障碍与缺陷。因此，探明认知控制的机制有着广泛的理论和实际意义。

认知控制涉及非常广泛的心理过程和行为范式，如何从这些纷繁复杂的现象形成统一的理论构架，是一个重要的科学问题。在实验研究中，研究认知控制常用的范式包括刺激-反应协同性(stimulus-response compatibility, SRC) (Proctor & Vu, 2006)、任务转换(task switching) (Kiesel et al., 2010)、错误后延迟(post error slowing) (Notebaert

收稿日期: 2013-09-03

* 国家自然科学基金面上项目(31070987)，国家科技支撑计划项目(2012BAI36B01)，中国科学院国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划。

通讯作者: 刘勋, E-mail: liux@psych.ac.cn

et al., 2009)等。实验室研究通常通过认知冲突, 并控制冲突的类型、大小等参数来探索认知控制的内部机制。本文将从冲突加工的视角来探讨 SRC 任务中的认知控制机制, 综合现有理论和实证研究证据, 提出认知控制模块化组织的新思路, 为我们能够更好地探明认知控制的心理过程和神经功能组织提供理论指导。

2 冲突加工的行为和神经机制研究

实验室研究中, 研究者采用不同 SRC 范式, 控制相关变量来考查冲突解决过程中认知控制的内部机制。根据 SRC 效应衍生出的冲突适应效应 (conflict adaptation effect, CA)也是研究常用的指标(Botvinick, Braver, Barch, Carter, & Cohen, 2001; Egner, 2008)。

2.1 冲突加工的行为研究范式和效应

2.1.1 刺激-反应协同性效应

当个体需要对呈现的刺激做出反应时, 如果一些刺激与反应所构成的关系比另一些关系显得更直接、自然或协同, 那么协同条件相比非协同条件行为反应更优的现象便是刺激-反应协同性 (SRC)效应(Proctor & Reeve, 1989; Proctor & Vu, 2006)。SRC 实验范式具有相对简洁和可操作性高的优点, 因此它被广泛地运用在实验室研究当中。常用的 SRC 范式包括 Stroop 任务、Simon 任务、Eriksen 任务等(见图 1)。在 Stroop 范式中, 被试对印刷成不同颜色的文字进行颜色判断, 通常发现被试在印刷颜色和文字语义非协同条件下(如蓝色的“红”)的反应时和正确率要显著差于协同条件下(如红色的“红”)的成绩, 被试需要付出更大的努力来克服非协同条件所产生的干扰(Macleod, 1991; Stroop, 1935)。在 Simon 范式中, 被试对呈现在左右侧位置的刺激按左右键进行判断, 被试在刺激呈现位置和按键反应非协同条件下(如对右侧的刺激按左键)的反应时和正确率要显著差于协同条件(如对左侧的刺激按左键)的成绩(Lu & Proctor, 1995; Simon, 1969)。在 Flanker (Eriksen)范式中, 要求被试对呈现在屏幕中多个刺激的目标刺激(target)进行判断, 而忽略周围的干扰刺激(flanker), 被试在目标与干扰物非协同条件下的反应时和正确率要显著差于协同条件下的成绩(Eriksen & Eriksen, 1974)。

显而易见, 不同的刺激反应协同性任务都需

要认知控制的参与来监测和调控冲突, 但是不同任务之间也存在明显的冲突类别差异, 这些冲突加工依赖于相同的还是特异的认知控制模块, 需要深入地研究。根据 Sternberg 的加因素法则 (Sternberg, 1969), 通过考察不同类型冲突的刺激反应协同性效应是否存在交互作用, 可以推断不同类型的冲突是否由相同的模块负责加工。如果存在交互作用, 则可以说明不同类型的冲突由相同功能模块加工, 反之则由不同模块加工处理, 从而能够帮助我们进一步了解认知控制的模块化组织。Liu, Park, Gu 和 Fan (2010)通过结合 Stroop 范式和 Simon 范式发现, 在行为数据上两种效应是叠加的, 相互之间没有交互作用, 由此推断两种类型冲突的加工是相对独立的、由不同加工模块处理的。

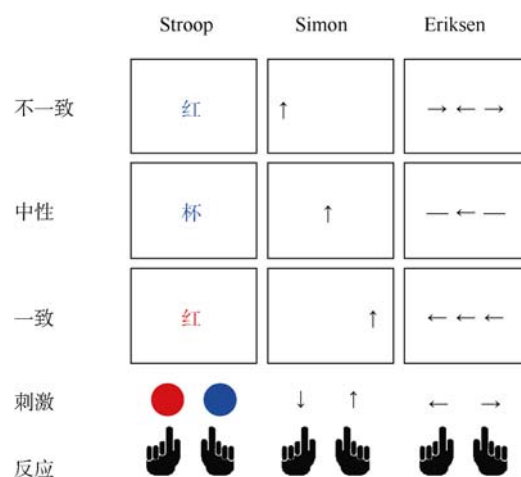


图 1 经典的 SRC 任务

注: 彩图见电子版

2.1.2 冲突适应效应

冲突适应(CA)效应, 也叫做 Gratton 效应或序列效应, 是指在 SRC 任务中, 当前试次的协同性效应量会受到前一试次协同性调节的现象, 也就是说, 前一个试次是非协同条件时, 较前一个试次是协同条件时, 当前试次的 SRC 效应会减小 (Gratton, Coles, & Donchin, 1992)。Nieuwenhuis 等(2006)给出了一个以反应时为指标计算 CA 效应的公式: $CA \text{ 效应} = (RT_{CI} - RT_{CC}) - (RT_{II} - RT_{IC})$ 。其中的下标表示序列试次的类型, cI 表示前一试次为协同当前试次为非协同的试次; cC 表示前后都

为协同条件的试次; iI 表示前后都为非协同的试次; iC 表示前一试次为非协同当前试次为协同的试次。

Gratton 等(1992)采用 Flanker 任务首次发现了 CA 效应, 后续研究在 Simon 任务和 Stroop 任务中同样也发现了 CA 效应(Kerns, 2006; Kerns et al., 2004; Larson, Kaufman, & Perlstein, 2009b; Wühr & Ansorge, 2005)。此外, 一些研究还从不同视角, 如刺激是否被意识到、对结果进行奖赏反馈等, 探索 CA 效应。van Gaal, Lamme 和 Ridderinkhof (2010)通过操控刺激的意识阈限, 在无意识下同样发现了 CA 效应。van Steenbergen, Band 和 Hommel (2009)发现在箭头 Flanker 任务后给予正性反馈时, CA 效应下降, 得出奖赏行为和冲突解决彼此可能通过多巴胺相互影响。

通过考察不同类型冲突之间是否存在 CA 效应, 也可以检验认知控制模块化组织。如果前后试次冲突类型不同(跨冲突类型)也能像冲突类型一致(同冲突类型)一样, 出现 CA 效应, 那么我们可以推断不同类型冲突是由相同的一个功能模块进行处理的; 反之, 它们则由不同的功能模块负责加工的。Egner, Delano 和 Hirsch (2007)通过结合 Stroop 范式和 Simon 范式的实验, 在行为数据上发现了两种类型冲突在同冲突类型条件下产生 CA 效应, 而在跨冲突类型时并没有发现 CA 效应, 由此推断两种类型的冲突可能是由不同的功能模块进行加工的。

2.2 冲突加工的神经机制研究

对正常人类的冲突加工的神经机制研究主要采用脑电(electroencephalography, EEG)以及功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)来探索。发现对冲突敏感的 ERP 成分主要包括有 N200(N2), P300(P3), N450, 持续正电位(sustained potential, SP)等, 脑成像发现对冲突敏感的区域主要包含前扣带回(anterior cingulate cortex, ACC), 背外侧前额叶(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC), 额下回(inferior frontal gyrus, IFG), 后部顶叶(posterior parietal cortex, PPC), 前脑岛(anterior insula, AI)等脑区。

2.2.1 刺激-反应协同性效应的神经机制

在 Stroop 任务中, 刺激呈现 350 至 500 毫秒的 N450 成分, 非协同条件比协同条件, 在中央额区-顶区有更大的负走向; 另外, 分布于前部至中央顶区的 SP 成分也对 Stroop 效应敏感(Liotti,

Woldorff, Perez, & Mayberg, 2000; West, 2003)。在 Flanker 任务中, 刺激呈现 200 毫秒后出现的 N2 成分, 非协同条件相比于协同条件, 在额-中央区有更大的负走向(Heil, Osman, Wiegmann, Rolke, & Hennighausen, 2000; van Veen & Carter, 2002b)。而在 Simon 任务中, 中央-顶区 P3 成分(刺激后约 300 毫秒开始出现)的潜伏期会随刺激的协同性产生变化, 即非协同试次 P3 的潜伏期更晚(Donchin & Coles, 2010; Leuthold, 2011)。将 EEG 信号进行时频(time-frequency)转换, 可以分析心理事件所引起的事件相关神经震荡(event-related neural oscillations), 从而揭示心理事件对不同频段 EEG 信号非锁相的调制(Larson, Kaufman, & Perlstein, 2009a; Roach & Mathalon, 2008)。时频分析可以区分心理事件对这些信号能量值的调节, 即事件相关频谱扰动(event-related spectral perturbation, ERS)和事件对各频段信号试次间相位一致性的调节(inter-trial coherence, ITC)。以往研究发现, 在需要更多认知控制的条件下分布于额-中央区的 Theta 波段(4-8 Hz)的 EEG 震荡的能量值会显著升高(Cavanagh, Cohen, & Allen, 2009; Hanslmayr et al., 2008; Nigbur, Cohen, Ridderinkhof, & Stürmer, 2012; Nigbur, Ivanova, & Stürmer, 2011; Sauseng, Griesmayr, Freunberger, & Klimesch, 2010)。

Adelman 等(2002)通过 Stroop 范式发现, 非协同条件相对于协同条件, 大脑左侧的 ACC、DLPFC 等区域存在显著激活。Huyser, Veltman, Wolters, de Haan 和 Boer (2011)通过 Flanker 范式发现, 非协同条件相对协同条件, 右侧的 ACC 和脑岛等区域存在显著激活。Nee, Wager 和 Jonides (2007)在元分析中对多种 SRC 任务(Stroop 任务, Simon 任务, Flanker 任务, Go/NoGo 任务等)的激活脑区做了总结, 结果发现 ACC, DLPFC, IFG, PPC, AI 等脑区共同参与协同性效应的加工。

通过刺激反应协同性效应的脑成像结果, 可以观察不同类型的冲突是否在大脑激活模式上存在区分。如果存在分离, 则提示不同类型的冲突是由不同的功能模块加工处理, 反之则由相同功能模块加工处理。Fan, Flombaum, McCandliss, Thomas 和 Posner (2003)利用脑成像研究了三种不同的冲突任务, 结果发现, 不同类型的冲突加工共同激活了 ACC 和左侧前额叶(left prefrontal cortex, LPFC), 但是在其他脑区激活上存在分离,

因此推测不同类型的冲突加工可能由不同的认知控制网络负责。Liu, Banich, Jacobson 和 Tanabe (2004)通过同一个任务,比较了 Stroop 效应和 Simon 效应所激活的大脑网络,发现对两种冲突的加工,既共同调用了 DLPFC,又分别激活了各自独特的脑区。综合以上发现可以推断,对于不同类型冲突的加工,既涉及不同机制又涉及到一些共同的机制。

2.2.2 冲突适应效应的神经机制

已有研究发现了与 CA 效应相关的 ERP 成分,如 N2, SP 等。Larson 等(2009b)通过 Stroop 范式验证了冲突 SP 成分对于 CA 效应敏感,但 N450 并不敏感。Larson 等通过 Stroop 范式发现外伤性脑损伤病人和正常控制组在反应时上都发现了 CA 效应,但在 SP 成分上控制组表现出了 CA 效应,而脑损伤组并没有(Larson, Farrer, & Clayton, 2011; Larson et al., 2009a)。Clayson 和 Larson (2011)通过 Flanker 任务,在 N2 成分上发现了 CA 效应,表现为前一试次冲突时较前一试次一致时,当前试次 N2 成分的振幅更负走向。

Botvinick, Nystrom, Fissell, Carter 和 Cohen (1999)通过 Flanker 范式,在脑成像研究中发现 ACC 的激活存在 CA 效应,即在前一试次非协同条件下的激活水平比前一试次协同条件下的激活水平更低,提示 ACC 主要参与冲突水平的监测,而非冲突的解决。Kerns 等(2004)通过颜色字词 Stroop 任务(去掉刺激重复或反应重复后),发现当前一试次冲突时 ACC 激活与下一个试次 DLPFC 激活正相关,提示 ACC 在认知控制中的起冲突监测作用,而 DLPFC 则负责具体地调节。Egner 和 Hirsch (2005)通过 Stroop 任务观察 CA 效应,在冲突时大脑皮层对任务相关信息的加工增强。Kerns (2006)通过 Simon 任务发现 CA 效应在 ACC 和 DLPFC 有更大的激活。当前一试次冲突时伴随着 ACC 的激活,并且能够预测到在后续试次中会有更强的 DLPFC 的增强。Egner 等(2007)通过整合 Stroop 范式和 Simon 范式,在脑成像结果上发现 Stroop 类型冲突更多地激活了顶叶,Simon 类型冲突则更多地激活了前运动皮层,由此认为认知控制包括两个独立并行的神经回路,分别处理不同类型的冲突。

2.3 冲突监测理论

为了回答在冲突加工过程中认知控制过程

是如何被调用的这个问题, Botvinick 等总结了来自 SRC 范式、错误加工和词汇产生等范式的实证数据,提出了冲突监测理论(conflict monitoring theory) (Botvinick et al., 2001; Botvinick, Cohen, & Carter, 2004; van Veen & Carter, 2006)。该理论假设存在一个冲突监测模块,负责发现并评估信息加工中的冲突水平。评估信息会被传递到负责认知控制功能的执行控制模块,由后者解决冲突,做出正确反应。该理论进一步推测 ACC 是负责冲突监测的脑区(Ito, Stuphorn, Brown, & Schall, 2003; Kerns et al., 2004; Mayr, 2004; van Veen & Carter, 2002a)。另一方面,汇聚的证据显示 DLPFC 是执行性控制过程中的关键区域(Alvarez & Emory, 2006; Badre & Wagner, 2004; D'Esposito, Postle, Ballard, & Lease, 1999; Egner & Hirsch, 2005; MacDonald, Cohen, Stenger, & Carter, 2000; Owen, McMillan, Laird, & Bullmore, 2005)。由此,认知控制的过程可以做如下理解:由 ACC 负责的冲突监测机制与由 DLPFC 主导的执行控制机制共同完成了自上而下的认知控制过程,这种中枢控制过程可以调控感知觉区域等初级脑区的信息加工过程。

冲突监测理论对于 CA 效应的解释是:前一试次的冲突调动的执行控制模块激活延续到当前试次,从而使得当前冲突更小并得到更好的解决(Botvinick et al., 2001)。研究者也提出了不同于冲突监测理论的其他解释,例如持自下而上观点的研究者们认为刺激、反应的完全重复,或者部分重复,刺激-反应联结重复等因素是导致冲突适应效应的主要原因(Hommel, Proctor, & Vu, 2004; Mayr, Awh, & Laurey, 2003)。例如,Mayr 等(2003)通过两个实验发现当去除重复试次后,CA 效应消失,因此认为是刺激重复产生 CA 效应。针对这些因素,Wühr 和 Ansorge (2005)通过 Simon 范式考查 CA 效应,排除了重复/倒置效应(刺激重复,反应重复或者刺激,反应完全倒置),仍发现了 CA 效应,因此提示 CA 效应可能是由冲突监测和特征整合共同导致。Kerns (2006)通过 Simon 任务发现,当前试次非协同条件比协同条件,ACC 有更大的激活,并且当前试次 ACC 的激活能够预测下一试次 DLPFC 会有更高的激活。从这个角度支持了冲突监测理论对 CA 效应的解释。综上所述,即便排除刺激重复或反应重复,CA 效应依旧存在,

因此冲突监测是产生 CA 效应的原因之一(Egner, 2008)。

3 认知控制模块化组织的冲突加工研究

冲突监测理论将认知控制分为两个模块, 即冲突监测模块和执行控制模块。那么不同冲突是否是由不同的冲突监测模块和执行控制模块处理的? 维度重叠理论框架为回答这个问题提供了理论指导。

3.1 维度重叠理论

Kornblum, Hasbroucq 和 Osman (1990)提出维度重叠(Dimensional Overlap, DO)理论, 分析了不同范式中各种组成元素所构成的各类集合之间的关系, 并据此为各种 SRC 效应及其对应的范式提供了一个统一的理论框架和分类体系(Kornblum, 1992; Kornblum et al., 1990; Kornblum, Stevens, Whipple, & Requin, 1999)。具体地讲, SRC 任务中, 刺激的属性可分为任务相关(task relevant stimulus, Sr)属性和任务无关(task irrelevant stimulus, Si)属性, 刺激的不同属性(一个任务可能有多个 Si)可以组成各自的集合; 同样, 任务的反应也构成一个反应(R)集合。例如, 在按键 Stroop 任务中, 被试需要对颜色词的印刷颜色做出左右手按键反应。词语的印刷颜色是 Sr, 词语的语义是 Si, 各自构成一个集合; 任务所要求的反应(左和右)也构成一个反应集合。所谓维度重叠, 是指上述不同集合的元素间在知觉、结构或概念(维度)上的相似程度。根据 DO 理论, 只要两个集合间存在维度重叠, 就可以诱发出不同程度的协同与非协同, SRC 效应主要就是由各类集合间的维度重叠造成的(Kornblum et al., 1990)。维度重叠可能发生在任意两个或多个集合之间, 比如, 上述的按键 Stroop 任务就属于典型的“刺激-刺激”(stimulus-stimulus, S-S)维度重叠, 因为 Si 和 Sr 集合都是与颜色相关的; 而在 Simon 任务中, 被试需要对呈现在视野左右的刺激进行左右按键反应, 此时的维度重叠就发生在 R 与 Si 之间。根据三种集合, 维度重叠可能出现在任意两种维度之间, 因此可以把所有的 SRC 范式(效应)分为八类(Kornblum, 1992, 1994; Kornblum & Lee, 1995)。而其中本质的一个划分, 是 S-S 与 S-R 类型的区分(这里是将 Si 和 Sr 统一视为 S, 即刺激属性), 这两种类型的 SRC 效应存在不同的加工机制也是

DO 理论最本质的预测。以下列举不同类型具有不同加工机制的行为研究和神经机制研究。

3.2 维度重叠理论框架下的心理物理研究

行为研究发现 S-S 类型和 S-R 类型的冲突加工具有可加性(additive)。Liu 等(2010)通过结合 Stroop 范式和 Simon 范式, 同时考查了在同一个任务下 S-S 冲突和 S-R 冲突加工, 结果发现了 S-S 和 S-R 冲突加工在反应时上是叠加的, 因此推断两种类型的冲突是独立的。Eikmeier, Schröter, Maienborn, Alex-Ruf 和 Ulrich (in press)通过给被试呈现时间相关句子或者空间声音, 让被试口头报告过去与未来或者前和后, 结果发现, 不管在对时间相关句子判断还是在空间声音判断中, 口语报告过去与未来的被试的协同性效应表现出和口语报告前和后的被试的协同性效应相似, 从而说明时间和空间上存在较强的维度重叠。

从冲突适应性的角度进行研究也发现, 不同的 DO 类型表现出了独立性。Egner 等(2007)通过 Stroop 范式和 Simon 范式的结合, 发现只有在前后试次的冲突类型相同时才有 CA 效应, 冲突类型不同时没有发现 CA 效应, 从而进一步支持了 S-S 和 S-R 类型的冲突加工是分离的。Funes, Lupianez 和 Humphreys (2010)根据 DO 理论结合了两种不同类型 SRC 范式做了四个实验, 排除特征整合, 结果发现类型内存在冲突适应效应, 而类型间没有出现。Akçay 和 Hazeltine (2011)通过 Simon 范式和 Flanker 范式的结合, 发现了在类型内存在冲突适应效应, 类型间并没有冲突适应效应。

3.3 维度冲突理论框架下的神经机制研究

Liu 等(2004)通过 fMRI 实验发现, S-S 冲突和 S-R 冲突既分享着某些认知控制相关的共同的神经元回路, 又有着各自独特的冲突加工的脑区, 它们共同激活了认知控制源, 如 DLPFC 和枕中回和颞下回; S-R 类型冲突更多激活了与反应冲突监测, 反应选择和计划相关的 ACC, SMA 和楔前叶(precuneus); S-S 类型冲突更多激活了顶下叶。Egner 等(2007)通过 Stroop 范式和 Simon 范式的结合, 发现了 S-S 类型的冲突主要激活了顶叶皮层(parietal cortex), S-R 类型的冲突主要激活了前运动皮层(premotor cortex)。

Frühholz, Godde, Finke 和 Herrmann (2011)通过 Flanker 和 Simon 结合的范式, 考查两种不同类型的 SRC 效应是否涉及不同的神经机制。结果发

现,在行为数据上 S-S 类型的具有更强的效应量并且消退的更慢。在 ERP 数据上发现 S-S 类型调节了 N2 和早期的 P300 成分,而 S-R 类型调节了晚期的 P3b 成分,两者在时间上存在分离。在脑成像数据上, S-S 类型更多激活了 ACC, 而 S-R 类型更多激活了后扣带回, 两者在脑区激活上也存在分离。由此说明两种类型的冲突由不同的神经机制加工处理。

3.4 认知控制模块化组织的探讨

自从 Fitts 和 Seeger (1953)正式定义了 SRC 效应之后, 有关于 SRC 的实证研究已经历半个多世纪, 一些理论用以推测其心理加工机制, 如 Kornblum 等(1990)的维度重叠理论, Botvinick 等(1999)的冲突监测理论等。随着近年来认知神经科学的快速兴起, 一些理论在揭示认知控制心理及神经机制方面展现出较强的生命力。

DO 理论将各种 SRC 任务整合到了一个统一的框架中, 并将他们统一分类为两种不同的类型, 即 S-S 类型和 S-R 类型。DO 理论预测 S-S 类型的加工和协同性的产生会相对地早于 S-R 类型。根据这个假设, Kornblum 等提出了一个模型(见图 2), 包含一个刺激表征阶段和反应生成阶段。反应生成阶段包含两条通路, 一条是自动生成通路, 不管信息是否是任务相关都会自动生成一个反应。一条是内部反应生成通路, 根据当前任务对相关信息产生一个反应。两条通路生成的反应会相互竞争得出一个正确反应。刺激表征阶段和反应生成阶段两个阶段共同作用便生成了不同类型的 SRC 效应(Kornblum & Lee, 1995; Kornblum et al., 1999)。

Botvinick 等根据冲突监测理论提出了认知控制模型, 主要包含两个模块: 冲突监测模块

(conflict monitoring, CM) 和执行控制模块(executive control, EC), 即 1CM1EC。其中冲突监测模块监测所有冲突, 执行控制模块处理所有冲突(Botvinick et al., 2001, 2004)。

Egner 等(2007)通过 Stroop 和 Simon 完全整合的范式发现 S-S 类型和 S-R 类型的 CA 效应是冲突特异性的, 前运动皮层主要负责 S-R 维度的冲突, 顶叶皮层主要负责 S-S 类型的冲突。结合以上的 DO 模型和冲突监测理论, Egner (2008)比较了 2CM2EC 模型和 1CM1EC 模型(见图 3A, 图 3B), 他认为 S-S 类型和 S-R 类型的冲突加工是独立并行的加工通路, 是由完全独立的冲突监测模块和执行控制模块分别进行加工, 支持 2CM2EC 模型。

Liu 等(2004)通过 fMRI 实验发现 S-S 冲突和 S-R 冲突在大脑激活上既有相同又有不同。两种冲突共同激活了执行控制脑区, 如 DLPFC; S-R 类型冲突更多激活了与反应冲突监测, 反应选择和计划相关的 ACC 和 SMA; S-S 类型冲突更多激活了顶下叶; Liu 等(2010)通过整合 S-S 冲突和 S-R 冲突的实验范式, 发现两者所产生的 SRC 效应在反应时和正确率上是相互叠加的。根据加因素法则, 两种类型的冲突是独立加工的。因此提出了 2CM1EC 模型(见图 3C), 推断基于 DO 模型分类的 S-S 类型和 S-R 类型两者既有相同的加工模块, 又有不同的加工模块, 即两种类型是由不同的冲突监测模块独立进行监测, 并依赖一个共享的执行控制模块进行调节。

基于生物基础的计算建模已经成为认知神经科学重要的一个领域。它能够帮助我们整合所有已观察到的不同水平的数据, 详细描述出复杂神经功能的内部工作机制。它能够通过改变模型

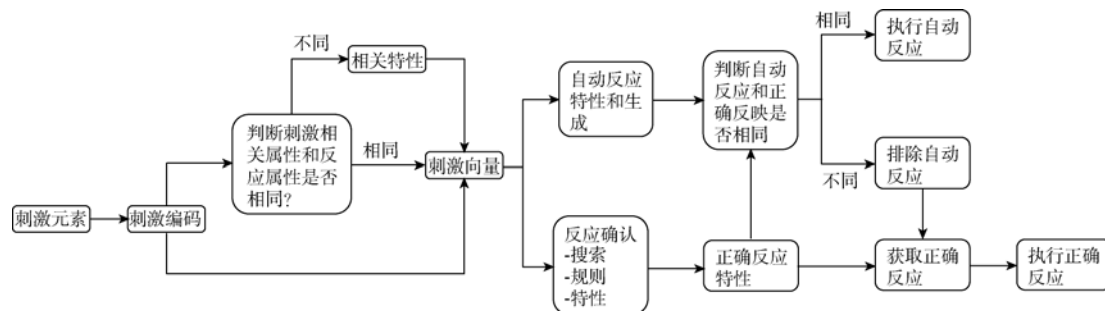
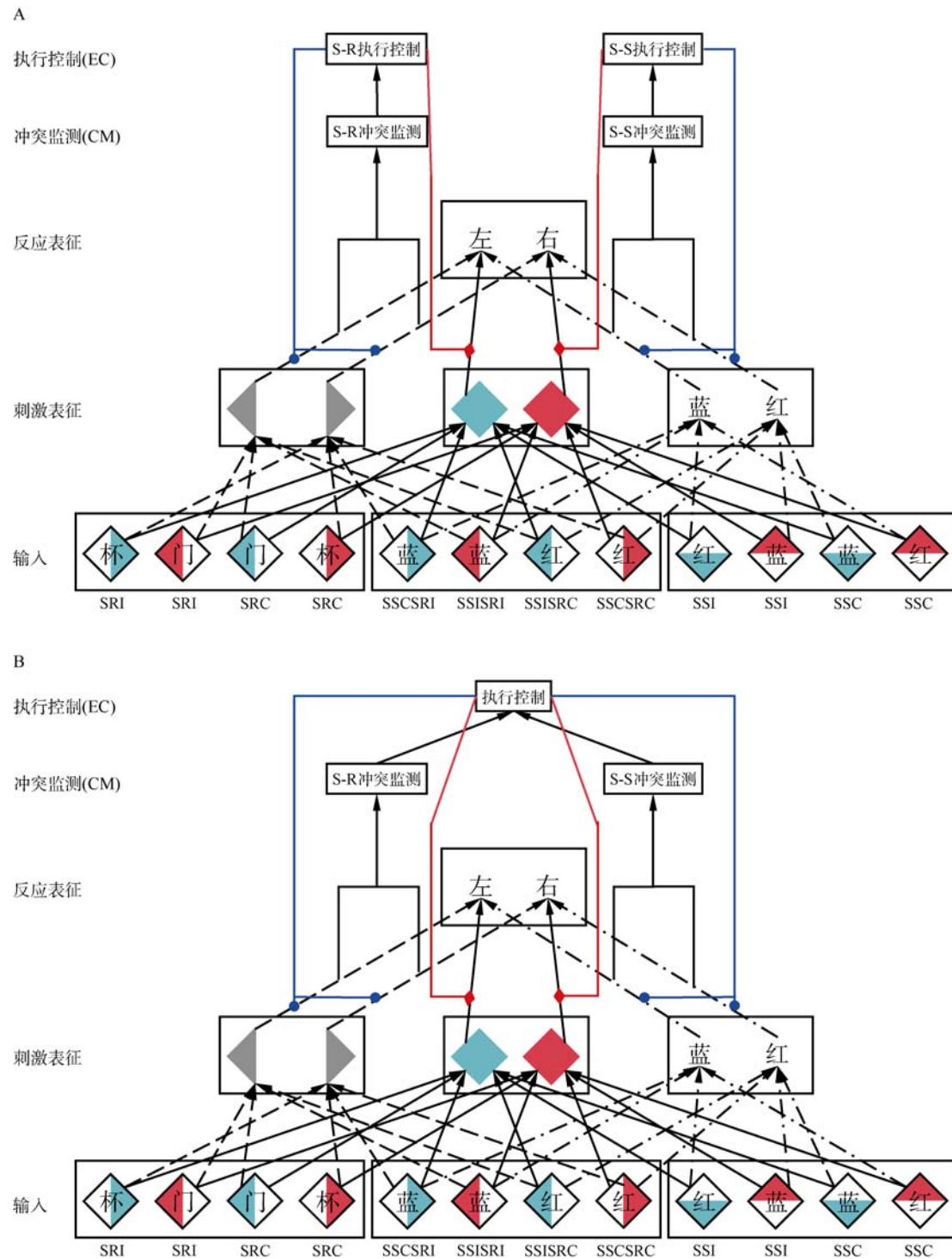


图 2 维度重叠(DO)模型

注: 根据 Kornblum 和 Lee (1995)模型修改



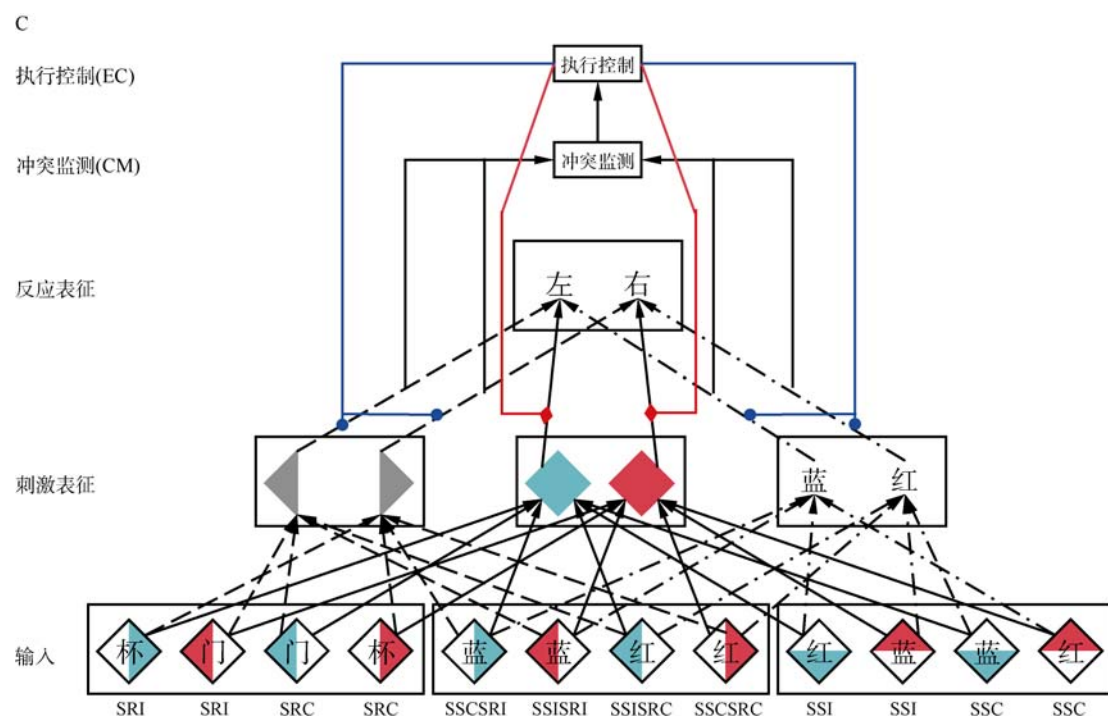


图 3 1CM1EC 模型(A), 2CM2EC 模型(B)和 2CM1EC 模型(C)

注：彩图见电子版

中一个细节来模拟神经损伤, 经过复杂的交互作用就会最终改变了行为的结果, 来观察预期神经损伤所造成的结果。从这个角度去探索认知科学是其他研究方法所不能达到的 (O'Reilly, 2006; O'Reilly & Munakata, 2000)。后续的研究可以通过计算神经模型来模拟 2CM1EC, 2CM2EC, 1CM1EC 模型, 以验证哪个模型能够更好地拟合已有数据, 从而进一步论证模型的正确性。我们采用计算神经建模, 根据我们行为实验的范式 (Liu et al., 2010), 构建了 2CM1EC 和 1CM1EC 模型, 发现 2CM1EC 能够更好地拟合行为数据。

4 总结与展望

认知控制是人类日常行为中必不可少的一个心理机能。但目前它的内部神经机制依然不清楚。DO 理论对 SRC 效应做出了不同维度的划分, 从不同维度相互重叠的角度解释了 SRC 效应, 并主要做了 S-S 类型和 S-R 类型的划分。冲突监测理论认为对于冲突的解决涉及到两个模块, 即冲突监测模块(CM)和执行控制模块(EC), CM 主要

负责对冲突的监测, 并将冲突信号传递给执行控制模块(EC), EC 针对当前的冲突信息, 对任务相关维度的信息强化加工, 对任务无关的信息进行抑制, 从而使得当前任务更好更准确的完成。当前的研究已经发现了认知控制功能主要涉及 ACC, DLPFC 等脑区的参与。ACC 主要负责冲突监测功能(即冲突监测模块的功能), DLPFC 主要负责执行控制功能(即执行控制模块的功能)。结合先前的行为和神经成像数据, 并在之前模型的基础上, Liu 等(2010)提出了 2CM1EC 的认知冲突解决模型, 不同类型的认知冲突是通过不同的模块进行监测的, 即 S-S 类型的冲突和 S-R 类型的冲突分别由两个并行的冲突监测模块负责监测, 但是冲突解决是采用共同的执行控制模块来实现的。未来探索认知控制机制, 可以从以下 5 点考虑:

(1) 寻找能更好分离 S-S 冲突和 S-R 冲突的范式。目前的一些研究等通过 CA 效应发现了对于刺激维度和反应维度两种类型的冲突是相互独立。但是其实验范式仍旧包含反应重复的混淆因素, 同时不同冲突是由刺激属性差异造成还是属

于 DO 的不同分类, 还不清楚。本课题组的研究人员正在尝试在排除反应重复的前提下, 利用不同类型的冲突范式来探明两种类型冲突的加工是否独立。

(2)探索能够确定共用一个执行控制模块的实验范式和实证证据。执行控制模块的功能是根据冲突监测模块传递的冲突信息, 通过对信息偏向性处理当前的冲突, 从而完成当前任务。但是执行控制模块是一个通用的模块还是由独立解决不同冲突类型的子模块组成, 这个问题还有待后续进一步探明。

(3)冲突监测模块和执行控制模块两者的分离也需要进一步的探索。冲突监测理论认为冲突监测模块和执行控制模块两者是分离的, 神经生理学上也发现了冲突监测是由 ACC 负责, 执行模块是由 DLPFC 负责。但是由于 fMRI 技术在时间分辨率上并不很敏感, 并不能很好地揭示两个脑区激活在时间进程上的分离, 因此它们究竟是一个共同模块还是相互独立的两个模块, 这个问题仍需要后续寻找能够分离两个模块的范式和技术来探明。

(4)计算神经建模能够在假设完全知道内部神经机制通路的基础上, 来探索性地验证神经内部机制的工作原理。未来可以在实证研究的基础上, 通过计算神经建模方法来建构不同的冲突监测模型(如 1CM1EC, 2CM1EC, 2CM2EC 等), 检测不同模型是否能对不同的实证数据进行较好地拟合, 从建模的角度探明冲突监测模块和执行控制模块的具体机制。

(5)可以采用更多的技术来探究模块化分离问题。多体素模式分析(multivoxel pattern analyses, MVPA) (Jiang & Egner, in press), EEG 时频分析(Roach & Mathalon, 2008)等技术可以从新的角度将原有数据进行分析, 分离出独特信息, 从而帮助我们进一步探索不同类型冲突是否存在独立加工机制。

参考文献

- Adleman, N. E., Menon, V., Blasey, C. M., White, C. D., Warsofsky, I. S., Glover, G. H., & Reiss, A. L. (2002). A developmental fMRI study of the Stroop color-word task. *Neuroimage*, 16(1), 61–75.
- Akçay, C., & Hazeltine, E. (2011). Domain-specific conflict adaptation without feature repetitions. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18(3), 505–511.
- Alvarez, J. A., & Emory, E. (2006). Executive function and the frontal lobes: A meta-analytic review. *Neuropsychology Review*, 16(1), 17–42.
- Badre, D., & Wagner, A. D. (2004). Selection, integration, and conflict Monitoring-Assessing the nature and generality of prefrontal cognitive control mechanisms. *Neuron*, 41(3), 473–487.
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S., & Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, 108(3), 624–652.
- Botvinick, M. M., Cohen, J. D., & Carter, C. S. (2004). Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: an update. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(12), 539–546.
- Botvinick, M. M., Nystrom, L. E., Fissell, K., Carter, C. S., & Cohen, J. D. (1999). Conflict monitoring versus selection-for-action in anterior cingulate cortex. *Nature*, 402(6758), 179–181.
- Cavanagh, J. F., Cohen, M. X., & Allen, J. J. B. (2009). Prelude to and resolution of an error: EEG phase synchrony reveals cognitive control dynamics during action monitoring. *The Journal of Neuroscience*, 29(1), 98–105.
- Clayson, P. E., & Larson, M. J. (2011). Conflict adaptation and sequential trial effects: Support for the conflict monitoring theory. *Neuropsychologia*, 49(7), 1953–1961.
- D'Esposito, M., Postle, B., Ballard, D., & Lease, J. (1999). Maintenance versus manipulation of information held in working memory: An event-related fMRI study. *Brain and Cognition*, 41(1), 66–86.
- De Zeeuw, P., Weusten, J., van Dijk, S., van Belle, J., & Durston, S. (2012). Deficits in cognitive control, timing and reward sensitivity appear to be dissociable in ADHD. *PLoS One*, 7(12), e51416.
- Disner, S. G., Beevers, C. G., Haigh, E. A., & Beck, A. T. (2011). Neural mechanisms of the cognitive model of depression. *Nature Reviews Neuroscience*, 12(8), 467–477.
- Donchin, E., & Coles, M. G. H. (2010). Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behavioral and Brain Sciences*, 11(3), 357–374.
- Egner, T. (2008). Multiple conflict-driven control mechanisms in the human brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(10), 374–380.
- Egner, T., Delano, M., & Hirsch, J. (2007). Separate conflict-specific cognitive control mechanisms in the human brain. *Neuroimage*, 35(2), 940–948.
- Egner, T., & Hirsch, J. (2005). Cognitive control mechanisms resolve conflict through cortical amplification of task-relevant information. *Nature Neuroscience*, 8(12), 1784–1790.

- Eikmeier, V., Schröter, H., Maienborn, C., Alex-Ruf, S., & Ulrich, R. (in press). Dimensional overlap between time and space. *Psychonomic Bulletin & Review*.
- Eriksen, B. A., & Eriksen, C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception & Psychophysics*, 16(1), 143–149.
- Fan, J., Flombaum, J. I., McCandliss, B. D., Thomas, K. M., & Posner, M. I. (2003). Cognitive and brain consequences of conflict. *Neuroimage*, 18(1), 42–57.
- Fitts, P. M., & Seeger, C. M. (1953). SR compatibility: spatial characteristics of stimulus and response codes. *Journal of Experimental Psychology*, 46(3), 199–210.
- Frühholz, S., Godde, B., Finke, M., & Herrmann, M. (2011). Spatio-temporal brain dynamics in a combined stimulus-stimulus and stimulus-response conflict task. *Neuroimage*, 54(1), 622–634.
- Funes, M. J., Lupiáñez, J., & Humphreys, G. (2010). Analyzing the generality of conflict adaptation effects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 36(1), 147–161.
- Gazzaniga, M. S., Ivry, R. B., & Mangun, G. R. (2009). *Cognitive neuroscience: The biology of the mind* (3rd ed.). New York: W.W. Norton.
- Geffen, G., Bate, A., Wright, M., Rozenbils, U., & Geffen, L. (1993). A comparison of cognitive impairments in dementia of the Alzheimer type and depression in the elderly. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 4(5), 294–300.
- Gratton, G., Coles, M. G., & Donchin, E. (1992). Optimizing the use of information: Strategic control of activation of responses. *Journal of Experimental Psychology: General*, 121(4), 480–506.
- Hanslmayr, S., Pastötter, B., Bäuml, K. H., Gruber, S., Wimber, M., & Klimesch, W. (2008). The electrophysiological dynamics of interference during the Stroop task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(2), 215–225.
- Heil, M., Osman, A., Wiegmann, J., Rolke, B., & Hennighausen, E. (2000). N200 in the Eriksen-task: Inhibitory executive processes? *Journal of Psychophysiology*, 14(4), 218–225.
- Hommel, B., Proctor, R. W., & Vu, K. P. L. (2004). A feature-integration account of sequential effects in the Simon task. *Psychological Research*, 68(1), 1–17.
- Huyser, C., Veltman, D. J., Wolters, L. H., de Haan, E., & Boer, F. (2011). Developmental aspects of error and high-conflict-related brain activity in pediatric obsessive-compulsive disorder: A fMRI study with a Flanker task before and after CBT. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 52(12), 1251–1260.
- Ito, S., Stuphorn, V., Brown, J. W., & Schall, J. D. (2003). Performance monitoring by the anterior cingulate cortex during saccade countermanding. *Science*, 302(5642), 120–122.
- Jiang, J., & Egner, T. (in press). Using neural pattern classifiers to quantify the modularity of conflict-control mechanisms in the human brain. *Cerebral Cortex*.
- Kerns, J. G. (2006). Anterior cingulate and prefrontal cortex activity in an fMRI study of trial-to-trial adjustments on the Simon task. *Neuroimage*, 33(1), 399–405.
- Kerns, J. G., Cohen, J. D., MacDonald, A. W., 3rd, Cho, R. Y., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2004). Anterior cingulate conflict monitoring and adjustments in control. *Science*, 303(5660), 1023–1026.
- Kiesel, A., Steinhauser, M., Wendt, M., Falkenstein, M., Jost, K., Philipp, A. M., & Koch, I. (2010). Control and interference in task switching--A review. *Psychological Bulletin*, 136(5), 849–874.
- Kornblum, S. (1992). Dimensional overlap and dimensional relevance in stimulus-response and stimulus-stimulus compatibility. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior* (Vol. 2, pp. 743–777). Amsterdam: North-Holland.
- Kornblum, S. (1994). The way irrelevant dimensions are processed depends on what they overlap with: The case of Stroop-and Simon-like stimuli. *Psychological Research*, 56(3), 130–135.
- Kornblum, S., Hasbroucq, T., & Osman, A. (1990). Dimensional overlap: Cognitive basis for stimulus-response compatibility--A model and taxonomy. *Psychological Review*, 97(2), 253–270.
- Kornblum, S., & Lee, J.-W. (1995). Stimulus-response compatibility with relevant and irrelevant stimulus dimensions that do and do not overlap with the response. *Journal of Experimental Psychology-Human Perception and Performance*, 21(4), 855–875.
- Kornblum, S., Stevens, G. T., Whipple, A., & Requin, J. (1999). The effects of irrelevant stimuli: 1. The time course of stimulus-stimulus and stimulus-response consistency effects with Stroop-like stimuli, Simon-like tasks, and their factorial combinations. *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*, 25(3), 688–714.
- Larson, M. J., Farrer, T. J., & Clayson, P. E. (2011). Cognitive control in mild traumatic brain injury: Conflict monitoring and conflict adaptation. *International Journal of Psychophysiology*, 82(1), 69–78.
- Larson, M. J., Kaufman, D. A., & Perlstein, W. M. (2009a). Conflict adaptation and cognitive control adjustments

- following traumatic brain injury. *Journal of International Neuropsychological Society*, 15(6), 927–937.
- Larson, M. J., Kaufman, D. A., & Perlstein, W. M. (2009b). Neural time course of conflict adaptation effects on the Stroop task. *Neuropsychologia*, 47(3), 663–670.
- Leuthold, H. (2011). The Simon effect in cognitive electrophysiology: A short review. *Acta Psychologica*, 136(2), 203–211.
- Liotti, M., Woldorff, M. G., Perez, R., & Mayberg, H. S. (2000). An ERP study of the temporal course of the Stroop color-word interference effect. *Neuropsychologia*, 38(5), 701–711.
- Liu, X., Banich, M. T., Jacobson, B. L., & Tanabe, J. L. (2004). Common and distinct neural substrates of attentional control in an integrated Simon and spatial Stroop task as assessed by event-related fMRI. *Neuroimage*, 22(3), 1097–1106.
- Liu, X., Park, Y., Gu, X., & Fan, J. (2010). Dimensional overlap accounts for independence and integration of stimulus—response compatibility effects. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 72(6), 1710–1720.
- Lu, C.-H., & Proctor, R. W. (1995). The influence of irrelevant location information on performance: A review of the Simon and spatial Stroop effects. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2(2), 174–207.
- MacDonald, A. W., Cohen, J. D., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2000). Dissociating the role of the dorsolateral prefrontal and anterior cingulate cortex in cognitive control. *Science*, 288(5472), 1835–1838.
- Macleod, C. M. (1991). Half a century of research on the Stroop effect: An integrative review. *Psychological Bulletin*, 109(2), 163–203.
- Mayr, U. (2004). Conflict, consciousness, and control. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(4), 145–148.
- Mayr, U., Awh, E., & Laurey, P. (2003). Conflict adaptation effects in the absence of executive control. *Nature Neuroscience*, 6(5), 450–452.
- Nee, D. E., Wager, T. D., & Jonides, J. (2007). Interference resolution: Insights from a meta-analysis of neuroimaging tasks. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 7(1), 1–17.
- Nieuwenhuis, S., Stins, J. F., Posthuma, D., Polderman, T. J., Boomsma, D. I., & de Geus, E. J. (2006). Accounting for sequential trial effects in the flanker task: Conflict adaptation or associative priming? *Memory and Cognition*, 34(6), 1260–1272.
- Nigbur, R., Cohen, M. X., Ridderinkhof, K. R., & Stürmer, B. (2012). Theta dynamics reveal domain-specific control over stimulus and response conflict. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24(5), 1264–1274.
- Nigbur, R., Ivanova, G., & Stürmer, B. (2011). Theta power as a marker for cognitive interference. *Clinical Neurophysiology*, 122(11), 2185–2194.
- Notebaert, W., Houtman, F., Opstal, F. V., Gevers, W., Fias, W., & Verguts, T. (2009). Post-error slowing: An orienting account. *Cognition*, 111(2), 275–279.
- O'Reilly, R. C. (2006). Biologically based computational models of high-level cognition. *Science*, 314(5796), 91–94.
- O'Reilly, R. C., & Munakata, Y. (2000). *Computational explorations in cognitive neuroscience: Understanding the mind by simulating the brain*. Bradford: A Bradford Book.
- Owen, A. M., McMillan, K. M., Laird, A. R., & Bullmore, E. (2005). N-back working memory paradigm: A meta-analysis of normative functional neuroimaging studies. *Human Brain Mapping*, 25(1), 46–59.
- Proctor, R. W., & Reeve, T. G. (1989). *Stimulus-response compatibility: An integrated perspective*. New York: Elsevier.
- Proctor, R. W., & Vu, K.-P. L. (2006). *Stimulus-response compatibility principles: Data, theory, and application*. New York: CRC Press.
- Roach, B. J., & Mathalon, D. H. (2008). Event-related EEG time-frequency analysis: An overview of measures and an analysis of early gamma band phase locking in schizophrenia. *Schizophrenia Bulletin*, 34(5), 907–926.
- Sauseng, P., Griesmayr, B., Freunberger, R., & Klimesch, W. (2010). Control mechanisms in working memory: A possible function of EEG theta oscillations. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 34(7), 1015–1022.
- Simon, J. R. (1969). Reactions toward the source of stimulation. *Journal of Experimental Psychology*, 81(1), 174–176.
- Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method. *Acta Psychologica*, 30, 276–315.
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643–662.
- van Gaal, S., Lamme, V. A., & Ridderinkhof, K. R. (2010). Unconsciously triggered conflict adaptation. *PLoS One*, 5(7), e11508.
- van Steenbergen, H., Band, G. P., & Hommel, B. (2009). Reward counteracts conflict adaptation. Evidence for a role of affect in executive control. *Psychological Science*, 20(12), 1473–1477.
- van Veen, V., & Carter, C. S. (2002a). The anterior cingulate as a conflict monitor: fMRI and ERP studies. *Physiology & Behavior*, 77(4-5), 477–482.
- van Veen, V., & Carter, C. S. (2002b). The timing of

- action-monitoring processes in the anterior cingulate cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(4), 593–602.
- van Veen, V., & Carter, C. S. (2006). Conflict and cognitive control in the brain. *Current Directions in Psychological Science*, 15(5), 237–240.
- Vercammen, A., Morris, R., Green, M. J., Lenroot, R., Kulkarni, J., Carr, V. J., ... Weickert T. (2012). Reduced neural activity of the prefrontal cognitive control circuitry during response inhibition to negative words in people with schizophrenia. *Journal of Psychiatry & Neuroscience*, 37(6), 379–388.
- West, R. (2003). Neural correlates of cognitive control and conflict detection in the Stroop and digit-location tasks. *Neuropsychologia*, 41(8), 1122–1135.
- Wühr, P., & Ansorge, U. (2005). Exploring trial-by-trial modulations of the Simon effect. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A-Human Experimental Psychology*, 58(4), 705–731.

Modular Organization of Cognitive Control

LIU Xun¹; NAN Weizhi^{1,2}; WANG Kai^{1,2}; LI Qi¹

(¹ Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

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

Abstract: Cognitive control, the higher cognitive function essential for goal-oriented behavior, is currently a hot topic in cognitive neuroscience research. Researchers have frequently examined various stimulus-response-compatibility (SRC) effects and conflict adaptation (CA) effects to elucidate mechanisms of cognitive control. This article reviewed recent empirical studies utilizing these SRC and CA paradigms. Based on the universal framework of dimensional overlap theory and conflict monitoring theory, we proposed a unique theory on modular organization of cognitive control, in which different types of conflicts are detected by distinct conflict monitoring nodes and then resolved by a common module of executive control.

Key words: cognitive control; stimulus-response-compatible effect; conflict adaptation effect; computational model

第一作者简介:

刘勋博士, 研究员, 中国科学院心理研究所所长助理, 行为科学重点实验室主任, 磁共振成像研究中心主任。2000 年获得加州大学洛杉矶分校(UCLA)博士学位。主要研究的领域为认知神经科学, 利用脑成像技术揭示人脑高级认知功能。他当前的研究关注认知控制的心理和神经机制, 奖赏决策, 认知/情绪控制障碍和药物成瘾。

Xun Liu, Ph.D., Professor, Director Assistant of the Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Director of the Key Laboratory of Behavior Science, Director of Magnetic Resonance Imaging Research Center, Institute of Psychology. He obtained his Ph.D. degree from University of California, Los Angeles in 2000. His research is in the field of cognitive neuroscience, mostly using brain imaging techniques to study higher order cognitive functions. He is currently interested in behavioral and neural mechanisms of attention and cognitive control, reward decision making, and dysfunction of cognitive and emotional control in mental disorders such as substance abuse and addiction.