

The Neural Mechanisms of Comparison between Deductive and Inductive Reasoning: Problems and Trends

Xiaofang Li, Mingming Zhang, Changquan Long*

Faculty of Psychology, Southwest University, Chongqing
Email: 18584655143@163.com, ¹lcq@swu.edu.cn

Received: Mar. 16th, 2016; accepted: Apr. 1st, 2016; published: Apr. 11th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Deductive reasoning and inductive reasoning are two main forms of reasoning. Single-process accounts and dual-process accounts are two competing theories of reasoning psychology. At present, many studies compare deductive and inductive reasoning using cognitive neuroscience technology to test whether reasoning is a single or double process. But there are many problems in the studies: limitations of forward inference, differences in cognitive neuroscience techniques, complex and varied experimental tasks, challenges of cognitive neuroscience itself and so on. In future research, forward inference can still be the basic logic and breakthrough of studies; multivariate techniques and standard experimental tasks should be conducted; and studies on the neural mechanisms of comparison between deductive and inductive reasoning should go deep into more microscopic level, such as the level of molecule and neuron.

Keywords

Deductive Reasoning, Inductive Reasoning, Psychological Theories of Reasoning, Cognitive Neuroscience, Problems, Trends

演绎与归纳推理比较的神经机制：问题与趋势

李晓芳, 张明明, 龙长权*

西南大学心理学部, 重庆

*通讯作者。

Email: 18584655143@163.com, lcq@swu.edu.cn

收稿日期: 2016年3月16日; 录用日期: 2016年4月1日; 发布日期: 2016年4月11日

摘要

演绎推理和归纳推理是两种主要形式的推理, 单加工理论和双加工理论是推理心理学领域主要存在的两种相互竞争的理论。目前, 已有多项研究采用认知神经科学技术来比较演绎推理和归纳推理, 以检验推理是单加工过程还是双加工过程。但这些研究还面临诸多问题: 正向推断逻辑的局限; 不同的认知神经科学技术的差异; 复杂多变的实验任务; 以及认知神经科学本身所面临的质疑。未来的研究依然可以以正向推断为基本逻辑和突破口, 采用多元的技术手段和规范的实验任务, 对演绎和归纳推理比较的心理机制进行分子水平、神经元水平等更加微观化的研究。

关键词

演绎推理, 归纳推理, 推理的心理学理论, 认知神经科学, 问题, 趋势

1. 引言

推理在人们日常的学习、决策与环境适应中起关键性的作用(Donoso, Collins, & Koechlin, 2014), 演绎推理和归纳推理是两种主要形式的推理(李红, 陈安涛, 冯廷勇, 李富洪, 龙长权, 2004)。近年来, 大量研究开始采用认知神经科学技术分别对演绎推理(综述, Prado, Chadha, & Booth, 2011)和归纳推理(综述, 肖凤等, 2012; Hayes, Heit, & Swendsen, 2010)的神经机制进行探讨。不过, 在推理研究中始终存在一个广泛的争议, 就是是否所有类型的推理都具有相同的心理机制。于是另一些研究开始试图利用认知神经科学技术通过比较演绎推理和归纳推理来检验不同类型的推理是否具有共同的心理基础。

2. 推理的心理学理论

关于推理的心理学理论, 主要存在两种: 单加工理论和双加工理论。单加工理论认为所有形式的推理(包括演绎和归纳)具有共同的心理机制。例如, 心理模型理论(Mental Model theory)虽然是一种主要用来解释演绎推理的理论模型, 但该模型的提出者 Johnson-Laird (1994)则进一步指出归纳推理也适用于该模型, 即演绎推理和归纳推理都是在前提和一般知识的基础上构建一个或一系列的模型, 然后通过检索和检验该模型的反例来得出正确的结论。当前提为真时, 如果在任何情况下结论都为真, 那么该种推理即为演绎推理; 当前提为真时, 如果在某些情况下结论可能为假, 那么该种推理即为归纳推理。标准转换模型(Criterion-shift account, Rips, 2001)和可能性阈限模型(Probability Threshold Model, Lassiter & Goodman, 2015)认为对推理结论的评估是条件概率在最小值 0 与最大值 1 之间的连续变换, 演绎与归纳的区分只是判断标准的松紧不同而已。贝叶斯模型(Bayesian model)虽然主要用来解释归纳推理, 但同样被认为可以用来解释演绎推理, 即认为演绎和归纳均是在前提的基础上根据贝叶斯规则对先验概率进行修正的过程(Tenenbaum, Griffiths, & Kemp, 2006)。

双加工理论则认为不同形式的推理具有完全不同性质的认知加工过程。Evans 和 Stanovich (2013)认为双加工理论假定大脑存在两种潜在的机制, 即启发式加工(heuristic processing, 更多地依赖于直觉, 且加工速度较快, 不占用或占用很少的心理资源, 容易受背景相似性的影响, 通常只能意识到其加工结果

而意识不到加工过程的加工方式)和分析式加工(analytic processing, 更多地依赖于理性, 且加工速度慢, 占用较多的心理资源, 不容易受背景相似性的干扰, 其加工过程和结果都可以被意识到的加工方式)。双加工理论认为在不同形式的推理中两种加工过程所占的比例不同。归纳推理更快速, 主要依赖于直觉, 更多地受启发式加工的影响; 而演绎推理较缓慢, 常采用确定性规则, 更多地受分析式加工的影响(Hayes, Heit, & Rotello, 2014; Rotello & Heit, 2009)。另外, Goel 和 Dolan (2000)认为演绎推理主要受形式逻辑的影响而归纳推理主要受推理内容的影响。同时也有研究发现, 演绎推理更容易受推论有效性的影响, 而归纳推理更容易受推论长度的影响(Rotello & Heit, 2009)。这些研究表明演绎和归纳存在根本差异, 进一步支持了双加工理论。

3. 演绎与归纳推理比较的认知神经科学验证

为了探讨推理是单加工过程还是双加工过程, 一些研究试图利用认知神经科学技术, 通过对演绎与归纳推理的比较来进行检验。研究结果分别在不同程度上支持了两种主要的推理理论。

已有的几个关于演绎与归纳推理比较的 PET (positron emission tomography, 正电子发射断层扫描)和 fMRI (functional magnetic resonance imaging, 功能性磁共振成像)研究显示, 演绎推理和归纳推理的大脑激活模式显著不同, 倾向于支持推理的双加工理论。例如, Goel, Gold, Kapur 和 Houle (1997)采用 PET 技术, 比较了在演绎推理条件和归纳推理条件下被试对三段论材料的反应, 结果发现演绎推理激活了左侧额下回和枕上回, 归纳推理激活了包括左侧额中回、额上回和扣带回在内的广泛脑区。Goel 和 Dolan (2004)采用 fMRI 技术再次比较了演绎推理和归纳推理, 发现演绎推理任务更多地激活了左侧额下回, 而归纳推理任务更多地激活了左半球前额皮层的背外侧。另外, Osherson 等(1998)以及 Parsons 和 Osherson (2001)采用 PET 技术比较了演绎推理和可能性推理, 发现演绎推理主要激活了大脑右侧(例如右侧前扣带回、右侧额下回等), 而可能性推理则主要激活了大脑左侧(例如左侧前额皮层, 左侧的额下回等)。尽管研究结果存在细微的差异, 但这些研究均发现演绎推理和归纳推理具有明显不同的脑激活模式, 认为不同的推理具有不同性质的认知加工过程。另外, 归纳推理的 fMRI 研究(例如, Liang, Jia, Taatgen, Zhong, & Li, 2014)和演绎推理的 NIRS (near-infrared spectroscopy, 近红外光谱法)研究(例如, Tsujii, Okada, & Watanabe, 2010)也倾向于支持推理的双加工理论。

此外, Johnson-Laird (1994)根据心理模型理论, 推断无论演绎推理还是归纳推理, 脑部活动应该主要集中在右侧(Johnson-Laird, 1994)。然而 PET 和 fMRI 的研究显示, 尽管大部分的推理任务都同时激活了大脑左侧和右侧(综述见 Hayes et al., 2010; Goel, 2007), 但主要激活的是大脑左侧(Goel & Dolan, 2004; Goel et al., 1997), 因此有研究者认为心理模型理论没有得到神经科学研究的充分支持, 也进一步表明推理的单加工理论受到挑战。

然而, 在最近的一项 ERP(event-related potentials, 事件相关电位)研究中, Malaia, Tommerdahl 和 McKee (2015)要求被试先判断采用哪种推理(演绎或者归纳推理), 然后从 4 种反应(肯定正确, 可能正确, 可能错误, 肯定错误)中选择最合适的一种。他们的实验结果显示演绎推理与归纳推理之间没有发现显著差异, 仅在演绎推理条件下, 负性回答(肯定错误)与阳性回答(肯定正确)在 N2 成分上存在差异。因此, Malaia 等(2015)认为这一结果更倾向于支持单加工理论。同时, Turner, Marinsek, Ryhal 和 Miller (2015)对演绎推理和归纳推理的 fMRI 研究的元分析发现, 无论是演绎还是归纳推理, 大脑左侧与右侧的功能都是一致的, 即大脑左侧与解释过程有关, 而大脑右侧与监控、抑制过程相关联, 暗示了演绎推理与归纳推理有共同的神经基础。

4. 演绎与归纳推理比较的认知神经科学验证的基本逻辑

Heit (2015)认为, 已有的采用 PET、fMRI 技术检验推理的心理理论的研究, 基本上是基于 Henson (2005,

2006)提出的正向推断(forward inference)的逻辑。Henson (2005, 2006)认为正向推断是一种基于大脑不同的活动模式来区分相互对抗的认知理论的方法。该方法的基本逻辑是: 如果理论 T0 假设两种实验条件 C1 和 C2 不存在显著的认知差异, 而理论 T1 假设实验条件 C1 与 C2 存在显著的认知差异。当实验条件 C1 与 C2 的大脑活动在功能 F2 上存在本质差异, 而功能 F2 影响因变量 Y, 且因变量 Y 在实验条件 C1 与 C2 中确实存在明显的差异时, 那么理论 T1 就会比理论 T0 得到更多的支持, 即实验条件 C1 和 C2 具有本质不同的认知过程或机制。换句话说, 如果研究发现实验条件 C1 和 C2 具有显著不同的脑激活模式, 那么认为两者具有不同认知过程的理论就会得到更多的支持。

Henson (2005, 2006)进一步指出, 判断脑部活动存在本质差异需要同时满足两个条件: 1) 条件 C1 与 C2 在某些脑部区域有不同的激活模式; 2) 相对于第三种实验条件(通常是基线条件), C1 与 C2 具有相同的激活模式(同时增强或者减弱)。因为, 如果条件 C1 在脑区 1 上的激活强度高于条件 C2, 而条件 C2 在脑区 2 上的激活强度高于条件 C1, 这有可能是因为这两个脑区是以相反的活动方式联通的, 而不能完全排除条件 C1 与 C2 具有相同认知过程或机制的可能。

虽然正向推断主要是针对 PET 和 fMRI 研究的, 但 Henson (2005, 2006)认为该逻辑也可能适合 ERP 研究。演绎与归纳推理比较的 PET 研究(Goel et al., 1997; Osherson et al., 1998)和 fMRI 研究(Goel & Dolan, 2004)均发现归纳推理中大脑的左侧前额叶的激活量相对于演绎推理有所增加, 并且 Liang 等人(2014)发现甚至不同的归纳推理任务也会导致不同的脑激活模式。因此, 运用正向推断的逻辑, 可以认为不同形式的推理更具有不同的认知加工模式, 也就是说双加工理论相比于单加工理论更具有说服力。而 Malaia 等人(2015)的研究中发现演绎推理和归纳推理在 ERP 成分上没有显著差异, 则根据正向推断的逻辑, 认为他们的研究结论更倾向于支持单加工理论。

5. 演绎与归纳推理比较的认知神经科学验证所面临的问题

5.1. 正向推断的局限

认知神经科学检验推理是单加工过程还是双加工过程所面临的第一方面的问题, 是正向推断本身。首先, 正向推断的基本前提是要求两个相互竞争的理论中至少有一个是正确的。也就是说, 如果研究者在研究过程中所涉及到的理论一和理论二都是错误的, 并且存在研究者没有考虑到的理论三是正确的, 那么仅仅基于理论一和理论二的正向推断就可能会被误导。尽管单加工理论和双加工的理论是目前推理研究中最主要的两种相互竞争的理论, 但一些研究者也开始探索用超越单加工或者双加工模式之外的新的理论框架来解释人类的推理机制。例如, Oaksford 和 Chater (2007)主张, 演绎和归纳推理的认知过程是不同的, 但是却可以用同一个计算模型来进行模拟, 因为 Marr (1982)指出计算模型可以与实际的认知过程无关。

其次, 尽管 Henson (2005, 2006)阐明了满足脑部活动本质差异所需的条件, 但在实际操作中很难确定引起脑部活动差异的原因(Malaia et al., 2015; Long et al., 2015), 因为这种脑部活动差异也有可能是由其他无关因素引起的。例如, 脑部活动的差异可以解释为任务复杂性(Johnson, 1993)、反应参数(Nosofsky, Little, & James, 2012)和决策标准(Hill & Windmann, 2014)的不同, 甚至可以解释为语义内容的差异, 因为演绎和归纳推理都依赖于语义内容(Goel & Dolan, 2000; Blanchette & El-Deredy, 2014)。

Rotello 和 Heit (2014)进一步指出, 在推理研究中, 如果在两种实验条件下大脑活动模式有所不同, 这不一定是由认知过程的不同引起的, 而有可能是“肯定”反应偏向(“yes” response bias)的原因(Rotello & Heit, 2014)。所谓“肯定”反应偏向, 是指在实际不确定的情形下, 做出肯定反应的一种倾向, 是一种基于信号检测理论的反应偏差的测量方式, 其计算公式为击中率(Hit, H)和虚报率(False alarm, F)的平均值, 即肯定反应偏向 = $(H + F)/2$ (Rotello & Heit, 2014; Hill & Windmann, 2014)。例如, Tsujii 等(2010)发现不

一致推理条件下的正确反应(结论不可信时能正确判断推理逻辑有效、结论可信时能正确判断推理逻辑无效)与一致推理条件下的正确反应(结论可信时能正确判断推理逻辑有效、结论不可信时能正确判断推理逻辑无效)在 rIFC(右下前额叶, the right inferior frontal cortex)脑区的激活程度上存在显著差异,同时,他们发现 rIFC 脑区激活程度的差异和被试在不同条件下的正确反应率的差异呈正相关,他们认为这一结果表明 rIFC 脑区反应了不同推理条件间的差异。然而实际上,他们发现的 rIFC 脑区激活可能反应的是“肯定”反应偏向的差异而非条件间的差异。因为根据信号检测理论,不一致推理条件的正确反应率是结论不可信时的推理逻辑击中(HU)与结论可信时的推理逻辑正确拒斥(CRB)之和(HU + CRB);一致推理条件下的正确反应率等于结论可信时的推理逻辑击中(HB)与结论不可信时的推理逻辑正确拒斥(CRU)之和(HB + CRU)。那么,不一致推理条件下的正确反应率与一致推理条件下的正确反应率之间的差异 = (HU + CRB) - (HB + CRU)。因为正确拒斥率(CR) = 1 - 虚报率(F),所以, (HU + CRB) - (HB + CRU) = (HU + (1 - FB)) - (HB + (1 - FU)) = (HU + FU) - (HB + FB) = 结论不可信时的“肯定”反应偏向 - 结论可信时的“肯定”反应偏向。因此, rIFC 脑区激活有可能反应的是“肯定”反应偏向的差异而非不同推理条件之间的差异。

5.2. 研究方法的限制

认知神经科学检验推理是单加工过程还是双加工过程所面临的第二方面的问题,是研究方法的限制,主要是实验技术的局限和实验任务的差异。首先,采用 PET 和 fMRI 方法的研究都倾向于支持双加工理论,而 ERP 的研究却倾向于支持单加工理论。演绎推理的 PET 和 fMRI 研究发现不同的演绎推理(例如,三段论推理,传递性推理,条件推理)包含大量不同的脑活动模式(综述,见 Prado et al., 2011),而演绎推理的 ERP 研究却发现不同的演绎推理均存在 P3b (一种出现在脑后部区域且峰值出现在刺激呈现后 300~500 ms 的 ERP 成分)效应,且符合逻辑的推理比不符合逻辑的推理激活了更大的 P3b (例如, Bonnefond, Castelain, Cheylus, & Van der Henst, 2014; Bonnefond, Kaliuzhna, & Van der Henst, 2014; Blanchette & El-Deredy, 2014)。Bonnefond, Castelain, Cheylus 和 Van der Henst (2014)认为,导致这种现象的原因是不同认知神经科学技术本身的局限性。例如, fMRI 的结果高度依赖于基线,需比较实验条件与控制条件的差异; PET 的时间窗口必须使用 block 设计,这使得背景相关的激活和特定的认知加工的激活难以分离(Goel & Dolan, 2004)。

其次,实验任务多种多样。例如, Goel 等人(1997)在实验中比较的是演绎推理和归纳推理任务,而另外几个研究比较的是演绎推理和可能性推理任务。可能性推理只是归纳推理的一种(Kemp & Jern, 2014),并且任务的复杂程度也不尽相同。此外, Malaia 等(2015)的研究要求被试从四种反应中进行选择,而其他几个研究只有两种反应类型。

5.3. 认知神经科学本身的局限

认知神经科学检验推理是单加工过程还是双加工过程所面临的第三方面的问题,是认知神经科学本身面临的一些质疑。尽管有些著名的心理学家和神经科学家认为最近的神经科学研究可能解决了一些心理学理论的争议(例如, McClure, Ericson, Laibson, Loewenstein, & Cohen, 2007),但是仍有相当数量的心理学家和哲学家认为神经科学研究,尤其是神经影像学,并没有改善认知的理论(Uttal, 2011; Satel & Lilienfeld, 2013)。一些研究者认为部分原因是目前的技术太粗糙、理论不够发达,以至于不能够对神经系统的细节进行探究(Poeppl, 1996; Coltheart, 2004)。另一些研究者则认为即使使用改进的技术和更先进的理论,在原则上,神经科学数据也不能帮助我们推进认知的研究,这可能是由于心理的不可约束性或自由性(Van Orden & Paap, 1997),也可能是因为 fMRI、PET 和 EEG 等是对脑结构与功能等宏观层面

的分析,而实际上脑对心理的支持是神经元和神经网络水平,因此,fMRI、PET、NIRS 和 EEG 的研究不能告诉我们任何有关心理的信息(Uttal, 2011)。

6. 小结与研究趋势

单加工理论和双加工理论是推理心理学领域主要存在的两种相互竞争的理论。单加工理论认为所有形式的推理(包括演绎和归纳)具有共同的心理机制;双加工理论则认为不同形式的推理在启发式加工与分析式加工上有不同程度的混合,具有不同性质的认知加工过程。根据已有的演绎推理与归纳推理比较的认知神经科学研究,PET 和 fMRI 研究倾向于支持推理的双加工理论,而 ERP 研究则更倾向于支持单加工理论。

Heit (2015)指出,已有的采用神经影像学技术(例如,PET 和 fMRI)检验推理的心理学理论的研究,基本上是基于正向推断的逻辑,即基于不同的大脑活动模式来区分相互对抗的认知理论。Heit (2015)认为正向推断建立起了心理学研究与神经影像学研究之间的桥梁,可以成为联系心理学与神经影像学的基本逻辑。尽管 Heit (2015)主要强调的是神经影像学,但在将来的研究中,正向推断也可以成为其他认知神经科学方法检验推理的心理学理论的基本逻辑和突破口。

采用认知神经科学检验推理的心理过程也面临一些问题,需要引起重视。首先,正向推断本身存在一些问题:正向推断要求两个相互竞争的理论中至少有一个是正确的,同时在实际操作中对什么是性质不同的大脑活动模式仍然很难界定。

其次,不同的认知神经科学技术对推理的心理学理论有不同的支持倾向,这可能是由于不同的方法依赖于不同的生物学信号。因此,在将来的研究中,需要采用多元的技术手段和多样的数据分析方法进行联合研究(Roser et al., 2015)。例如,根据我们掌握的资料,目前仅有 Goel 和 Dolan (2004)的研究采用了 fMRI 技术对演绎和归纳进行了比较,而且该研究主要比较了归纳和演绎激活的脑区,进一步的 fMRI 研究可以对演绎和归纳进行脑功能性连接的分析 and 比较(例如,Chiong et al., 2013)。同样,在 ERP 研究中,目前主要是对推理诱发的 ERP 波形进行分析,下一步的研究也可以超越传统的 ERP 成分分析,进行诸如频率等的分析(例如,Liang, Zhong, Lu, & Liu, 2010)。另外,也有一些方法结合神经影像和建模技术,为利用脑成像数据区分心理过程理论开辟了新途径。例如,Mack, Preston 和 Love (2013)指出算术模型在分析 fMRI 数据上取得了巨大进步,提出认知活动可以从不同的分析水平来描述。

另外,由于复杂多变的实验任务有可能是导致研究结果不一致的原因之一,所以之后的研究需要对实验任务进行限定和规范。除此之外,已有的研究大多集中在前提为真时演绎和归纳的比较,将来的研究可以考虑探讨当前前提不确定时演绎和归纳的心理机制(Elqayam & Over, 2013)。

最后,一些心理学家和哲学家认为神经科学研究,尤其是神经影像学研究,并没有改善认知的理论,一个重要的理由是他们认为目前采用 fMRI、PET、NIRS 和 EEG 的研究都是神经元集群的宏观研究(Uttal, 2011; Satel & Lilienfeld, 2013)。因此之后的研究应该深入到分子水平和神经元水平,使研究更加微观化,这样也许可以减少一些学者对认知神经科学的疑虑。

基金项目

受国家自然科学基金 31200780 资助。

参考文献 (References)

- 李红, 陈安涛, 冯廷勇, 李富洪, 龙长权(2004). 个体归纳推理能力的发展及其机制研究展望. *心理科学*, 27(6), 1457-1459.
- 肖凤, 李红, 龙长权, 陈庆飞, 王荣燕, 李富洪(2012). 归纳推理的认知神经机制. *心理科学进展*, 20(8), 1268-1276.

- Blanchette, I., & El-Dereby, W. (2014). An ERP Investigation of Conditional Reasoning with Emotional and Neural Contents. *Brain and Cognition*, *91*, 45-53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bandc.2014.08.001>
- Bonnefond, M., Castelain, T., Cheylus, A., & Van der Henst, J. (2014). Reasoning from Transitive Premise: An EEG Study. *Brain and Cognition*, *90*, 100-108. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bandc.2014.06.010>
- Bonnefond, M., Kaliuzhna, M., & Van der Henst, J. (2014). Disabling Conditional Inferences: An EEG Study. *Neuropsychologia*, *56*, 255-262. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.01.022>
- Chiong, W., Wilson, S. M., D'Esposito, M., Kayser, A. S., Grossman, S. N., Poorzand, P. et al. (2013). The Salience Network Causally Influences Default Mode Network Activity during Moral Reasoning. *Brain*, *136*, 1929-1941. <http://dx.doi.org/10.1093/brain/awt066>
- Coltheart, M. (2004). Brain Imaging, Connectionism, and Cognitive Neuropsychology. *Cognitive Neuropsychology*, *21*, 21-25. <http://dx.doi.org/10.1080/02643290342000159>
- Donoso, M., Collins, A. G., & Koechlin, E. (2014). Foundations of Human Reasoning in the Prefrontal Cortex. *Science*, *344*, 1481-1486. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1252254>
- Elqayam, S., & Over, D. E. (2013). New Paradigm Psychology of Reasoning: An Introduction to the Special Issue Edited by Elqayam, Bonnefon, and Over. *Thinking & Reasoning*, *19*, 249-265. <http://dx.doi.org/10.1080/13546783.2013.841591>
- Evans, J.S.B.T., & Stanovich, K.E. (2013). Dual-Process Theories of Higher Cognition: Advancing the Debate. *Perspectives on Psychological Science*, *8*, 223-241. <http://dx.doi.org/10.1177/1745691612460685>
- Goel, V. (2007). Anatomy of Deductive Reasoning. *Trends in Cognitive Sciences*, *11*, 435-441. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tics.2007.09.003>
- Goel, V., & Dolan, R.J. (2000). Anatomical Segregation of Component Processes in an Inductive Inference Task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *12*, 110-119. <http://dx.doi.org/10.1162/08989290051137639>
- Goel, V., & Dolan, R. J. (2004). Differential Involvement of Left Prefrontal Cortex in Inductive and Deductive Reasoning. *Cognition*, *93*, B109-B121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cognition.2004.03.001>
- Goel, V., Gold, B., Kapur, S., & Houle, S. (1997). The Seats of Reason? An Imaging Study of Deductive and Inductive Reasoning. *NeuroReport*, *8*, 1305-1310. <http://dx.doi.org/10.1097/00001756-199703240-00049>
- Hayes, B. K., Heit, E., & Rotello, C. (2014). Memory, Reasoning, and Categorization: Parallels and Common Mechanisms. *Frontiers in Cognitive Science*, *5*, 529. <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00529>
- Hayes, B. K., Heit, E., & Swendsen, H. (2010). Inductive Reasoning. Wiley Interdisciplinary Reviews. *Cognitive Science*, *1*, 278-292. <http://dx.doi.org/10.1002/wcs.44>
- Heit, E. (2015). Brain Imaging, Forward Inference, and Theories of Reasoning. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, 1056. <http://dx.doi.org/10.3389/fnhum.2014.01056>
- Henson, R. (2005). What Can Functional Neuroimaging Tell the Experimental Psychologist? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *58A*, 193-233. <http://dx.doi.org/10.1080/02724980443000502>
- Henson, R. (2006). Forward Inference Using Functional Neuroimaging: Dissociations versus Associations. *Trends in Cognitive Science*, *10*, 64-69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tics.2005.12.005>
- Hill, H., & Windmann, S. (2014). Examining Event-Related Potential (ERP) Correlates of Decision Bias in Recognition Memory Judgments. *PLoS ONE*, *9*, e106411. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0106411>
- Johnson, R. (1993). On the Neural Generators of the P300 Component of the Event-Related Potential. *Psychophysiology*, *30*, 90-97. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0106411>
- Johnson-Laird, P. N. (1994). Mental Models and Probabilistic Thinking. *Cognition*, *50*, 189-209. [http://dx.doi.org/10.1016/0010-0277\(94\)90028-0](http://dx.doi.org/10.1016/0010-0277(94)90028-0)
- Kemp, C., & Jern, A. (2014). A Taxonomy of Inductive Problems. *Psychonomic Bulletin and Review*, *21*, 23-46. <http://dx.doi.org/10.3758/s13423-013-0467-3>
- Lassiter, D., & Goodman, N. D. (2015). How Many Kinds of Reasoning? Inference, Probability, and Natural Language Semantics. *Cognition*, *136*, 123-134. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cognition.2014.10.016>
- Liang, P., Jia, X., Taatgen, N., Zhong, N., & Li, K. (2014). Different Strategies in Solving Series Completion Inductive Reasoning Problems: An fMRI and Computational Study. *International Journal of Psychophysiology*, *93*, 253-260. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2014.05.006>
- Liang, P., Zhong, N., Lu, S., & Liu, J. (2010). ERP Characteristics of Sentential Inductive Reasoning in Time and Frequency Domains. *Cognitive System Research*, *11*, 67-73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cogsys.2008.10.001>
- Long, C., Lei, X., Chen, J., Chang, Y., Chen, A., & Li, H. (2015). Event-Related Potential Parameters of Category and Property Violations during Semantic Category-Based Induction. *International Journal of Psychophysiology*, *96*, 141-148. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2015.04.005>

- Mack, M. L., Preston, A. R., & Love, B. C. (2013). Decoding the Brain's Algorithm for Categorization from Its Neural Implementation. *Current Biology*, 23, 2023-2027. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cub.2013.08.035>
- Malaia, E., Tommerdahl, J., & McKee, F. (2015). Deductive versus Probabilistic Reasoning in Healthy Adults: An EEG Analysis of Neural Differences. *Journal of Psycholinguistic Research*, 44, 533-544. <http://dx.doi.org/10.1007/s10936-014-9297-3>
- Marr, D. (1982). *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*. New York: W.H. Freeman and Company.
- McClure, S. M., Ericson, K. M., Laibson, D. I., Loewenstein, G., & Cohen, J. D. (2007). Time Discounting for Primary Rewards. *The Journal of Neuroscience*, 27, 5796-5804. <http://dx.doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4246-06.2007>
- Nosofsky, R. M., Little, D. R., & James, T. W. (2012). Activation in the Neural Network Responsible for Categorization and Recognition Reflects Parameter Changes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109, 333-338. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1111304109>
- Oaksford, M., & Chater, N. (2007). *Bayesian Rationality: The Probabilistic Approach to Human Reasoning*. Oxford: Oxford University Press. <http://dx.doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198524496.001.0001>
- Osherson, D., Perani, D., Cappa, S., Schnur, T., Grassi, F., & Fazio, F. (1998). Distinct Brain Loci in Deductive versus Probabilistic Reasoning. *Neuropsychologia*, 36, 369-376. [http://dx.doi.org/10.1016/S0028-3932\(97\)00099-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0028-3932(97)00099-7)
- Parsons, L. M., & Osherson, D. (2001). New Evidence for Distinct Right and Left Brain Systems for Deductive versus Probabilistic Reasoning. *Cerebral Cortex*, 11, 954-965. <http://dx.doi.org/10.1093/cercor/11.10.954>
- Poeppel, D. (1996). A Critical Review of PET Studies of Phonological Processing. *Brain and Language*, 55, 317-351. <http://dx.doi.org/10.1006/brln.1996.0108>
- Prado, J., Chadha, A., & Booth, J. R. (2011). The Brain Network for Deductive Reasoning: A Quantitative Meta-Analysis of 28 Neuroimaging Studies. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23, 3483-3497. http://dx.doi.org/10.1162/jocn_a.00063
- Rips, L. J. (2001). Two Kinds of Reasoning. *Psychological Science*, 12, 129-134. <http://dx.doi.org/10.1111/1467-9280.00322>
- Roser, M. E., Evans, J. S. B., McNair, N. A., Fuggetta, G., Handley, S. J., Carroll, L. S., & Trippas, D. (2015). Investigating Reasoning with Multiple Integrated Neuroscientific Methods. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 41. <http://dx.doi.org/10.3389/fnhum.2015.00041>
- Rotello, C. M., & Heit, E. (2009). Modeling the Effects of Argument Length and Validity on Inductive and Deductive Reasoning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 35, 1317-1330. <http://dx.doi.org/10.1037/a0016648>
- Rotello, C. M., & Heit, E. (2014). The Neural Correlates of Belief Bias: Activation in Inferior Frontal Cortex Reflects Response Rate Differences. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 862. <http://dx.doi.org/10.3389/fnhum.2014.00862>
- Satel, S., & Lilienfeld, S. (2013). *Brainwashed: The Seductive Appeal of Mindless Neuroscience*. New York: Basic Books.
- Tenenbaum, J. B., Griffiths, T. L., & Kemp, C. (2006). Theory-Based Bayesian Models of Inductive Learning and Reasoning. *Trends in Cognitive Sciences*, 10, 309-318. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tics.2006.05.009>
- Tsujii, T., Okada, M., & Watanabe, S. (2010). Effects of Aging on Hemispheric Asymmetry in Inferior Frontal Cortex Activity during Belief-Bias Syllogistic Reasoning: A Near-Infrared Spectroscopy Study. *Behavioural Brain Research*, 210, 178-183. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bbr.2010.02.027>
- Turner, B. O., Marinsek, N., Ryhal, E., & Miller, M. B. (2015). Hemispheric Lateralization in Reasoning. *Annals of the New York Academy of Science*, 1359, 47-64. <http://dx.doi.org/10.1111/nyas.12940>
- Uttal, W. R. (2011). *Mind and Brain: A Critical Appraisal of Cognitive Neuropsychology*. Cambridge, MA: MIT Press. <http://dx.doi.org/10.7551/mitpress/9780262015967.001.0001>
- Van Orden, G. C., & Paap, K. R. (1997). Functional Neuroimages Fail to Discover Pieces of Mind in the Parts of the Brain. *Philosophy of Science*, 64, S85-S94. <http://dx.doi.org/10.1086/392589>