

Review on the Neural Mechanisms of Transitive Inference

Yijuan Li, Xiaocui Miao, Mengyun Wang, Zhongming Zhang*

Key Laboratory of Personality and Cognition (SWU), Ministry of Education, School of Psychology, Southwest University, Chongqing

Email: stellali@swu.edu.cn, mxcsky@swu.edu.cn, wang2012@swu.edu.cn, zsm888@swu.edu.cn

Received: Jan. 15th, 2014; revised: Jan. 23rd, 2014; accepted: Jan. 27th 2014

Copyright © 2014 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/>



Abstract

Probing the neural mechanism of advanced cognitive progresses (such as inference, problem solving, etc.) has become the hot issue of current psychological research. This article reviewed the latest researches on the neural mechanisms of transitive inference: 1) transitive inference and non-transitive inference will result in different activation; 2) different material and number of item of transitive reasoning will result in different activation; 3) the role of hippocampus in the transitive inference; and 4) there is a neural circuitry of transitive inference. In the end, some frequently used methods were listed and some reflections were provided for the future.

Keywords

Transitive Inference; Neural Mechanisms; Neural Circuitry; Activation; Hippocampus

传递性推理的神经机制研究

李益娟, 苗小翠, 汪孟允, 张仲明*

西南大学心理学部, 认知与人格教育部重点实验室, 重庆

Email: stellali@swu.edu.cn, mxcsky@swu.edu.cn, wang2012@swu.edu.cn, zsm888@swu.edu.cn

收稿日期: 2014年1月15日; 修回日期: 2014年1月23日; 录用日期: 2014年1月27日

摘要

探讨高级认知过程(如推理、问题解决等)的神经机制已经成为目前心理学研究的热点,文章回顾并总结了近年来对传递性推理的神经机制的研究进展,具体内容涉及:1) 传递性推理与非传递性推理作用脑区的差异;2) 不同项数和材料激活脑区的差异;3) 海马在传递性推理中的作用;4) 传递性推理的神经环路。立足对研究现状的逐层深入思考,文章最后对传递性推理神经机制的未来研究方向和方法进行了展望。

关键词

传递性推理; 神经机制; 神经环路; 激活; 海马

1. 引言

传递性推理(TI, transitive inference)是指根据先学习的交叠前提(overlapping premise),推理出没有一起呈现的推理项的关系的过程,例,如果 $A < B$, $B < C$, 那么 $A < C$ (Dusek, & Eichenbaum, 1997)。Acuna, Eliassen, Donoghue 和 Sanes(2002)认为传递性推理是通过内部操作一个整体的表征而不是形式逻辑来解决问题。传递性推理问题对心理学家们的吸引力在于:它要求个体超越所给信息,演绎出并未同时呈现的项目之间的关系(Wynne & Staddo, 1998)。二十世纪八十年代, Sternberg(1980)、Johnson-Laird, Oakhill 和 Bull(1986)对传递性推理开展了一系列的研究,而在国内,传递性推理的研究领域逐步扩大,包括长度、空间空位的传递性推理(毕鸿燕, 方格, 2001; 毕鸿燕, 方格, 喻旭初, 2004; 莫秀峰, 李红, 张仲明, 2011)、传递性推理与测量关系研究(魏勇刚, 尹荣, 庞丽娟; 2004)以及工作记忆成分等心理成分在传递性推理的作用研究(赵雷, 2005; 赵雷, 周冶金, 刘昌; 2006)。在90年代末,国内关于传递性推理的研究出现了两个引人注目的新方向。其一是以李红、林崇德(2001)为代表提出的三项系列问题的心理模型以及张仲明和李红(2007)提出的五项系列问题的复合模型,认为儿童在用复合模型解决传递性推理问题的发展过程中,表现了认知的灵活性和经济性。第二是从神经心理学的角度来讨论传递性推理本质与机制。从1997年 Dusek 和 Eichenbaum(1997)研究了海马和顺序刺激关系的记忆以来,作为人类发展过程中的一种重要发展能力,对传递性推理神经机制的研究将会越来越得到学者们的关注,将在21世纪第1个10年成为一个方兴未艾的研究领域。

2. 传递性与非传递性推理作用脑区的差异

相对于非传递性推理,传递性推理有其独特性。很多研究已经发现传递性推理与非传递性推理导致了不同的额叶的激活。换言之,额叶的损伤对传递性推理和非传递性推理可能导致不同的影响。例如, Delis, Squire, Bihrlé 和 Massman(1992)研究发现,额叶损伤病人在进行推理和运用规则上存在困难,并且不能解决传递性推理问题。Acuna 等人(2002)等人的研究发现非传递性推理的被动视觉、高度比较和传递性推理出现了不同的激活区域。传递性推理在额叶的激活主要在两半球的额区(frontal clusters),除了扣带回和内侧额叶,还有背外侧额上回、额中回和额下回。在额叶(frontal cortex)最大的激活区是右侧额中回(right middle frontal gyrus)。而高度比较任务的最大激活群在中央前回(precentral gyrus)。传递性推理在右侧额上回(right superior frontal gyrus)的激活位于 Brodmann 6 区(BA6),并且有两个区域的激活非常明显,一个位于中间,另一个在额上回的后侧。在额中回(the middle frontal gyrus),传递性推理的激活在两侧并

且区域较大。右侧额中回(the right middle frontal gyrus)激活很在 BA8、BA9 和 BA46, 该区域多数的激活出现在 BA9 和 BA46。在左侧额中回(the left middle frontal gyrus), 激活有两个区域(clusters)。较大的一个在 BA8、BA9 和 BA46, 较小一个在 BA6。额下回(inferior frontal gyrus)激活仅在左半球, 这个区域大部分处于 BA8 和 BA9。Goel, Buchel, Frith 和 Dolan (2000)的研究发现三段论和三项传递性推理导致额下回(inferior prefrontal cortex)的卷入不同。在三项传递性推理中没有额下回(inferior prefrontal cortex)卷入。

研究也发现传递性推理与非传递性推理在顶叶的激活上有差异。Goel et al. (2000)研究发现, 三项传递性推理任务产生了较强的后顶叶激活。Acuna et al. (2002)用高度比较和传递性推理比较的研究发现: 传递性推理在顶叶最大的激活出现在顶叶后侧(posterior parietal cortex)。激活峰值出现在 BA7, 激活涉及到了 BA5 和 BA40 的一部分。传递性推理在顶叶的激活分为三个区域, 两个在左、右顶上小叶的外侧(laterally on the left and right superior parietal lobules), 一个中度激活区域在两半球的楔前叶(precuneus gyrus)。尤其在右半球, 激活大部分出现在顶内沟的后部和腹部。而高度比较在顶叶的三个激活区域全部都在左半球, 分别在左侧中央后回、左侧顶上小叶和顶下小叶。高度比较激活的最大区域在内侧顶内沟(medial to the intraparietal sulcus), 可能在 BA7。Goel et al. (2000)研究也发现抽象材料的三段论推理仅激活了左半球的顶叶, 而三项传递性推理激活了双侧顶叶。传递性推理与三段论推理在顶叶激活的差异可能的原因是传递性推理运用了外显空间关系(explicit spatial relation), 因而在激活左顶叶的同时也激活了右顶叶。

一些研究者(Goel et al., 2000; 杨娟, 邱江, 张庆林, 2008; 张凤华, 邱江, 杨群, 张庆林, 2009)也在具体材料下的三段论中发现了颞叶的激活, 但在三项传递性推理中却没有发现类似结果。

从上面的研究可以看出, 与传递性推理性质不同的推理在额叶、顶叶和颞叶的确产生了不同的激活。但是, 这种激活的不同是否都归因于推理性质不同还不能确定。例如, 三项传递性推理没有出现三段论中的颞叶激活可能是任务内容性质的原因。Goel et al. (2000)研究三段论的句子形式是“*All apples are poisonous*”, 研究传递性推理的句子形式是“*John is to the right of Mary*”。三段论中的句子类型预测已知物体的已知属性, 对它们的真假, 被试有自己的观点。而传递性推理中的句子被试没有自己的观点。很可能颞叶(BA 21、BA22)的卷入涉及到了信念网络(belief network)而仅非具体内容的加工。因而, 这个激活差异对传递性推理的价值还不十分清晰。一些研究发现其他任务也可导致顶叶和额叶的激活。例如, 高度比较同样激活了后顶叶。有研究发现数学任务和类推判断以及需要内部操作知识的心理操作(Pinel, Dehaene, Rivière, & LebiHan, 2001; Rickard, Romero, Wharton, Flitman, & Grafman, 2000; Wharton et al., 2000), 都激活了顶叶的左下部(left inferior parietal)。Goel, Gold, Kapur 和 Houle(1998)研究也发现基于语言的推理激活了左额叶却没激活顶叶。

3. 项数与材料性质激活脑区的差异

同是传递性推理, 项数不同, 导致的激活也不同。Acuna et al. (2002)的研究采用五项任务激活了右半球的 BA9 和 BA46, 而 Goel 和 Dolan(2001)的三项系列问题仅激活了左半球的 BA9。为什么会在三项任务和五项任务上导致激活差异呢? 一个可能的原因是与任务性质基本变化有关。即任务序列长度的差异可能导致了激活差异。另外, 也可能是三项传递性推理与五项传递性推理存在不同的认知机制。五项传递性推理任务中, 测验对不包括端点项, 而三项传递性推理任务包括了端点项。端点项在序列中是特例, 可以不考虑其他项就能被解决, 例如总是最小的规则。因此, Zentall 和 Sherburne(1994)认为解决三项系列任务时没有必要对多个前提进行整合。也可能是 Goel 和 Dolan(2001)以句子形式提出刺激关系, 而 Acuna et al. (2002)的传递性任务是不同颜色的视觉图形。视觉图形之间关系的操作激活的是右边的前额叶皮质(PFC), 而语词材料关系的操作优先激活的是左边的前额叶皮质(PFC)。因此还需要进一步设计

控制更加严密的实验来检验不同项数的传递性推理的神经机制。

在传递性推理中，不同的材料导致了不同的神经激活模式。Goel 和 Dolan (2001)研究发现具体材料和抽象材料的传递性推理尽管表现出了相似的神经网络，但在顶叶(parietal)和枕叶(occipital)上却有不同的激活区域。具体材料的激活主要在双侧小脑(bilateral cerebellum)、主视皮质(BA 17、BA 18) (primary visual cortex)、右侧枕中回(BA 18) (right middle occipital gyrus)、双侧的顶上叶和顶下叶(BA 40、BA 7) (bilateral superior and inferior parietal lobule)，楔前叶(BA 7)和双侧尾状核(bilateral caudate nuclei)。而抽象材料的传递性推理的激活主要出现在双侧小脑(bilateral cerebellum)，主视皮质(BA 17、BA 18)(primary visual cortex)，双侧的顶上叶(BA 7)(bilateral superior parietal lobule)。进一步比较发现，抽象材料的激活在左侧顶上小叶和顶下小叶(BA 7、BA 40) (left superior and inferior parietal lobule)、右顶上叶(BA 7) (right superior parietal lobule)和双侧枕下回(BA 19) (bilateral inferior occipital gyrus)比具体材料更明显。抽象材料的推理比具体材料的推理有更多顶叶(parietal)和枕叶(occipital)的卷入。Transitive inference in jackdaws 一个可能的原因是被试在抽象材料上所花时间更长且效果不好，反映了抽象材料和具体材料的任务难度不同。其次，可能顶叶激活反映了对抽象材料的空间关系更敏感，不同材料在传递性推理中产生了不同的激活，这与行为研究中，不同的材料导致不同的反应时上的差异密切相关。也许二者共同可以说明传递性推理的发展问题。

4. 海马在传递性推理中的作用

已有研究发现海马重要的功能之一是以联结加工方式将来自大脑诸皮层多种模态的心理表征信息整合(Eichenbaum, 2004)。在传递性推理中，海马在顺序关系的发展中具有重要功能，海马在认知记忆中起着独特的作用，海马损伤导致认知记忆操作出现缺陷，海马损伤导致传递性推理功能丧失，却可以保持其他的一些认知功能，例如对刺激项的识别等。海马在传递性推理中的这种独特作用获得了诸多研究的支持。例如，Dusek 和 Eichenbaum(1997)以老鼠进行的传递性推理研究发现：阻断了海马与皮质或皮质下通路的联接的老鼠，尽管能够进行刺激项的辨别，但却不能进行传递性推理。Heckers, Zalesak, Weiss, Ditman 和 Titone(2004)以人为被试的传递性推理研究中，采用 fMRI 技术，研究发现传递性推理所需要的记忆的灵活表达和整合依赖于完整的海马。Nagode 和 Pardo(2002)以正常成人为被试，用脸谱为材料，进行 PET 的传递性推理研究，结果发现：在需要传递性推理的前提训练的中间阶段比不需要传递性推理的初始训练阶段出现更强的海马激活，并且在不需要传递性推理的测验阶段也没有出现内侧颞叶(medial temporal lobe, MTL)的激活。相类似，在可以进行传递性推理的前提训练中出现了显著的海马激活，而不能进行传递性推理的前提训练中却没有出现海马的激活，并且这些激活差异都排除了交叠信息的整合或两个前提训练阶段的编码在刺激项的新颖性、难度、数量以及干扰和交叠信息的差异的影响，激活差异是传递性推理所致(Nagode & Pardo, 2002)。从这些研究来看，海马在传递性推理中的确起着关键作用，是传递性推理的神经基础之一。

但是，对海马在传递性推理中所起的作用一些研究者也提出了质疑，认为海马在传递性推理中的功能并不纯粹，认为海马与海马旁回和周边区域在传递性推理中具有不同的功能。来自神经心理学的研究证据是海马主要支持基于回忆性经验的任务，海马旁回或海马周边区域则参与基于熟悉性的记忆任务(Yonelinas, Kroll, & Quamme, 2002)。Acuna et al. (2002)进行的传递性推理研究发现：辅助运动前区(pre-SMA)、左顶叶皮质(left parietal cortex)和左前额皮质(left prefrontal cortex)等区域既参与传递性推理，也参与非传递性推理。右顶叶皮质(right parietal)、右前额叶皮质(right prefrontal)和双侧颞叶(bilateral temporal cortex)对所有的交叠对都出现了明显的激活。一些研究还认为传递性推理仅激活了右海马(right hippocampal)。推理判断和视刺激交叠对的再认激活了辅助运动前区(pre-SMA)、顶叶(parietal)和前额叶

(prefrontal cortex)。而 Heckers et al. (2004, 2009)、Jennifer, Sandra 和 Christina (2009)认为海马的结构上和功能上的完整性和对传递性推理的作用更大。

5. 传递性推理的神经环路

随着研究的深入,一些研究者提出了传递性推理的神经环路(neural circuitry of transitive inference),认为脑区的分布式而特定的网络(distributed but specific network of brain region)是人类传递性推理的基础,尤其是在一些化学递质如多巴胺的作用之下(Denise, Rebecca, 2013)。但是,对神经环路的主要成分和区域,不同的研究者提出了不同的看法。根据 Heckers et al. (2004)的研究来看,传递性推理的神经环路主要包括了辅助运动前区(pre-SMA, BA 6)和双侧顶回(bilateral parietal)、前额叶(prefrontal)和颞下回(inferior temporal)。而根据 Acuna et al. (2002)的研究来看传递性推理的神经环路则包括双侧前额叶(bilateral prefrontal cortex)、辅助运动前区(pre-SMA)、运动前区(premotor area)、脑岛(insula)、楔前叶(precuneus)和背外侧后顶叶皮层(lateral posterior parietal cortex)等主要部分,但很显然该成分中没有涉及到内侧颞叶。原因是该研究中使用的切片没有覆盖内侧颞叶(medial temporal lobe)。其他的一些研究也为传递性推理的神经环路提供了支持证据。如,Goel 和 Dolan(2001)使用语词符号的前提、Dickins et al. (2001)使用人像进行传递性推理研究也报告了显著的前额叶和顶叶的激活(prefrontal and parietal cortex activation)。在非正常人的传递性推理研究中也发现了支持传递性推理的神经环路证据。Waltz et al. (1999)[21]研究了前额叶皮质毁坏的病人,研究表明这些病人在关系整合上存在缺陷;Titone, Ditman, Holzman, Eichenbaum 和 Levy (2004)研究了精神分裂症病人,也发现在关系整合上存在困难。

6. 总结与展望

传递性推理与非传递性推理激活区域的差异说明传递性推理在脑区激活上可能有其特异性,未来关于传递性推理研究应该进一步探讨其额叶、顶叶、颞叶的激活。例如,额叶和顶叶在传递性推理中的激活是否与语言组织或推理的具体类型有关呢?传递性推理中额叶和顶叶是否存在某种多重模式联系呢?传递性推理在额叶和顶叶的激活是否存在特异性呢?而对传递性推理有特别意义的海马而言,研究多数都支持了海马是传递性推理的关键,并取得了一定的研究成果。但是,该领域仍有一些问题尚待解决,如海马在传递性推理中功能主要表现在对前提的回忆还是推理判断,或者二者兼而有之?海马及其周围区域对传递性推理的功能是整合的还是分离的?海马旁回在传递性推理中怎样发挥作用?海马在传递性推理中所起作用特殊的,还是一般性的等,还有待进一步探讨。在传递性推理项数以及材料性质方面,可以看出传递性推理的激活受到项数和材料性质的影响,且抽象材料比具体材料有更多的枕——顶卷入,但是否在传递性推理中存在双侧枕-顶-额的视空间神经网络(bilateral occipital-parietal-frontal visuo-spatial network)卷入呢?还需要大量的研究提供支持和证据。

综合来看,我们认为作为传递性推理重要机制的神经环路还不够精确,区域分布还不统一,神经环路显得粗略,现有的研究仅仅是提出了传递性推理的神经环路这一问题,对该问题的回答还需要大量的研究积累。在回答这一问题中,还有一些重要的课题不能忽略,例如,海马和内侧颞叶在神经环路中的角色与作用,组成神经环路的各区域之间有哪些通路并且是如何连接的?但已有的关于传递性神经环路的研究为以后的研究提供了重要的基础和启示。传递性推理是解释推理乃至思维的重要窗口,已有研究成果主要集中在海马、额叶、顶叶等的激活上,同时对材料、项数、推理性质的激活也进行了初步探讨,也尝试性地提出了传递性推理的神经环路,是一个逐步深入的过程。然而,对传递性推理神经机制的探讨还处于起步阶段,尚显薄弱,一些先期的研究者为我们指明了未来的研究方向。如, Titone 等认为将来的实验需要详细研究在健康者和病人中的传递性推理期间大脑激活的不同成分。这样的研究将为传递

性推理的功能性联结提供有价值的信息,而且传递性推理的实验范式将有助于我们揭示陈述记忆的机制。**Demarais 和 Chohen(1998)**认为未来在传递性推理的眼动研究上可以研究被试解决多项传递性推理的表象轴方向。**Olga F. Lazareva 和 Edward A. Wasserman(2012)**认为可以从动物鸽子的角度来探讨不同项目的联合刺激的激活, **Brigitte M. Weiß 等人(2010)**也探讨了灰雁的传递性推理机制。

综上所述,我们认为传递性推理未来的神经机制的研究应该以下面的问题为研究重点。首先在研究方法上进一步拓展。目前对传递性推理神经机制的研究主要采用眼动技术和 fMRI 等技术,这些技术各自的优缺点限制了传递性推理神经机制的大量研究,应该尝试采用各种神经研究方法如 ERP、fMRI、PET、MEG 等对传递性推理的神经机制开展大量的研究,将来也需要综合各种方法技术对传递性推理的神经机制进行系统研究。

第二,从目前的研究结果看,传递性推理的激活区域广泛而不确定。因此,需要设计更多的传递性推理的神经机制研究的实验来确定传递性推理的脑激活的具体区域。例如,我们是否可以设计出传递性推理与加法运算的比较实验,从两者激活差异中进一步找出传递性推理的激活区域,也可以设计出五项推理问题与高度比较问题的对比实验,从两者的激活差异中进一步验证传递性推理的激活区域,还可以设计三项传递性推理和线性三段论对比实验,从多种推理不同的激活中找出传递性推理的激活区域,如此等等。

第三,传递性推理的神经环路系统还需要进一步的验证和纯化。这需要大量的实验来检验。例如,可以设计三项和五项传递性推理的实验,来检验三项和五项在激活上的差异,这不是项数的简单变化,而是认为三项传递性推理和五项传递性推理具有不同的机制,这需要在神经机制的角度上进一步验证。也可以设计实验,考察海马在传递性推理神经环路中的作用,这有助于对海马在传递性推理中的角色进行准确定位。

第四,不同材料、项数的传递性推理激活区域相同吗?这些激活不同有本质的区别和意义吗?对此,也需要大量的实验进行深入研究。例如,对五项具体材料和抽象材料的比较实验,可以考察材料的具体和抽象性对激活的影响,或者对三项以上传递性推理进行项数变化的比较实验,考察项数变化对激活的影响,这些研究可以进一步纯化传递性推理的神经环路,为传递性推理神经环路提供重要的证据。

致 谢

国家自然科学基金项目(31171006)和西南大学心理学部研究团队建设项目(TR2012205-5)支持。

参考文献 (References)

- 毕鸿燕,方格(2001). 4-6岁幼儿空间方位传递性推理能力的发展. *心理学报*, 3期, 238-243.
- 毕鸿燕,方格,翁旭初(2004). 小学儿童二维空间方位传递性推理能力的发展. *心理学报*, 2期, 174-178.
- 李红,林崇德(2001). 个体解决三项系列问题的心理模型. *心理学报*, 6期, 518-525.
- 莫秀峰,李红,张仲明(2011). 3~5岁幼儿在视野阻隔任务中的长度传递性推理. *心理发展与教育*, 3期, 225-232.
- 魏勇刚,尹荣,庞丽娟(2010). 传递性推理与儿童早期非标准测量的关系. *心理科学*, 2期, 449-451.
- 杨娟,邱江,张庆林(2008). 传递性推理的认知与脑机制探讨. *心理科学*, 3期, 663-666.
- 赵雷(2005). *工作记忆和传递性推理*. 武汉:华中科技大学硕士论文,未出版.
- 赵雷,周冶金,刘昌(2006). 工作记忆成分在传递性推理中的作用. *心理科学*, 5期, 1058-1062.
- 张仲明,李红(2007). 个体解决5项系列问题的复合模型研究. *心理科学*, 1期, 104-107.
- 张凤华,邱江,杨群,张庆林(2009). 传递性推理的ERP研究. *心理发展与教育*, 4期, 68-74.
- Acuna, B.D., Eliassen, J.C., Donoghue, J.P., & Sanes, J.N. (2002). Frontal and parietal lobe activation during transitive inference in humans. *Cerebral Cortex*, 12, 1312-1321.

- Brigitte, M.W., Sophia, K., & Christian, S. (2010). Transitive inference in free-living greylag geese, *Anser anser*. *Animal Behaviour*, *79*, 1277-1283.
- Delis, D.C., Squire, L.R., Bihrlé, A., & Massman, P. (1992). Componential analysis of problem-solving ability: Performance of patients with frontal lobe damage and amnesic patients on a new sorting test. *Neuropsychologia*, *30*, 683-697.
- Denise, M.W., & Rebecca, L.G. (2013). Generalizing memories over time: Sleep and reinforcement facilitate transitive inference. *Neurobiology of Learning and Memory*, *100*, 70-76.
- Dickins, D.W., Singh, K.D., Roberts, N., Burns, P., Downes, J.J., Jimmieson, P., et al. (2001). An fMRI study of stimulus equivalence. *NeuroReport*, *12*, 405-411.
- Demarais, A.M., & Cohen, B.H. (1998). Evidence for image-scanning eye movements during transitive inference. *Biological Psychology*, *49*, 229-247.
- Dusek, J.A., & Eichenbaum, H. (1997). The hippocampus and memory for orderly stimulus relations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *94*, 7109-7114.
- Eichenbaum, H. (2004). Hippocampus: Cognitive processes and neural representations that underlie declarative memory. *Neuron*, *44*, 109-120.
- Goel, V., Buchel, C., Frith, C., & Dolan, R.J. (2000). Dissociation of mechanisms underlying syllogistic reasoning. *NeuroImage*, *12*, 504-514.
- Goel, V., & Dolan, R.J. (2001). Functional neuroanatomy of three-term relational reasoning. *Neuropsychologia*, *39*, 901-909.
- Goel, V., Gold, B., Kapur, S., & Houle, S. (1998). Neuroanatomical correlates of human reasoning. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *10*, 293-302.
- Heckers, S., Zalesak, M., Weiss, A.P., Ditman, T., & Titone, D. (2004). Hippocampal activation during transitive inference in humans. *Hippocampus*, *14*, 153-162.
- Jennifer, D.R., Sandra, N.M., & Christina, V. (2009). Impaired relational organization of propositions, but intact transitive inference, in aging: Implications for understanding underlying neural integrity. *Neuropsychologia*, *47*, 338-353.
- Johnson-Laird, P.N., Oakhill, J., & Bull, D. (1986). Children's syllogistic reasoning. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Human Experimental Psychology*, *38*, 35-58.
- Martin, Z., & Stephan, H. (2009). The role of the hippocampus in transitive inference. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, *172*, 24-30.
- Nagode, J.C., & Pardo, J.V. (2002). Human hippocampal activation during transitive inference. *Neuroreport*, *13*, 939-944.
- Olga, F.L., & Edward, A.W. (2012). Transitive inference in pigeons: Measuring the associative values of Stimuli B and D. *Behavioural Processes*, *89*, 244-255.
- Pinel, P., Dehaene, S., Rivière, D., & LebiHan, D. (2001). Modulation of parietal activation by semantic distance in a number comparison task. *Neuroimage*, *14*, 1013-1026.
- Randall, L.W., Vinod, G., Vanessa, R., Frank, K., & Jordan, G. (2013). Transitive inference reasoning is impaired by focal lesions in parietal cortex rather than rostrolateral prefrontal cortex. *Neuropsychologia*, *51*, 464-471.
- Rickard, T.C., Romero, S.G., Wharton, C., Flitman, S., & Grafman, J. (2000). The calculating brain: An fMRI study. *Neuropsychologia*, *38*, 325-335.
- Sternberg, R.J. (1980). The development of linear syllogistic reasoning. *Journal of Experimental Child Psychology*, *29*, 342-356.
- Titone, D., Ditman, T., Holzman, P.S., Eichenbaum, H., & Levy, D.L. (2004). Transitive inference in schizophrenia: Impairments in relational memory organization. *Schizophrenia Research*, *68*, 235-247.
- Waltz, J.A., Knowlton, B.J., Holyoak, K.J., Boone, K.B., Mishkin, F.S., de Menezes Santos, M., et al. (1999). A system for relational reasoning in human prefrontal cortex. *Psychological Science*, *10*, 119-125.
- Wharton, C.M., Grafman, J., Flitman, S.S., Hansen, E.K., Brauner, J., Marks, A., et al. (2000). Toward neuroanatomical models of analogy: A positron emission tomography study of analogical mapping. *Cognitive Psychology*, *40*, 173-197.
- Wynne, C.D.L., & Staddo, J.E.R. (1998). A minimal model of transitive inference. *Models of action: Mechanisms for adaptive behavior*. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, 269-307.
- Yonelinas, A.P., Kroll, N.E., Quamme, J.R., et al. (2002). Effects of extensive temporal lobe damage or mild hypoxia on recollection and familiarity. *Nature Neuroscience*, *5*, 1236-1241.
- Zentall, T.R., & Sherburne, L.M. (1994). Transfer of value from s+ to s- in a simultaneous discrimination. *Journal of Experimental Psychology*, *20*, 176-183.