

• 研究前沿(Regular Articles) •

语言理解中句法加工的脑机制^{*}

方小萍 刘友谊

(北京师范大学认知神经科学与学习国家重点实验室, 北京 100875)

摘 要 大量研究表明左侧额叶和颞叶的多个脑区与句法加工有关, 已有的理论模型分别从不同的角度对句法加工的脑机制进行了解释。通过文献比较与分析发现, 对句法加工的操作定义、实验任务、被试个体差异以及语言差异等均可能导致研究结果出现差异。在将来的研究中, 可以通过跨语言、多任务比较, 不同层面的句法加工的操作, 在方法上将个体功能定位分析与传统的组分析相结合, 以及从神经网络的角度来更准确和全面地揭示句法加工的脑机制。

关键词 句法加工; 神经机制; 脑成像; 语言理解

分类号 B842

1 引言

任何一种语言的词汇数量都是有限的, 但有限的词汇按照不同的方式组合后却能够表达无穷多种意思。在这个过程中, 句法加工起着非常重要的作用, 有了句法的参与, 独立的词汇语义才能够组成更大的语义单元, 即句子水平的语义。这也是句子理解和篇章阅读的基础, 句法加工也因此得到了大量的研究, 尤其是在西方印欧语中。研究者对句法加工的研究始于对失语症病人的观察, 以及随后的行为实验研究, 随着事件相关电位(ERP)、正电子发射断层显像(PET)和功能核磁共振成像(fMRI)等技术的发展, 越来越多的研究者尝试利用这些新的技术来探索句法加工的脑机制, 并取得了新的进展。本文主要综述采用fMRI和PET技术的研究, 尤其是2006年至今的研究(关于更早的研究的评述可参考高兵等人2006年的综述), 讨论句法加工的大脑核心区域及其网络。

2 主流观点及争议

基于脑成像研究结果, 研究者们对句子加工

的脑机制进行了阐述, 主要包括Ullman提出的陈述/程序双系统模型(Ullman, 2001, 2004)、Friederici等人提出的三阶段理论(Friederici, 2002; Friederici & Kotz, 2003)、Hagoort等人提出的MUC模型(Hagoort, 2003, 2005)以及Hickok等人提出的双通路模型(Hickok & Poeppel, 2000, 2004, 2007)。这些理论或模型对句法加工机制的看法存在一些相似之处, 同时也存在着不同的认识。

陈述/程序双系统模型认为, 语言的加工依赖于心理词汇库(mental lexicon)和心理语法库(mental grammar)。其中, 心理词汇库基于陈述记忆系统, 该系统中除了词语, 还包含一些习语或者俗语(例如“kick the bucket”), 而语法的提取与应用则发生在程序记忆系统中, 它是一种内隐的、无意识的认知过程。句法属于语法的一部分, 其功能是将词汇语义联合成更高水平的表征。即使是一串假词组成的句子, 虽然无法得到具体的语义表征, 但读者依然能够利用其中的句法信息(例如, 动词的曲折变化, 名词的单复数, 功能词以及形容词或副词的词缀等)形成一个大概的、抽象的结构表征。该模型认为如果当前任务需要句法加工的参与, 额叶(尤其是布洛卡区及其相邻脑区)、辅助运动区和左侧基底神经节会有显著的激活(Ullman, 2001, 2004)。Newman等人的一项研究发现加工句法违反与语义违反的句子时大脑的激

收稿日期: 2012-03-29

^{*} 国家自然科学基金项目(30900392)。

通讯作者: 刘友谊, E-mail: youyiliu@bnu.edu.cn

活模式是不同的：与正常句子相比，句法违反的句子引起额叶更强的激活，而语义违反主要导致颞叶以及颞-顶脑区的激活上升(Newman, Pancheva, Ozawa, Neville, & Ullman, 2001)。但是，陈述/程序双系统模型认为额叶和基底神经节在句法加工中的表现并不是特异于语言领域的，其他非语言领域的、但涉及规则加工的认知过程也与这些脑区的激活有关，并且该理论把与句法有关的加工统称为基于规则的加工，句法只是这些规则中的一种。

Friederici 的三阶段理论(Friederici, 2002; Friederici & Kotz, 2003)是同时基于脑电和脑功能成像研究提出来的，因此该模型既包含了句子加工的时间信息，也有对应的脑功能定位信息。它把句子加工分成三个阶段，并且每个阶段均有句法加工的参与。在第一个阶段，词类信息(名词、动词等)用于短语结构的建立，这是一个快速自动化的过程，其功能定位于左侧额下回岛盖部和左侧颞上回前部。Friederici 及其合作者发现，与正常句子相比，当句子中存在词类违反而无法形成正常的句子结构时，左侧的额下回岛盖部和颞上回前部会有额外的激活(Friederici & Kotz, 2003)。在第二个阶段，格标记、曲折变化等形态句法信息(morpho-syntax information)和语义信息共同参与题元关系的建立，该过程涉及左侧额叶和颞叶的一系列脑区，其中左侧额下回的 BA44/45 区与句法加工有关，而靠前些的 BA45/47 区与语义加工有关，参与语义加工的还有左侧颞中回。在第三个阶段，不同类型的信息在左侧颞叶后部得以整合，尤其是当句子较复杂或者存在句法或语义的违反时，句法信息和语义信息不能迅速地整合，句子的再分析或者针对存在的错误进行修复的过程均在该阶段进行，该过程发生在左侧颞上回/颞上沟后部和基底核。

Hagoort 的 MUC 模型认为语言加工包括三个成分，分别为提取(memory)、整合(unification)和控制(control)。其中，词汇信息的储存与提取，包括语音信息、语义信息和语法信息，主要由左侧颞叶(包括颞上回/颞上沟中后部、颞中回和颞下回)负责；而言语过程中所需的各种控制，包括根据当前的情景选择性地关注有关信息，忽视无关信息，以及选择合适的表达方式，例如双语者需要根据对话者抑制其中一种语言并选择另一种语言

来进行正常交流，或者在语言交流的同时还需进行其它活动，等等，这些心理过程的发生由大脑左侧背外侧前额叶和前扣带回等注意控制网络实现。该模型的重点在于信息整合阶段。随着语言信息的输入，被提取的词汇信息将逐渐用于信息整合，而负责将这些较小单元的信息整合成更大的有意义单元的工作主要由左侧额下回完成。基于元分析结果(Bookheimer, 2002)，研究者将左侧额下回划分为三个不同的功能分区，其中 BA44/BA6 区与语音加工有关，BA44/45 区与句法加工有关，而 BA45/47 区与语义加工相关，这种分区得到了 Xiang 等人的静息态功能连接分析的支持(Xiang, Fonteijn, Norris, & Hagoort, 2010)。可以看到，句法加工在三个加工成分中都可能存在，但是与三阶段理论不同的是，该模型弱化了句法加工的优先性，突出了句法与语音和语义信息加工的平行性，以及它们之间可能存在的广泛的交互作用(Hagoort, 2003; Snijders et al., 2009)。Snijders 等人发现无论是在句子还是词列中，有词类歧义的条件相比没有歧义的条件在左侧颞中回后部均有额外激活，而左侧额下回则仅在句子中表现出歧义效应，这个结果很好地支持了 MUC 模型，即左侧颞中回后部负责词汇水平的句法信息的提取，而左侧额下回后部负责将这些信息整合起来，并且该过程只在句子加工中发生(Snijders, et al., 2009)。

Hickok 等人的双通路模型把听觉言语加工系统分为背侧通路和腹侧通路，其中背侧通路与声音-运动(sound-motor)的映射有关，而腹侧通路与声音-意义(sound-meaning)的映射有关(Hickok & Poeppel, 2007)。Hickok 等人在多个研究中观察到与没有结构的词列或者声音序列相比，加工有句子结构的材料时左侧颞叶前部有更强的激活(Humphries, Binder, Medler, & Liebenthal, 2006; Humphries, Love, Swinney, & Hickok, 2005)，根据双通路模型，该脑区属于腹侧通路的一部分，负责把从颞中回和颞下回后部提取出的词汇信息组成更大单元的表征。该模型还认为背侧通路中的布洛卡区只是通过语音短时记忆影响了句法加工，并不直接参与句法加工本身，因为当要求被试在加工句子的同时完成一些语音任务时，BA44 区的句法复杂效应消失了(Rogalsky, 2008)。一些病人研究还发现，连接背侧或腹侧通路中不同脑区的

纤维束的损坏也会不同程度地导致句法加工困难。Wilson 等人(2011)对病人的研究发现,背侧通路中的上纵束/弓状束(superior longitudinal fasciculus/arcuate fasciculus, SLF/AF)的损坏越严重,病人句法加工的障碍越严重,而腹侧通路的钩状束(uncinate fasciculus, UF)和极囊束(extreme capsule fiber system, ECFS)更有可能与语义加工有关。而 Tyler 及其合作者对正常人和病人的研究证据表明,左侧额下回、左侧颞中回后部以及左侧颞叶前部均参与句法加工,并且连接左侧额叶和颞叶的白质纤维的损坏会直接影响句法加工,也就是说背侧通路和腹侧通路均参与句法加工(Griffiths, Marslen-Wilson, Stamatakis, & Tyler, 2012; Tyler et al., 2011)。有研究者还进一步提出腹侧通路短语结构建立有关,而背侧通路与句法的复杂性有关,在复杂句子加工中尤为重要(Friederici, 2009)。

从已有的文献来看,句法加工研究中常常报告这样一些脑区参与句法加工:左侧额下回岛盖部、左侧额下回后部、左侧颞上回/颞上沟后部、左侧颞叶前部以及基底神经节。此外,连接左侧额叶和颞叶不同脑区的白质纤维束的损伤也会导致句法加工困难。但由于不同研究者在提出理论与模型时的出发点和角度不同,因此对句法加工机制的解释也不尽相同。例如,(1)句法加工的定义。陈述/程序双系统模型和双通路模型把句法加工笼统地解释为单一的相对同质的过程。尽管 MUC 模型提出了提取和整合两种不同的加工成分,但在句子水平上,句法加工更多地是句法信息整合的过程。而 Friederici 的三阶段模型区分了三种不同层次的句法加工,并且认为它们分别对应于不同的脑区功能。(2)句法加工的脑定位及功能解释。双通路模型认为布洛卡区并不参与句法加工本身,颞叶前部才是负责句法加工的脑区,而其余三个理论则强调布洛卡区在句法加工中的重要作用,但是在具体功能解释上又存在差异。MUC 模型认为布洛卡区的功能是将提取出来的信息整合成更大的信息单元,而陈述/程序双系统模型认为该脑区负责的是句法这种规则性信息的应用,三阶段模型则认为该脑区负责利用格标记、词语的曲折变化等句法信息来分配题元角色。关于左侧颞叶前部的功能,三阶段模型认为该脑区负责利用词类信息建立短语和句子结构,是句

法加工的第一步,而双通道模型则认为该脑区负责所有句法加工,即将小的语义单元组成更大的单元,从而获得句子水平的语义。

3 主要影响因素

以上所述的理论和模型都分别得到了不少研究的支持,但究竟是什么原因导致了研究结果的差异,进而影响对这些结果的解释呢?一方面,句法加工本身就是复杂的综合体,它包含了不同的方面,不同研究范式的侧重点可能存在差异。另外,实验任务的选择对被试的加工策略以及加工深度的调节,研究被试的个体差异以及数据处理方法的选择,均将对所观察到的结果产生影响。再者,不同语言的句法和语义信息相对丰富程度不同,并且已有研究表明两种信息在语言理解中的相对作用存在语言间差异,这种差异也有可能影响我们对句法加工脑机制的探索。接下来我们将分别阐述这些因素对句法加工的可能影响。

3.1 句法加工的多方面性

句法加工研究中常见的实验范式主要包括句法违反范式、复杂程度范式、句子与词列对比范式,以及歧义范式等。这些不同的实验范式对句法加工的侧重点也有所差异,从而可能对句法加工脑机制的认识产生影响。通过比较与分析发现,采用句法违反范式的研究常常会观察到左侧额叶岛盖部的激活,采用复杂程度范式常常会看到布洛卡区的参与,采用句子与词列对比的范式则发现颞叶前部参与句法加工。

句法违反范式常常通过改变词类,使其与前面的语境预期不符而实现,比如“The ice cream was in the *eaten.”中的“eaten”的位置本应是一个名词,而非动词。这种词类违反将带来短语和句子结构建立的困难,对应三阶段模型中的最初的句法分析阶段,在加工这类刺激时则需要更多的句法分析(Friederici, Ruschmeyer, Hahne, & Fiebach, 2003)。但违反范式无法排除由于句法违反引起的错误检测、自动校正等认知加工过程差异的影响,并且已有研究表明错误检测和自动校正也将导致左侧额下回的激活(Christensen & Wallentin, 2011)。在复杂程度操作范式中,对句子结构复杂程度往往有两种取向的操作定义。第一种主要在英语等固定词序语言研究中出现,通过

操作从句来改变句子的复杂程度(Caplan, Alpert, & Waters, 1999; Just, Carpenter, Keller, Eddy, & Thulborn, 1996; Meltzer, McArdle, Schafer, & Braun, 2010; Prat & Just, 2011; Stromswold, Caplan, Alpert, & Rauch, 1996), 例如, “The boy *who the girl chased* is eating.”比“The boy *who chased the girl* is eating.”更加复杂, 因为在阅读第一个句子时, 被试无法即时地将主语“the boy”整合到句子中。第二种是德语、日语等语序比较自由的语言研究中常用的, 将句子成分顺序进行调整, 最常见的是主语和宾语位置互换, 并对比宾语在前和主语在前的两类句子(Ben-Shachar, Palti, & Grodzinsky, 2004; Bornkessel, Zysset, Friederici, von Cramon, & Schlesewsky, 2005; Roder, Stock, Neville, Bien, & Rosler, 2002)。这两种操作中的句法加工都是由于词序操作导致当前信息无法立即整合到已加工的信息中引起的, 并且大多数采用该范式的研究会观察到与简单句子相比, 加工复杂句子时左侧额下回后部(尤其是 BA44 区)的激活上升, 一些研究还报告左侧颞上回/颞上沟后部也表现出相似的激活模式。这种范式存在的主要问题是, 将复杂句子与简单句子相比, 无法观察到加工两种句子时都必需的基本的句法分析过程, 二者的差异可能更多地是在较晚的加工阶段, 一项 MEG 研究发现句法复杂效应仅出现在事后再分析阶段(Braun & Meltzer, 2011)。此外, 加工这种复杂的句子额外增加的不仅仅是句法加工本身, 还包括其他的认知加工, 比如需要更多的工作记忆参与。已有研究表明工作记忆负担增加时左侧额下回激活也会上升(Bullmore et al., 2002; Fedorenko, Behr, & Kanwisher, 2011), 尽管有研究尝试区分句法加工与工作记忆负担引起的脑激活(Fiebach, Schlesewsky, Lohmann, von Cramon, & Friederici, 2005), 但这些研究对句法加工的操作定义本身便混淆有工作记忆, 因此难以将工作记忆的影响完全排除。还有一些研究者采用句子与词列对比范式来探讨负责句子结构加工的脑区, 通过比较有句子结构的正常句子和句子结构打乱后得到的词列, 例如 “the man on a vacation lost a bag and a wallet”和“on vacation lost the a and bag wallet man then a”。采用该范式的多项研究一致发现, 与词列相比, 加工正常句子时颞叶前部有更强的激活(Friederici, Meyer, & von Cramon, 2000;

Hickok, Humphries, Willard, & Buchsbaum, 2001; Humphries, Binder, Medler, & Liebenenthal, 2006; Humphries, Love, Swinney, & Hickok, 2005; Vandenberghe, Nobre, & Price, 2002)。同样地, 这种对比也存在一些问题。有无句子结构的两个条件相比, 除了在句法加工上存在差异, 还在语义整合、以及句法和语义之间的交互存在差异。此外, 在加工词列时, 由于不能将依次呈现的刺激整合起来, 被试的工作记忆负担可能更大, 尤其是在完成记忆探测等任务时(Fedorenko, et al., 2011; Fedorenko & Kanwisher, 2011)。

除了以上三种比较经典的研究范式, 还有一些研究采用其它范式来探讨句法加工的脑机制。比如, 对比有句法歧义和没有句法歧义的句子。在句子 “The newspaper reported that bullying teenagers *are a problem for the local school/is bad for their self-esteem.*”中, 主语既有可能是名词 “teenagers”, 也有可能是 “bullying teenagers”这个现象, 但是当看到系动词 “is/are”的时候, 这种歧义就可以消除。这类研究往往发现在加工有歧义的句子时, 左侧额下回后部和左侧颞中回后部的激活会上升(Rodd, Longe, Randall, & Tyler, 2010), 也有研究发现左侧颞叶前部也参与句法歧义加工(Tyler & Marslen-Wilson, 2008)。这些脑区的激活上升反映的是被试在加工有句法歧义的句子时先按其中一种可能的解释方式来理解, 当与随后呈现的内容不一致时再进行重新分析, 该观点也得到了病人研究的支持(Papoutsis, Stamatakis, Griffiths, Marslen-Wilson, & Tyler, 2011; Tyler & Marslen-Wilson, 2008; Tyler et al., 2011)。在歧义句中, 句法上的歧义往往也导致语义上的歧义, 这可能导致一些研究中所观测到的句法歧义效应与语义加工有关的脑区非常接近。此外, 还有一些研究者采用适应范式来研究句法加工的脑定位(Devauchelle, Oppenheim, Rizzi, Dehaene, & Pallier, 2009; Santi & Grodzinsky, 2010; Segaert, Menenti, Weber, Petersson, & Hagoort, 2012;)。适应范式假设重复地呈现句法结构相同的句子将会导致与句子结构分析有关的脑区激活下降。Vandenberghe, Nobre 和 Price (2002)让被试默读一系列句子, 发现句子结构的相似会导致左侧颞叶前部激活的降低。还有研究则在左侧额下回布洛卡区观测到了句子结构相同引起的激活下降

(Dapretto & Bookheimer, 1999; Santi & Grodzinsky, 2010)。

可以看到, 这些研究中对句法加工的操作定义有很多种, 不同的操作定义所涉及的加工层面也有所差异, 但是很少有研究来直接比较它们。Friederici 等人(2006)操作了名词短语的相对位置, 当调整后的顺序不符合德语对词序的要求时, 左侧额下回岛盖部的激活显著上升, 而当调整后的词序符合句法规则时, 左侧额下回 BA44 区下部和前运动皮层的激活强度会随着当前句子的词序偏离最常见词序的程度的增加而上升。这个结果说明了句法违反和句法复杂性是两种不同的句法加工, 尽管它们看起来都是由于词序操作导致的。而 Santi 和 Grodzinsky (2010)利用适应范式考察了听觉呈现的英语句子的从句类型和从句位置的启动效应, 发现只有当两个句子的从句类型相同时, 左侧额下回 BA45 区激活下降, 而左侧额下回 BA44 区、左侧额上回以及双侧中央前沟下部对两种句法加工都表现出启动效应。在该研究中, 从句类型和从句位置均会导致句子复杂程度不一样, 并且即使不同条件的句子只在词序上存在差异, 但依然观测到不同脑区对不同方面的句法加工的敏感性不同。

总的来说, 句法加工并不是一个单一的过程, 可以通过不同的方式进行操作。研究发现不同方面的句法加工可能参与的脑区也不同: 与句子结构建立有关的脑区可能在左侧额叶岛盖部和左侧额叶前部, 而与句子结构复杂程度有关的脑区可能在左侧额下回和左侧额上回/额中回后部, 其中左侧额下回的不同分区对导致句法复杂度增加的不同方面的句法加工也有着不同的敏感性: BA44 区和左侧额叶后上部的脑区可能与大部分类型的句法加工有关, 而 BA45 区的激活可能仅限于某些方面的句法加工。

3.2 实验任务

为了保证被试在实验时保持足够的注意力来加工所呈现的刺激材料, 大部分实验要求被试完成一些主动任务, 也有一些研究不要求被试做任何外显的行为反应, 只需被动地听或者看句子。当任务要求不同时, 被试很有可能采取不同的认知加工策略来加工当前刺激, 也就是对刺激的加工方式和加工深度将随着任务的改变而改变。

Rodd 等人对比了被动听和探测词-句子内容

语义联系判断任务下的句子加工, 当采用全脑分析以及相同的多重比较校正方法时, 主动任务下双侧额下回和左侧额下回后部表现出语义歧义效应, 而被动听时没有任何效应, 但 ROI 分析显示两种任务下条件之间的激活差异值是相似的, 只是被动听时个体变异更大 (Rodd, Davis, & Johnsrude, 2005), 说明当只需要被动听句子时, 不同被试对句子的加工深度以及加工方式存在很大差异, 导致一些效应无法达到统计上的显著。也有研究者认为没有任何主动任务时的语言加工最能代表核心的语言加工 (Wright, Randall, Marslen-Wilson, & Tyler, 2011), 但在真正的言语交流情景中, 人们并不是毫无目的地接收刺激的, 而是时时刻刻试图从所接收到的言语信息中抽取出有用信息并用于进一步地互动与交流, 可以说是一种带有“主观任务”的加工。在实验情景中, 即使向被试呈现同样的刺激, 当任务不同时, 实验结果也往往不同。Caplan 等人向三组被试呈现带有不同类型从句的英语句子, 其中第一组被试需要根据句子内容对随后呈现的探测句子进行正误判断, 第二组被试只需对每个句子做是否合理的判断, 第三组被试的任务是判断句子是全部由真词组成的还是包含有一个假词, 该任务的完成与句子内容本身无关。结果发现, 第三组被试的句法复杂效应仅局限于左侧额下回后部, 但在前两组被试中, 左侧额中回、额下回、顶叶以及右侧的一些脑区均表现出句法复杂效应, 作者认为左侧额下回后部是真正反映句法加工的脑区, 而其他脑区的激活与实验任务有关 (Caplan, Chen, & Waters, 2008)。Meyer 等人则向两组被试听觉呈现句法违反的句子和正常句子, 要求被试对句子进行句法正确性判断, 并且其中一半的被试还需对句法错误的句子进行不出声的改正, 通过任务间对比发现对不正确句子的改正主要激活右侧包括额下回 BA44 和 45 区在内的脑区, 而句法加工本身主要在左半球 (Meyer, Friederici, & von Cramon, 2000)。

从这些研究可以看出, 随着任务对句法加工深度的要求越大, 越有可能在更多的脑区观测到句法加工效应, 其中有些脑区的激活受到任务的调节, 而有些脑区(例如左侧额下回 BA44/45 区)会相对稳定地表现出句法加工效应。而在左侧额下回内部也存在分工差异, 正如最近的一篇综述

(Friederici, 2011)提到的, 当实验任务或者刺激属性等导致语义加工的需求增加时, 越有可能卷入左侧额下回前部负责语义加工的脑区, 而当句法加工的需求增加时, 将使靠近额下沟的左侧额下回后部脑区激活增强。

3.3 被试个体差异

句法加工是一项高级的认知过程, 容易受到被试本身的特征的影响, 比如, 工作记忆容量大小、语言水平高低, 以及脑结构上的差异, 等等, 都可能影响我们对实验效应的观测。

Prat 和 Just(2011)发现当句子复杂度增加时, 工作记忆容量大的被试越能有效地调用额外的认知资源来加工更加复杂的句子, 表现为核心脑区激活强度的增加、其它脑区的激活以及脑区之间同步性的增加。在 Prat 和 Just 的研究中还测量了每个被试的词汇量, 并发现词汇量水平与被试加工句子时激活强度成反比, 表明被试的词汇量越大, 大脑在加工句子时效率越高。除了功能方面, 个体差异还表现在大脑结构上, 尤其是负责高级认知加工的脑区, 早期的大量临床研究表明不同个体的语言加工脑区(例如布洛卡区)定位差异非常大, 因此, 90 年代初就有研究者指出将不同被试的脑成像数据进行平均的方法是不合适的(Steinmetz & Seitz, 1991)。在处理脑成像数据时, 研究者往往将个体的数据对齐到同一个标准脑, 有些宏观的结构差异可以通过一系列配准方法得到一定的解决, 而更多的微观结构上的差异即使采用很严格的配准方法也无法消除其影响(Fedorenko & Kanwisher, 2009; Saxe, Brett, & Kanwisher, 2006; Tahmasebi et al., 2012)。这些个体差异可能导致在传统的组分析中一些效应的消失, 例如, 一些位置接近但功能不同的脑区由于多个被试的结构差异可能导致经过多个被试叠加和组分析后两个脑区的激活没有差异, 或者功能一样的脑区由于在不同被试上的位置不同而被认为是两个功能不同的脑区。此外, 大部分研究通过条件相减、采用全脑分析来观测效应, 由于一个全脑包含大量的体素(voxel), 为控制犯 I 型错误的概率, 需要严格的多重比较校正, 这将导致一些本来存在的效应由于达不到统计上的显著而被认为不存在。一些研究者基于前人的研究选取感兴趣的脑区(region of interest, ROI), 这在一定程度上可以解决多重比较带来的问题, 但这种

方法仍然无法避免前人研究中的被试与当前被试的差异带来的问题。较为理想的一种方法是在做条件间的比较前, 对于被试个体定义各自的功能 ROI, 提取被试在各自 ROI 中的激活值, 来检验不同条件间的差异。而为了避免循环论证, 需保证用来定义 ROI 和验证不同条件在 ROI 上激活差异的数据是相互独立的(Kriegeskorte, Simmons, Bellgowan, & Baker, 2009)。Kanwisher 等人提出的个体功能定位分析的方法能够在一定程度上减少个体结构与功能差异带来的影响(具体见 4.1)。

3.4 语言间差异

不同语言中的句法信息的丰富程度是不一样的, 在句子理解时人们对句法的依赖程度也不同。一些脑电研究表明, 对句法信息比较丰富的语言(例如德语), 语言加工时句法加工是占主导的, 而且会直接影响语义加工(Friederici, 2002), 而句法信息较少的语言(例如汉语), 句法信息的加工并不是那么明显, 比如, 反映早期的句法加工——基于词类信息的短语结构建立的脑电成分 ELAN 很少被观察到, 而且语义加工不会或者较少受到句法加工的影响(Liu, Li, Shu, Zhang, & Chen, 2010; Zhang, Yu, & Boland, 2010)。在词汇水平上, 一项早期双语者的研究发现, 对句法相对独立于语义的希伯来语, 词语曲折变化的加工不受语义的调节, 而英语的曲折变化则受到词汇语义的调节(Bick, Goelman, & Frost, 2011)。但在句子水平上, 关于语言差异在多大程度上会影响句法加工的脑机制仍然未知(Bornkessel-Schlesewsky & Schlewsky, 2009; Friederici, 2011)。尽管句法和语义相对不独立的语言(例如英语)和相对独立的语言(例如德语)的研究均发现当句法复杂程度增加时布洛卡区的激活会上升, 值得注意的是, 这些语言均含有较丰富的句法信息, 而对句法信息相对比较少、语义相对独立于句法的语言的句法加工机制的研究还很少。汉语作为语义相对独立于句法的语言之一, 其句法加工机制的研究是探讨一般的句法加工脑机制的重要方面。

到目前为止, 只有为数不多的几项研究探讨了汉语句法加工的脑功能定位。Luke 等人让被试选择性地判断动词短语的句法或者语义是否合理, 试图分离出特异于语法或者语义加工的脑区, 但该研究结果发现在加工汉语时, 并没有特异于语法加工的脑区(Luke, Liu, Wai, Wan, & Tan, 2002),

而一项英语短语的研究(Schafer & Constable, 2009)采用更为内隐的任务依然看到了句法和语义在左侧额下回的分离。在句子水平上,已有两项研究采用不同的范式探讨汉语句法加工的脑定位。由于汉语中基本上不存在纯粹的句法违反,Wang 等人采用句法加语义双违反与语义违反条件相减得到句法违反的相关脑区(Wang et al., 2008),其中单纯语义违反的例句如“陆星每天早上煲*~~粥~~给奶奶。”,双重违反的例句如“陆星每天早上煲*~~粥~~给奶奶。”要求被试对整句呈现的句子进行语义合理性判断。该研究结果发现双违反条件下 BA44 区的激活强度同时高于单纯语义违反条件和正常句子条件,而同样采用词类违反范式的德语研究往往报告左侧额叶岛盖部而不是 BA44 区对词类违反敏感。另外,Ye 和 Zhou 的研究发现,与主动句相比,被动句的加工导致左侧额下回 BA45 区和 47 区更强的激活,句子语义的不合理也导致该脑区激活上升(Ye & Zhou, 2009),而 BA45/47 区在三阶段模型、MUC 模型和双通路模型中被认为与语义加工有关。由于这两项研究所采用的任务均需被试对句子语义进行较深的加工,尽管总的来说研究结果支持左侧额下回布洛卡区在句法加工或者句子加工中起着重要作用,但在具体脑区上与其他语言的研究结果并非一致,而且这些效应在无关任务或者没有任务时是否会表现出句法效应还不清楚。关于不同语言的使用者是否会利用同样的脑区或脑网络来进行句法加工还有待更多研究的验证,而这个问题对于回答语言加工脑机制的普遍性与特殊性是非常重要的。

4 对将来研究的启发

4.1 理论与模型

如前所述,当前的几个理论和模型分别从不同的角度提出了对句法加工机制的看法,其中陈述/程序双系统模型是从较宏观的语言加工角度出发的,双通路模型是从听觉言语理解的角度提出的,而三阶段理论和 MUC 模型则更多的是基于句子加工的研究提出的,这些理论与模型尽管存在差异,但这种互补性有利于对句法加工机制的全面认识。总的来说,三阶段理论是当前影响力最大的模型,它对句法加工的不同层面有着比较具体的、可直接验证的假设,因此而备受关注。同时,三阶段理论与句法加工有关的脑区基本

上囊括了其余三个模型所涉及的句法加工相关的所有脑区,并将这些不同脑区负责的句法加工进一步细化,包括早期短语结构的建立、中期句法和语义共同参与的题元关系的构建,以及晚期句法和语义等信息的整合。这几个理论的争论也主要存在于这些脑区的功能解释上,例如,布洛卡区负责的句法加工是利用各种句法线索计算各个句子成分之间的关系,还是仅仅是一种将小单元整合成大单元的加工过程,或者二者都有;颞叶前部是只负责短语结构的建立,还是与句法和语义整合有关;左侧额下回岛盖部与短语结构建立有关,抑或只是词类违反导致的一般的错误检测引起该脑区激活上升;句法和语义等信息的整合是发生在左侧额下回,还是左侧颞上回/颞上沟后部。关于这些问题现有的文献还不能给出很明确的答案,但这同时也为理论或模型的整合提供了契机。

Friederici 在最新的一篇综述中以三阶段模型为基础,整合了新近研究的脑功能定位和网络,以及白质纤维研究的证据,提出了关于从听觉感知到句子理解的信息流动的模型(Friederici, 2012)。在该模型中,Friederici 将双侧通路模型中负责声音到运动映射的背侧通路整合进来,并将颞叶前部的功能扩展为同时具有句法和语义的功能,而不再是单纯的句法功能,但布洛卡区仍被解释为具有句法功能,并且 BA44 和 BA45 区经由不同的通路与颞叶脑区分别形成句法和语义加工的通路。三阶段模型与 MUC 模型最大的不同之处在于句法和语义整合脑区的定位,尽管新模型沿用三阶段理论的观点,认为整合发生在左侧颞叶后部,但作者仍然对该问题持开放态度。

最后,已有模型和理论均未考虑语言差异的可能影响,而已有证据,尤其是来自汉语的研究,表明不同语言的句法加工机制确实有可能受到语言本身特征的影响,在将来的句法加工模型中是否需要加入语言这一变量还需更多跨语言对比的研究证据。

4.2 方法与技术

正如前面所提到的,研究者对句法加工的操作定义以及实验任务的选取均会影响实验结果的观测。一方面,为了更好地对句法加工进行分类,需要在同一个研究中对句法加工进行不同的操作定义从而获得直接的对比证据;另一方面,实验

任务之间的对比也能够让我们更加清楚地看到哪些效应是独立于任务, 哪些效应是仅在某些任务下才会出现的。由于这种精细的对比往往容易受到个体变异的影响, 因此对方法和技术的要求也更高, 个体功能定位的优势逐渐突出。此外, 为了更全面地认识参与句法加工的不同脑区是如何协同工作的, 脑网络水平的研究是一个很重要的途径。接下来将分别介绍这两种方法与技术以及在句法加工机制探索中的应用。

4.2.1 个体功能定位的角度

个体功能定位分析的方法把个体差异考虑在内, 先在每个被试上定位出针对被试个体的 ROI 脑区, 这种基于个体的 ROI 分析能够提高统计检验力, 有利于发现一些比较微弱的效应。这种分析方法最早用于视知觉的研究, 通过一些经典的定位任务(localizer task), 能够很好地在每个被试上定位出 V1 和面孔识别区(fusiform face area, FFA)等视知觉加工的脑区, 此后有研究表明该方法同样适用于社会认知这种高级认知加工的研究, 这些研究在确定个体 ROI 时以解剖结构的地形标记来作为筛选每个 ROI 的 voxel 的标准。在之后的研究中, Fedorenko 和 Kanwisher 针对语言加工脑区分布广的特点将该方法经过一定的调整并应用于语言领域的研究(Fedorenko & Kanwisher, 2009)。在此之前的其他研究者也做过类似的尝试, 例如 Ben-Shachar 等人(2004)采用个体分析的方法发现左侧额下回和双侧颞上沟后部与句法加工本身有关, 而与句子结构特征(强调句或疑问句)无关。

通过一系列探索, Fedorenko 等人发展了一系列语言加工脑区功能定位的任务(Fedorenko, Hsieh, Nieto-Castanon, Whitfield-Gabrieli, & Kanwisher, 2010), 并尝试分离句法和词汇语义等不同方面的语言加工(Fedorenko, Nieto-Castanon, & Kanwisher, 2012a, 2012b)。最新的个体功能定位分析是通过定位任务得到每个被试的激活图, 将所有被试的激活图叠加, 计算出表示每个 voxel 在所有被试中激活比率的激活重叠概率图(probabilistic overlap map), 根据图像分割算法(image segmentation algorithm)得到一系列分离的脑区, 再以大部分被试(例如超过 80%)激活的脑区为确定每个被试 ROI 的标准, 也就是每个被试的 ROI 是该被试激活的脑区与在大部分被试上激活的脑区的交集, 然后利用独立的数据计算每个

被试在不同条件下每个 ROI 的平均激活值以及做进一步的分析(Fedorenko et al., 2010)。Fedorenko 和 Kanwisher 采用句子与词列对比范式, 视觉呈现刺激并要求被试完成记忆探测任务, 对比传统组分析和个体功能定位的分析的结果, 提出组分析方法弱化了个体差异的影响, 从而在布洛卡区未能观察到句法效应, 而单独看个体的激活情况时发现 80%的被试在布洛卡区上均有激活差异(Fedorenko & Kanwisher, 2011)。但也有研究者认为采用传统的组分析方法并不是导致布洛卡区激活没有差异的原因, 而是该脑区确实与句法加工本身无关(Hickok & Rogalsky, 2011)。尽管不同研究者对个体功能定位分析的褒贬不一, 具体的分析方法还处于发展阶段, 但这让我们注意到在正常人研究中个体差异对脑成像研究结果的可能影响, 也让我们不得不思考这些新方法到底在多大程度上将改变我们对以往研究结果的认识。可以肯定的是, 个体差异在脑成像数据中是个非常普遍的现象, 尤其是负责语言这种高级加工的脑区(Tahmasebi et al., 2011), 越来越多研究者注意到个体差异对结果的影响, 并采用个体分析或者功能定位的方法试图减少个体差异带来的影响(den Ouden et al., 2012; Nath & Beauchamp, 2011)。需要注意的是, 该取向的分析对定位任务的要求较高, 如果任务选取不当, 可能导致重要脑区的遗漏, 除了谨慎选取定位任务, 还可以结合传统的组分析从而减少该问题带来的影响。总的来说, 在研究句法加工这种复杂的认知过程, 尤其是比较和分离不同方面的句法加工时, 个体功能定位的方法确实有助于我们发现一些精细的结果。在将来的研究中, 将个体功能定位分析方法和组分析方法结合起来, 或许是一个更好的途径。

4.2.2 网络的角度

从已有研究来看, 句法加工这一复杂的认知过程并不是由某个或某些脑区独立完成的, 而是多个脑区协同作用的结果(Friederici, 2011)。因此, 从网络的角度探讨脑区之间的协同作用才能更全面地认识句法加工脑机制。已有一些研究开始探讨脑区之间的功能连接对句法加工的影响(den Ouden, et al., 2012; Perani et al., 2011; Snijders, Petersson, & Hagoort, 2010; Tyler & Marslen-Wilson, 2008), 并尝试找到连接脑区的结构基础(Friederici, 2009; Wilson et al., 2011)。其中, den

Ouden 等人(2012)基于前人研究中功能激活的结果分别在每个被试上的左半脑确定了四个可能参与句法加工的脑区,它们分别是前运动区、额下回、颞中回前部以及颞上沟后部。定向偏相关(directed partial correlation, dPC)分析表明脑区之间在时间序列上存在显著相关,之后的动态因果模型(dynamic causal model, DCM)分析试图找到句法分析的起点以及句法复杂程度对哪两个脑区的连接产生影响,通过计算每个模型与数据的拟合程度,作者认为最符合数据的模型是:句法加工始于左侧额下回,并且分别与前运动区和左侧颞上沟后部直接连接,左侧颞上沟后部进一步与左侧颞中回前部连接,这些连接都是双向的,并且从左侧额下回到左侧颞上沟后部的连接强度受到句子结构复杂程度的影响。Snijders 等人(2010)采用有效连接(effective connectivity)分析,发现句子加工过程中,有词类歧义与没有词类歧义的句子相比,左侧颞中回后部和左侧额下回的双向连接均显著增强,与此同时,右侧对应脑区之间、双侧脑区以及双侧纹状体与左侧的额下回和颞中回后部的连接也增强。基于这些结果,Snijders 等人认为在句法信息提取,以及把这些信息进行整合的过程不仅涉及了左右半球多个脑区,而且皮层下的一些结构也参与其中。还有研究发现,尽管一些脑区在不同条件下激活没有差异,但这些脑区与其他脑区的功能连接在不同条件下有显著差异(Hampson, Peterson, Skudlarski, Gatenby, & Gore, 2002),充分说明了脑区激活与脑区之间功能连接不存在必然的联系。句法加工网络的研究在定位信息的基础上,让我们可能看到不同脑区是如何相互协调的,甚至信息是如何在不同脑区之间流动的,这为探讨句法加工脑机制提供了一个新的视角。但到目前为止,大部分研究只能说明脑区之间在结构或功能上的连接对句法加工的重要性,但关于脑区之间信息交流以及共同支持语言理解的具体机制还不清楚。

5 小结

句法作为人类语言的重要特征已经得到了大量的研究,陈述/程序双系统理论、三阶段理论、MUC 模型以及双通道模型分别从不同的角度提出了对句法加工脑机制的解释。总的来说,句法加工主要与左侧额叶和颞叶的多个脑区有关,但

不同方面的句法加工、被试的认知加工策略以及语言差异都会影响这些脑区的激活模式。关于语言、任务以及句法操作定义的影响还需要更多直接的研究证据,而采用个体功能定位的方法能够在一定程度上减少个体差异带来的影响,将该方法与传统的分析方法结合以及从网络的角度来探讨多个脑区之间的协同作用有利于优化和整合已有的模型,从而更准确和全面地认识句法加工脑机制。

本文中所综述的大多数是关于句法加工脑机制研究,而在正常语言理解中,很难将句法加工与语义加工完全分离,在句法相关研究中所观察到的效应在多大程度上反应的是句法加工过程本身还是句法和语义等信息共同作用的结果还很难进行评价,而对二者如何相互作用的进一步研究将促进对语言加工机制的认识。

参考文献

- 高兵,曹晖,曹聘.(2006).句法加工的脑机制. *心理科学进展*, 14(1), 32-39.
- Ben-Shachar, M., Palti, D., & Grodzinsky, Y. (2004). Neural correlates of syntactic movement: Converging evidence from two fMRI experiments. *NeuroImage*, 21(4), 1320-1336.
- Bick, A. S., Goelman, G., & Frost, R. (2011). Hebrew brain vs. English brain: Language modulates the way it is processed. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(9), 2280-2290.
- Bookheimer, S. (2002). Functional MRI of language: New approaches to understanding the cortical organization of semantic processing. *Annual Review of Neuroscience*, 25, 151-188.
- Bornkessel-Schlesewsky, I., & Schlewsky, M. (2009). The role of prominence information in the real-time comprehension of transitive constructions: A cross-linguistic approach. *Language and Linguistics Compass*, 3(1), 19-58.
- Bornkessel, I., Zysset, S., Friederici, A. D., von Cramon, D. Y., & Schlewsky, M. (2005). Who did what to whom? The neural basis of argument hierarchies during language comprehension. *NeuroImage*, 26(1), 221-233.
- Braun, A. R., & Meltzer, J. A. (2011). An EEG-MEG dissociation between online syntactic comprehension and post Hoc reanalysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5, 10.
- Bullmore, E. T., Honey, G. D., Fu, C. H. Y., Kim, J., Brammer, M. J., Croudace, T. J., et al. (2002). Effects of

- verbal working memory load on corticocortical connectivity modeled by path analysis of functional magnetic resonance imaging data. *NeuroImage*, 17(2), 573–582.
- Caplan, D., Alpert, N., & Waters, G. (1999). PET studies of syntactic processing with auditory sentence presentation. *NeuroImage*, 9(3), 343–351.
- Caplan, D., Chen, E., & Waters, G. (2008). Task-dependent and task-independent neurovascular responses to syntactic processing. *Cortex*, 44(3), 257–275.
- Christensen, K. R., & Wallentin, M. (2011). The locative alternation: Distinguishing linguistic processing cost from error signals in Broca's region. *NeuroImage*, 56(3), 1622–1631.
- Dapretto, M., & Bookheimer, S. Y. (1999). Form and content: Dissociating syntax and semantics in sentence comprehension. *Neuron*, 24(2), 427–432.
- den Ouden, D. B., Saur, D., Mader, W., Schelter, B., Lukic, S., Wali, E., et al. (2012). Network modulation during complex syntactic processing. *NeuroImage*, 59(1), 815–824.
- Devauchelle, A. D., Oppenheim, C., Rizzi, L., Dehaene, S., & Pallier, C. (2009). Sentence syntax and content in the human temporal lobe: An fMRI adaptation study in auditory and visual modalities. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21(5), 1000–1012.
- Fedorenko, E., Behr, M. K., & Kanwisher, N. (2011). Functional specificity for high-level linguistic processing in the human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(39), 16428–16433.
- Fedorenko, E., Hsieh, P. J., Nieto-Castanon, A., Whitfield-Gabrieli, S., & Kanwisher, N. (2010). New method for fMRI investigations of language: Defining ROIs functionally in individual subjects. *Journal of Neurophysiology*, 104(2), 1177–1194.
- Fedorenko, E., & Kanwisher, N. (2009). Neuroimaging of language: Why hasn't a clearer picture emerged? *Language and Linguistics Compass*, 3(4), 839–865.
- Fedorenko, E., & Kanwisher, N. (2011). Some regions within Broca's area do respond more strongly to sentences than to linguistically degraded stimuli: A comment on Rogalsky and Hickok (2011). *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(10), 2362–2365.
- Fedorenko, E., Nieto-Castanon, A., & Kanwisher, N. (2012a). Lexical and syntactic representations in the brain: An fMRI investigation with multi-voxel pattern analyses. *Neuropsychologia*, 50(4), 499–513.
- Fedorenko, E., Nieto-Castanon, A., & Kanwisher, N. (2012b). Syntactic processing in the human brain: What we know, what we don't know, and a suggestion for how to proceed. *Brain and Language*, 120(2), 187–207.
- Fiebach, C. J., Schlesewsky, M., Lohmann, G., von Cramon, D. Y., & Friederici, A. D. (2005). Revisiting the role of Broca's area in sentence processing: Syntactic integration versus syntactic working memory. *Human Brain Mapping*, 24(2), 79–91.
- Friederici, A. D. (2002). Towards a neural basis of auditory sentence processing. *Trends in Cognitive Sciences*, 6(2), 78–84.
- Friederici, A. D. (2009). Pathways to language: Fiber tracts in the human brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(4), 175–181.
- Friederici, A. D. (2011). The brain basis of language processing: From structure to function. *Physiological Reviews*, 91(4), 1357–1392.
- Friederici, A. D. (2012). The cortical language circuit: From auditory perception to sentence comprehension. *Trends in Cognitive Science*, 16(5), 262–268.
- Friederici, A. D., Fiebach, C. J., Schlesewsky, M., Bornkessel, I. D., & von Cramon, D. Y. (2006). Processing linguistic complexity and grammaticality in the left frontal cortex. *Cerebral Cortex*, 16(12), 1709–1717.
- Friederici, A. D., & Kotz, S. A. (2003). The brain basis of syntactic processes functional imaging and lesion studies. *NeuroImage*, 20, S8–S17.
- Friederici, A. D., Meyer, M., & von Cramon, D. Y. (2000). Auditory language comprehension: An event-related fMRI study on the processing of syntactic and lexical information. *Brain and Language*, 74(2), 289–300.
- Friederici, A. D., Ruschemeyer, S. A., Hahne, A., & Fiebach, C. J. (2003). The role of left inferior frontal and superior temporal cortex in sentence comprehension: Localizing syntactic and semantic processes. *Cerebral Cortex*, 13(2), 170–177.
- Griffiths, J. D., Marslen-Wilson, W. D., Stamatakis, E. A., & Tyler, L. K. (2012). Functional organization of the neural Language system: Dorsal and ventral pathways are critical for syntax. *Cerebral Cortex*. in press
- Hagoort, P. (2003). How the brain solves the binding problem for language: A neurocomputational model of syntactic processing. *NeuroImage*, 20, S18–S29.
- Hagoort, P. (2005). On Broca, brain, and binding: A new framework. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(9), 416–423.
- Hampson, M., Peterson, B. S., Skudlarski, P., Gatenby, J. C., & Gore, J. C. (2002). Detection of functional connectivity using temporal correlations in MR images. *Human Brain Mapping*, 15(4), 247–262.
- Hickok, G., Humphries, C., Willard, K., & Buchsbaum, B. (2001). Role of anterior temporal cortex in auditory sentence comprehension: An fMRI study. *Neuroreport*,

- 12(8), 1749–1752.
- Hickok, G., & Poeppel, D. (2000). Towards a functional neuroanatomy of speech perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(4), 131–138.
- Hickok, G., & Poeppel, D. (2004). Dorsal and ventral streams: A framework for understanding aspects of the functional anatomy of language. *Cognition*, 92(1-2), 67–99.
- Hickok, G., & Poeppel, D. (2007). The cortical organization of speech processing. *Nature Reviews Neuroscience*, 8(5), 393–402.
- Hickok, G., & Rogalsky, C. (2011). The role of Broca's area in sentence comprehension. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(7), 1664–1680.
- Humphries, C., Binder, J. R., Medler, D. A., & Liebenthal, E. (2006). Syntactic and semantic modulation of neural activity during auditory sentence comprehension. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(4), 665–679.
- Humphries, C., Love, T., Swinney, D., & Hickok, G. (2005). Response of anterior temporal cortex to syntactic and prosodic manipulations during sentence processing. *Human Brain Mapping*, 26(2), 128–138.
- Just, M. A., Carpenter, P. A., Keller, T. A., Eddy, W. F., & Thulborn, K. R. (1996). Brain activation modulated by sentence comprehension. *Science*, 274(5284), 114–116.
- Kriegeskorte, N., Simmons, W. K., Bellgowan, P. S., & Baker, C. I. (2009). Circular analysis in systems neuroscience: The dangers of double dipping. *Nature Neuroscience*, 12(5), 535–540.
- Liu, Y. Y., Li, P., Shu, H., Zhang, Q. R., & Chen, L. (2010). Structure and meaning in Chinese: An ERP study of idioms. *Journal of Neurolinguistics*, 23(6), 615–630.
- Luke, K. K., Liu, H. L., Wai, Y. Y., Wan, Y. L., & Tan, L. H. (2002). Functional anatomy of syntactic and semantic processing in language comprehension. *Human Brain Mapping*, 16(3), 133–145.
- Meltzer, J. A., McArdle, J. J., Schafer, R. J., & Braun, A. R. (2010). Neural aspects of sentence comprehension: Syntactic complexity, reversibility, and reanalysis. *Cerebral Cortex*, 20(8), 1853–1864.
- Meyer, M., Friederici, A. D., & von Cramon, D. Y. (2000). Neurocognition of auditory sentence comprehension: Event related fMRI reveals sensitivity to syntactic violations and task demands. *Cognitive Brain Research*, 9(1), 19–33.
- Nath, A. R., & Beauchamp, M. S. (2011). Dynamic changes in superior temporal sulcus connectivity during perception of noisy audiovisual speech. *Journal of Neuroscience*, 31(5), 1704–1714.
- Newman, A. J., Pancheva, R., Ozawa, K., Neville, H. J., & Ullman, M. T. (2001). An event-related fMRI study of syntactic and semantic violations. *Journal of Psycholinguistic Research*, 30(3), 339–364.
- Papoutsis, M., Stamatakis, E. A., Griffiths, J., Marslen-Wilson, W. D., & Tyler, L. K. (2011). Is left fronto-temporal connectivity essential for syntax? Effective connectivity, tractography and performance in left-hemisphere damaged patients. *NeuroImage*, 58(2), 656–664.
- Perani, D., Saccuman, M. C., Scifo, P., Awander, A., Spada, D., Baldoli, C., et al. (2011). Neural language networks at birth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(38), 16056–16065.
- Prat, C. S., & Just, M. A. (2011). Exploring the neural dynamics underpinning individual differences in sentence comprehension. *Cerebral Cortex*, 21(8), 1747–1760.
- Rodd, J. M., Davis, M. H., & Johnsrude, I. S. (2005). The neural mechanisms of speech comprehension: fMRI studies of semantic ambiguity. *Cerebral Cortex*, 15(8), 1261–1269.
- Rodd, J. M., Longe, O. A., Randall, B., & Tyler, L. K. (2010). The functional organisation of the fronto-temporal language system: Evidence from syntactic and semantic ambiguity. *Neuropsychologia*, 48(5), 1324–1335.
- Roder, B., Stock, O., Neville, H., Bien, S., & Rosler, F. (2002). Brain activation modulated by the comprehension of normal and pseudo-word sentences of different processing demands: A functional magnetic resonance imaging study. *NeuroImage*, 15(4), 1003–1014.
- Rogalsky, C. (2008). Broca's area, sentence comprehension, and working memory: An fMRI study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2, 14.
- Santi, A., & Grodzinsky, Y. (2010). fMRI adaptation dissociates syntactic complexity dimensions. *NeuroImage*, 51(4), 1285–1293.
- Saxe, R., Brett, M., & Kanwisher, N. (2006). Divide and conquer: A defense of functional localizers. *NeuroImage*, 30(4), 1088–1096; discussion 1097–1089.
- Schafer, R. J., & Constable, T. (2009). Modulation of functional connectivity with the syntactic and semantic demands of a Noun Phrase Formation Task: A possible role for the Default Network. *NeuroImage*, 46(3), 882–890.
- Segaert, K., Menenti, L., Weber, K., Petersson, K. M., & Hagoort, P. (2012). Shared syntax in language production and language comprehension—an fMRI study. *Cerebral Cortex*, 22(7), 1662–1670.
- Snijders, T. M., Petersson, K. M., & Hagoort, P. (2010). Effective connectivity of cortical and subcortical regions during unification of sentence structure. *NeuroImage*, 52(4), 1633–1644.

- Snijders, T. M., Vosse, T., Kempen, G., van Berkum, J. J., Petersson, K. M., & Hagoort, P. (2009). Retrieval and unification of syntactic structure in sentence comprehension: An fMRI study using word-category ambiguity. *Cerebral Cortex*, 19(7), 1493–1503.
- Steinmetz, H., & Seitz, R. J. (1991). Functional anatomy of language processing: Neuroimaging and the problem of individual variability. *Neuropsychologia*, 29(12), 1149–1161.
- Stromswold, K., Caplan, D., Alpert, N., & Rauch, S. (1996). Localization of syntactic comprehension by positron emission tomography. *Brain and Language*, 52(3), 452–473.
- Tahmasebi, A. M., Davis, M. H., Wild, C. J., Rodd, J. M., Hakyemez, H., Abolmaesumi, P., et al. (2012). Is the link between anatomical structure and function equally strong at all cognitive levels of processing? *Cerebral Cortex*, 22(7), 1593–1603.
- Tyler, L. K., & Marslen-Wilson, W. (2008). Fronto-temporal brain systems supporting spoken language comprehension. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363, 1037–1054.
- Tyler, L. K., Marslen-Wilson, W. D., Randall, B., Wright, P., Devereux, B. J., Zhuang, J., et al. (2011). Left inferior frontal cortex and syntax: Function, structure and behaviour in patients with left hemisphere damage. *Brain*, 134(2), 415–431.
- Ullman, M. T. (2001). A neurocognitive perspective on language: The declarative/procedural model. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(10), 717–726.
- Ullman, M. T. (2004). Contributions of memory circuits to language: The declarative/procedural model. *Cognition*, 92(1-2), 231–270.
- Vandenberghe, R., Nobre, A. C., & Price, C. J. (2002). The response of left temporal cortex to sentences. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(4), 550–560.
- Wang, S., Zhu, Z., Zhang, J. X., Wang, Z., Xiao, Z., Xiang, H., et al. (2008). Broca's area plays a role in syntactic processing during Chinese reading comprehension. *Neuropsychologia*, 46(5), 1371–1378.
- Wilson, S. M., Galantucci, S., Tartaglia, M. C., Rising, K., Patterson, D. K., Henry, M. L., et al. (2011). Syntactic processing depends on dorsal language tracts. *Neuron*, 72(2), 397–403.
- Wright, P., Randall, B., Marslen-Wilson, W. D., & Tyler, L. K. (2011). Dissociating linguistic and task-related activity in the left inferior frontal gyrus. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(2), 404–413.
- Xiang, H. D., Fonteijn, H. M., Norris, D. G., & Hagoort, P. (2010). Topographical functional connectivity pattern in the perisylvian language networks. *Cerebral Cortex*, 20(3), 549–560.
- Ye, Z., & Zhou, X. (2009). Conflict control during sentence comprehension: fMRI evidence. *NeuroImage*, 48(1), 280–290.
- Zhang, Y., Yu, J., & Boland, J. E. (2010). Semantics does not need a processing license from syntax in reading Chinese. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36(3), 765–781.

The Brain Basis of Syntactic Processing During Language Comprehension

FANG Xiao-Ping; LIU You-Yi

(State Key Laboratory of Cognitive Neuroscience and Learning, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Left frontal and temporal brain areas are considered essential for syntactic processing during language comprehension. However, several proposed neural models represent differing views about the mechanisms underlying syntactic processing. Possible reasons for this discrepancy include differences in the manipulation of syntactic processing, the experimental tasks employed, the individual differences of participants, and the differences between languages. Accordingly, to better understand the neural basis of syntactic processing and language comprehension, we suggest that studies which include direct comparisons between languages, tasks, and different aspects of syntactic processing are necessary. Further, the combination of the individual-based functional localization approach and the traditional group analysis can reduce the influence of individual differences between participants. Functional connectivity studies may clarify how these brain areas cooperate with each other and provide an informative picture of syntactic processing.

Key words: syntactic processing; neural mechanism; neuroimaging; language comprehension