

句法加工的脑机制*

高兵^{1,2} 曹晖³ 曹聘⁴

(¹中国科学院心理研究所, 脑与认知科学国家重点实验室, 北京 100101) (²中国科学院研究生院, 北京 100101)

(³聊城大学学生处, 聊城 252059) (⁴聊城大学教育科学学院, 聊城 252059)

摘要 语言理解中, 句法加工至关重要, 它把各个意义单元以不同的方式整合起来, 从而形成整体的意义表征。句法加工的脑机制是心理语言学比较关注的问题, 目前由于 ERP 技术和功能成像技术的进步, 使对这一机制的探讨成为可能。该文对有关句法加工的脑机制的研究进行了回顾与总结, 并针对目前该领域存在的问题与争论进行了讨论。

关键词 句法加工, 脑成像, 脑损伤研究, 句法违反, 句法操作。

分类号 B842;B845

1 引言

语言是人类区别于动物最重要的特点之一, 是人类日常所从事的重要的认知活动。人类语言系统是一个复杂的系统, 具有层次结构, 从简单到复杂依次有音位、语素、单词、短语和句子等不同的层次。各个不同的层次以一定的规则组织起来, 构成可以接受的话语。其中, 将词素组合起来以构成短语和句子的规则即句法, 是决定各个组成部分之间关系的关键因素。例如这样一个句子, “The little old man knocked out the giant wrestler”, 只有通过句法的组织, 搞清楚谁对谁做了什么, 才能使我们理解这种不太可能发生的情景^[1]。因此, 句法信息可以帮助我们以特定的方式将听到或读到的单词组合起来, 以形成对句子的解释。现在语言学界一般都承认, 人们在理解语言的过程中要建立起一定的句法结构^[2]。要确定句法在语言理解中的作用, 建立起完整的句法加工理论, 需要进一步考察句法加工的认知神经机制, 特别是句法加工的脑机制^[3]。

对于脑与语言的关系的研究开始于一个多世纪以前, Broca和Wernicke首先发现特定脑区的损伤

会导致特定的语言障碍, 即失语症。1860年, 法国医生Broca对两名患有言语运动障碍的病人死后的尸体进行解剖, 发现其大脑左半球额下回, 靠近外侧裂的一个区域发生病变。1874年, 德国的Wernicke发现大脑左半球颞叶皮层后部的病变与言语理解的障碍有关。布罗卡失语症患者的言语中缺少曲折变化和句法功能词, 他们不能理解只有利用句法信息才能正确理解的一些被动句, 如 “The dog was chased by the cat”^[4]。因此布罗卡失语症病人具有句法障碍。而维尔尼克失语症患者没有表现出句法的障碍。脑损伤会选择性的影响句法加工这一事实表明, 句法加工有其特定的脑区。

近年来, 随着各种脑成像技术的发展和逐渐成熟, 越来越多的研究开始关注句法加工的精确脑定位问题。本文将对句法加工的脑机制的有关研究进行综述, 并对存在的问题进行讨论。

2 句法加工的脑机制研究

研究句法加工的脑定位问题, 目前主要采用脑损伤方法和脑成像技术, 通过让被试进行各种涉及句法加工的操作, 考察这些加工所涉及的脑区。其中常用的脑成像技术主要有事件相关脑电位技术 (ERPs), 功能磁共振成像技术 (fMRI), 正电子

收稿日期: 2005-02-21

通讯作者: 高兵, E-mail: gaob@psych.ac.cn

发射断层扫描技术(PET),脑磁图技术(MEG)等。常用的涉及句法的实验任务主要包括理解具有词类违反的句子、理解具有其它句法违反的句子、进行各种句法操作。通过一系列ERP研究,Friederici等^[5]发现,句子理解过程可以分为可辨认的三个阶段,其中第一个阶段为基于词类信息的句法结构建立过程,第三阶段为各种来源的信息,包括句法信息的整合过程。句子中词类约束的违反能导致的(E)LAN成分,该成分反映了第一阶段的加工,其它类型的句法违反(短语结构违反、数的一致违反、性的一致违反等)能导致P600成分,它反映的是第三阶段的加工。

2.1 词类违反(早期句法加工)

曾有很多研究通过词类违反考察句法加工的脑机制问题,其中很大一部分为ERP研究。用ERP技术研究语言加工开始于Kutas和Hillyard等发现反映了语义整合的N400成分^[6]。近年来,很多研究发现了与句法加工有关的其它ERP成分,其中包括词类违反所导致的左前负波(Left Anterior Negativity, LAN)。很多研究发现,LAN是主要分布在大脑左半球前部的负波,因此叫做左前负波,多数研究发现LAN的潜伏期为300到500ms,而另一些研究发现其潜伏期为100到300ms^[3]。Friederici等发现,当语境要求出现某种句法类型的单词,例如在一个冠词和形容词之后应该出现一个名词,而实际上出现了另一类型的单词,如动词,那么在这个不应出现的动词的位置就会出现早期的LAN,这表明LAN效应是词类约束的违反^[7]。后来Friederici提出,出现在100到300ms的早期左前负波(ELAN)是词类违反导致的,而出现在300到500ms的左前负波是由形态句法加工导致的^[5]。

与语义整合的N400效应主要分布在脑后部头皮不同,LAN主要分布在大脑的左前部,这表明,词类约束的违反所标志的句法加工应该在前部的脑区进行。然而由于种种原因,由LAN成分头皮分布来推断认知加工的脑机制存在很多困难^[8]。第一个问题就是,仅仅从头皮上记录的脑电无法确切推断产生头皮电位的脑组织。少数头颅内的脑电记

录在一定程度上与头皮上记录的脑电是类似的,但是由于大脑皮层的复杂结构,头颅深部记录的电位和头皮电位之间未必是一种直接的关系。而且,我们不知道我们所关心的认知过程是否在所记录的ERP成分中反映出来。因此,要对句法加工进行精确的脑定位,需要进行脑损伤研究和功能成像研究,或者将ERP研究与这些研究结合起来进行考察。

将ERP研究与脑损伤研究相结合的实验逻辑是,如果某一脑区的损伤导致不能产生反映句法加工的ERP成分,或者出现了该ERP成分的异常,则说明该脑区参与句法加工。Friederici等让左侧额叶皮层损伤的被试以及基底核损伤的被试阅读包含句法违反的句子并判断句子的正确性,结果发现左侧额叶损伤的被试在句法违反的关键词处没有出现LAN,这说明左侧额叶皮层的损伤影响了第一阶段基于词类信息的句法结构建立过程^[9]。基底核损伤病人出现了预期的LAN,说明基底核的损伤不影响句子的理解过程。Kotz等发现,左侧额前叶损伤的病人在加工句法违反的句子时没有出现ELAN,却出现了清晰的P600,而右侧额前叶损伤病人既出现了ELAN也出现了P600,这说明,左侧额前叶对于第一阶段的加工是必要的^[10]。

有些研究还运用空间分辨率更高的其它成像技术考察了早期句法加工的脑定位。Wang等^[11]和Friederici等^[12]通过MEG技术来确定参与早期句法切分过程的皮层结构。他们向被试听觉呈现具有词类错误的句子,要求被试判断其句法正确性,记录被试对句法违反的脑反应。结果表明,早期句法切分过程由额叶区域,可能是planum polare,和fronto-lateral支持的。这些区域在五名被试中的四名中表现出左脑优势的双侧激活。左侧额叶区域对早期句法过程的作用比左侧fronto-lateral区域的作用更大。Kuperberg等通过事件相关fMRI研究了同样的问题^[13],结果发现,当被试进行句子意义可接受性的判断时,句法的违反导致顶上回和顶下回的激活。

2.2 其它句法违反(晚期句法加工)

近年来发现的与句法加工有关的ERP成分,除

了(E)LAN以外,还有600/SPS。Osterhout等发现,当被试阅读包含句法歧义的句子时,会产生不同于N400的晚期正波,这种正波被称为P600^[14],后来根据其功能特征被称作句法正漂移(syntactic positive shift, SPS)。产生P600的一般前提条件是句法约束的违反,例如在句子中的某个位置要求出现“to”,而实际上出现了名词,如“Jill entrusted the recipe friends before she suddenly disappeared.”那么在名词出现500ms以后会出现P600^[15]。后来在多种语言中的不同类型的句法违反(短语结构违反、数的一致违反、性的一致违反等)的条件下出现了类似的P600/SPS效应^[3],而且发现在听句子和阅读条件下结果一致^[16]。值得注意的是很多情况下,P600常伴随LAN一起出现。当句子中包含句法违反时,首先在早期产生一个300~500ms的左前负波,然后出现P600^[17,18]。这种情况与句子理解的三阶段模型^[5]是一致的,该模型认为,第一个阶段为纯句法阶段,在词类的基础上建立其最初的句法结构;第二阶段为词汇语义和形态句法加工,进行主题角色分配;第三阶段为多种类型信息的整合,形成对句子意义的最终解释。LAN和P600所反映的分别是第一阶段和第三阶段的加工。

与(E)LAN一样,通过P600的头皮分布来推断认知加工的脑机制存在很多困难,因此一些研究将ERP研究与脑损伤和功能成像技术结合起来进行了研究。在Friederici等的研究中,让左侧额叶皮层损伤的被试以及基底核损伤的被试阅读包含句法违反的句子,结果发现左侧额叶损伤的被试在句法违反的关键词处出现了波幅减小的P600^[9],这说明,左侧额叶皮层的损伤对第三阶段的再分析过程也产生了一定的影响。基底核损伤病人出现了预期的P600,说明基底核的损伤不影响句子的理解过程。Wassenaar等的ERP研究发现,健康成人对词类违反的句子表现出清晰的P600效应,而布罗卡失语症患者只出现了减弱和延迟的P600/SPS效应^[19]。这说明,布罗卡区的损伤会导致句法加工的障碍。

也有很多研究用空间分辨率更高的成像技术考察了晚期句法加工的脑定位。Meyer等用事件相

关fMRI技术考察了数、性、格的一致违反条件下被试的脑反应^[20]。他们让不同的被试听同样的句子材料,但是遵循不同的指导语,要求所有被试进行是否符合语法的判断任务,其中一半被试还要暗自修正错误句子。结果发现几个左侧颞叶脑区的脑反应根据句子符合语法的程度的不同而变化,特别是不进行修正的被试组。另外,当被试额外进行修正任务时,可以观察到右侧大脑外侧裂附近皮层的局部血流量的增加。特别是,右侧额下回(pars opercularis和pars triangularis)和右侧颞横回(Heschl's gyrus)受到修正任务要求的影响更大。与此相比,颞上回的前部(planum polare)表现出双侧激活的增强。尽管左半球的激活明显的根据句子是否符合语法而变化,但本研究结果表明右侧大脑外侧裂附近皮层,特别是当任务明确要求即时修正时参与了语法加工。Newman等也用fMRI技术考察了数的一致违反条件(句法违反)和引入无关动词条件(语义违反)下的脑活动情况,发现额叶的不同区域对上述违反敏感,其中pars opercularis对名词一动词的数的一致违反敏感,而Pars triangularis对于无关动词的引入更加敏感^[21],这说明额叶的不同亚区域具有不同的功能,其中pars opercularis对句法加工敏感。Moro等在PET实验中通过由假词组成的书写句子来实现词汇语义成分的中立^[22]。他们要求被试出声读出句子或者要求探测句子中的不规则,对句子进行可接受性判断。结果发现,在句法和形态句法加工中,探测到布罗卡区和右侧额下皮层的部分区域参与了这一加工。而且,在这一系统中,左侧尾状核和脑岛仅在句法加工中得到激活,表明了这些区域在句法计算中的作用。这些发现证明,这些脑结构组成了一个选择性的参与形态和句法计算的神经网络。Pettersson等运用事件相关fMRI进行的研究发现,人工语法的“性”的违反也导致了布罗卡区的激活^[23]。

2.3 句法操作

除了通过上述两种句法违反的方法进行研究,一些研究者通过让脑损伤的被试进行句法操作,或让正常被试进行句法操作的同时进行脑部成像,从

而推测负责句法加工的脑区。

2.3.1 脑损伤病人的句法操作

70年代的有关研究^[4]已经证明,布罗卡区在语法编码和切分操作中发挥了极其重要的作用,不依赖于形式的语法知识表征在这一区域。然而后来的一些研究^[24]表明,布罗卡区与句法加工的关系并非如此简单。Kempler等等用CT和PET技术考察了43名失语症患者^[25],结果发现,句法理解与额下皮层(布罗卡区)和颞叶区域(维尔尼克区)之间存在相关。Caplan等让60名脑中风患者进行多种形式的句法操作,发现与对照组相比,他们的操作成绩较差,其中左半球中风患者的成绩更差,CT扫描发现,大脑外侧裂附近皮层不同部位的损伤都能导致多种句法操作的障碍^[26]。

2.3.2 正常被试的句法操作

运用正常被试进行句法操作来推测句法加工的脑区,很多研究都通过某种方式将句法加工单独分离出来。

第一种分离句法加工的方法是比较复杂句和简单句。其逻辑是,如果复杂句与简单句相比包含了额外的句法操作,那么复杂句条件下激活更强的脑区就是句法加工的脑区。Stromswold通过PET技术考察了句法加工的脑定位问题^[27]。他们操纵句子的复杂性让被试进行可接受性判断,对被试进行PET扫描,结果发现句法复杂句与句法简单句相比,在布罗卡区,特别是pars opercularis出现了局部脑血流量的显著增加。Just等运用fMRI技术也研究了这一问题,他们操纵句子的复杂性,让被试对句子进行可接受性判断,发现左右半球的维尔尼克区和布罗卡区都得到了激活,左半球的激活程度更高^[28]。Stowe等运用了不同的实验任务考察了这一问题。他们让被试判断两个句法复杂性不同的句子的意义是否相同,发现复杂句法条件与简单句法条件相比,后部颞中和颞上回得到了激活,表明这些区域可能参与句子结构的加工^[29]。Peelle等也用fMRI技术考察了句子复杂性的问题^[30]。他们通过加工宾语从句和主语从句来操纵句子的复杂性,并以不同的速度向被试听觉呈现句子,结果发现,在不同的呈

现速度下,左侧额下皮层都得到激活。

不论是句法复杂句与句法简单句的对比还是句子与词列的对比,都包含了句子意义的加工,无法解释真正的句法加工的脑机制,因此有些研究运用了无意义的句子。无意义的句子是将语法正确的句子中的名词、动词和形容词用假词代替,这样的句子条件下只包含了句法的信息而没有语义信息。将这种看似语法正确却没有意义的句子和正常的句子条件进行比较,Friederici等发现了后部颞上沟的激活,同时也发现前部颞上沟的部分激活,他们还将无意义句与正常句、真词列以及假词列条件进行比较,发现双侧布罗卡区中部的激活^[31]。Meyer等在fMRI实验中运用了两种句子条件,一为包含正常功能词和内容词的正常口语,二为包含功能词和假词的假口语。两种条件的比较结果表明,相对于正常句子,听假句子在前部的颞上区域和额叶盖部产生了强的激活^[32]。可以看出,通过这种分离句法加工的方法,得到了布罗卡区和颞叶部分区域的激活。

总的来说,以不同方法和不同的任务进行的研究结果表明,额叶、颞叶的某些区域,特别是左侧额叶和颞叶的某些区域参与了句法的加工。但是各个研究所表明的具体的脑区位置并不完全相同。

3 问题与争论

尽管ERP和功能成像技术已经使句法加工的脑定位研究称为可能,并且已经涌现了一批有价值的研究。但是脑的极端复杂性和技术手段的相对落后,以及相应的实验设计本身存在的缺点使有关研究对这一问题的回答尚不能令人满意。以下是引起争论较多的几个问题。

3.1 句法加工与工作记忆

根据经典的工作记忆理论^[33],在句子理解过程中工作记忆的参与是必要的,特别是加工句法复杂的句子,工作记忆的负荷将会加重。如前文所述,在脑成像研究中分离句法加工的一种重要手段是操纵句法的复杂性,认为句法复杂句与句法简单句条件下脑反应的差别可以看作是由句法加工导致

的。以这种方法分离句法加工，一般发现布罗卡区，特别是pars opercularis 的局部脑血流量显著增加^[27,28,30]。然而，复杂条件与简单条件的差别除了句法复杂性以外，还有工作记忆负荷的差别，两种条件下脑反应也许是由工作记忆负荷的差别导致的。而且，也有研究发现，在多种条件下工作记忆负荷的增加会导致布罗卡区的激活。Fiebach等加工Filler-Gap Dependencies句子的fMRI研究^[34]和Cooke等加工antecedent-gap linkages的fMRI研究^[35]发现，在某些句子成分与语境进行语法和语义整合以前必须保持在记忆中时，左侧额下皮层得到了激活。可以看出，在一定程度上，工作记忆负荷的增加和句法复杂性的增加所产生的脑激活是一致的，因此，很可能通过句法复杂性的操作进行的脑成像研究所得到的脑激活的原因是一样的，即工作记忆负荷的增加，而句法操作的特异化脑区有可能不在布罗卡区。

3.2 句法加工与语义加工

在正常的句子理解中，句法和语义是结合在一起的。要研究句法的脑机制，必须通过一定的方法将句法和语义进行分离，然而前述分离句法的方法大多没有真正的将句法和语义分离开。在句法复杂句和句法简单句的比较中，虽然语义完全相同而只有句法不同，但是句法复杂句与句法简单句相比，其语义的操作方式也很可能是不同的。例如以下两个句子：

Men that assist women are helpful.

Women that men assist are helpful.

尽管字数相同、意义一致，但是进行语义理解过程中形成心理表征时，意义单元进入心理表征的顺序也是不同的，因此所形成的脑成像差异是因为意义表征建立过程的差别还是句法操作所导致的差别也是有疑义的。通过句法违反研究句法加工是一种用ERP研究句法加工常用的方法，并且稳定的得到了(E)LAN和P600/SPS，然而这种方法同样不能避免语义加工。从理论上讲，句法违反的检测需要在一定的语境中，而语境信息表征的建立是在对句子中单词的意义解释的基础上建立的，因此句法违

反所得到的脑激活区域必然在较大程度上是由语义加工所导致的。多项fMRI研究表明，操纵句法复杂性和句法违反大多导致双侧颞叶和双侧额叶的激活^[17,18,20-23]。而某些fMRI研究也表明，句子理解中的语义加工也导致同样区域的激活^[36]。这种重合有两种可能，一种可能是，语义和句法加工的脑区可能是重合的，另一种可能是，前述有关句法加工的研究没有真正分离出句法加工，因此这些研究所声称的脑区也未必是句法特异性的。

3.3 句法理解与句法产生

句法加工既包括句法理解也包括句法产生，那么句法理解和句法产生是否涉及同样的脑区呢？已经有大量研究表明布罗卡区在言语产生中的重要作用，那么对于句法产生，布罗卡区是否参与呢？Dogil等进行了事件fMRI研究，结果表明在言语产生中，句法加工不但导致预期的布罗卡区的激活，还发现了维尔尼克区和小脑的激活^[37]。布罗卡区和维尔尼克区的激活与句法理解过程的脑反应是一致的，然而小脑的激活出乎意料。由于在该研究中的配对相减实验设计使两种条件下除了句法加工外其余的条件也是完全一样的，因此小脑的激活应该是句法加工的结果。有研究表明，小脑也会参与一些高级认知功能^[38]，也有研究表明小脑会参与句法理解加工^[39,40]，这进一步表明小脑参与句法加工是完全有可能的。然而多数句法理解的研究没有发现小脑的参与，因此有可能仅在有限的条件下，句法加工会导致小脑的激活。那么到底句法理解、句法产生与小脑以及其它大脑皮层的关系是怎样的呢？显然，这还需要进一步的研究。

3.4 早期加工与晚期加工

如前所述，根据Frederici的句子理解的三阶段模型^[5]，句子理解分为三个阶段，第一和第三阶段涉及句法加工，其中第一个阶段为LAN所反映的纯句法阶段；第三阶段为P600所反映的多种类型信息的整合。LAN和P600的极性、潜伏期和头皮分布都是不同的，因此第一和第三阶段所涉及的句法加工的脑区也是不同的。Friederici等^[9]、Kotz等^[10]和Wassenaar等^[19]的研究发现了脑损伤的不同部位对

于第一和第三阶段句法加工的影响也是不一样的,但是他们的结果并不完全一致。Friederici等发现左侧额叶的损伤主要影响第一阶段加工,也对第三阶段加工有一定的影响^[9]。Kotz等发现左侧颞前叶影响第一阶段的句法加工而不影响第三阶段,而右侧颞前叶对第一和第三阶段的加工都不影响^[10]。Wassenaar等发现,布罗卡失语症患者的P600/SPS效应(第三阶段加工)被减弱和延迟^[9]。从以上的研究可以看出,各个脑区对第一和第三阶段的加工的影响是不一样的,然而很多研究并未考虑句法加工的阶段问题,而是直接比较句法复杂和句法简单的句子,或者对没有意义的句子和正常的句子进行比较,这样比较所获得的激活的脑区可能既包括第一阶段的加工,也包括第三阶段的加工,因此无法真正澄清负责特定句法加工的脑区。

4 小结与展望

总的来说,目前人们对句法加工的脑机制进行了大量的研究,这些研究通过不同的实验设计说明,额叶的某些区域、颞叶的某些区域,甚至顶叶和小脑的某些部位都会影响句法加工。但是,由于各个研究自身存在的某些缺陷,加上人脑本身又是极其复杂,因此这些研究所得出的结果尚难以定论。对于这一问题目前还存在很多争论,要真正揭示大脑如何进行句法加工之谜,还需要设计更加科学的实验进行研究。

在未来的研究中,需要充分考虑工作记忆与句法加工的关系;控制语义对句法加工的影响;分清句法理解与句法加工;分离出各个不同阶段的加工。另外,还应考虑不同语言的特异性以及不同个体之间的个别差异问题。当然,句法加工的脑定位研究要真正取得进展,除了利用各种手段控制无关因素外,还要依赖于脑成像技术的进一步发展成熟。

参考文献

- [1] Kaan E, Swaab T Y. The brain circuitry of syntactic comprehension. *Trends Cognitive Science*, 2002, 6(8): 350~356
- [2] Hagoort P. How the brain solves the binding problem for language: a neurocomputational model of syntactic processing. *NeuroImage*, 2003, 20: S18~S29
- [3] Hagoort P, Brown C, Osterhout L. The neurocognition of syntactic processing. In: Brown C M, Hagoort P ed. *Neurocognition of language*. Oxford: Oxford University Press, 1999. 273~317
- [4] Caramazza A, Zurif E B. Dissociation of algorithmic and heuristic processes in language comprehension: evidence from aphasia. *Brain Lang.*, 1976, 3: 572~582
- [5] Friederici A D. Towards a neural basis of auditory sentence processing. *Trends Cognit. Sci.*, 2002, 6: 78~84
- [6] Kutas M, Hillyard S A. Reading senseless sentences: brain potentials reflect semantic anomaly. *Science*, 1980, 207: 203~205
- [7] Friederici A D, Hahne A, Mecklinger A. Temporal structure of syntactic parsing: early and late event-related brain potential effects. *J. Exp. Psychol. Learn. Memory Cognit.*, 1996, 22: 1219~1248
- [8] Kutas M, Federmeier K D, Sereno M I. Current approaches to mapping language in electromagnetic space. In: Brown C M, Hagoort P. *Neurocognition of language*. Oxford: Oxford University Press, 1999. 359~384
- [9] Friederici A D, Cramon DY, Kotz SA. Language related brain potentials in patients with cortical and subcortical left hemisphere lesions. *Brain*, 1999, 122: 1033~1047
- [10] Kotz S A., Cramon DY, Friederici AD. Differentiation of syntactic processes in the left and right anterior temporal lobe: ERP evidence from lesion patients. *Brain Lang.*, 2003, 87: 135~136
- [11] Wang Y, Oertel U, Meyer M, et al. MEG source localization of early syntactic processes. *NemoImage*, 2000, 11(5), Part 2 of 2 Parts
- [12] Friederici A D, Wang Y, Herrmann C S, et al. Localization of Early Syntactic Processes in Frontal and Temporal Cortical Areas: A Magnetoencephalographic Study. *Human Brain Mapping*, 2000, 11: 1~11
- [13] Kuperberg G, Halgren E, Greve D, et al. Event-related fMRI

- reveals distinct patterns of neural modulation during semantic and syntactic processing of sentences. *NeuroImage*, 2000, 11(5), Part 2 of 2 parts
- [14] Osterhout L, Holcomb P J. Event-related brain potentials elicited by syntactic anomaly. *J. Memory Lang.*, 1992, 31: 785~806
- [15] Ainsworth-Darnell K, Shulman H G, Boland J E. Dissociating Brain Responses to Syntactic and Semantic Anomalies: Evidence from Event-Related Potentials. *Journal of Memory and Language*, 1998, 38: 112~130
- [16] Hagoort P, Brown C M. ERP effects of listening to speech compared to reading: the P600/SPS to syntactic violations in spoken sentences and rapid serial visual presentation. *Neuropsychologia*, 2000, 38(11): 1531~1549
- [17] Hagoort P, Wassenaar M, Brown C M. Syntax-related ERP-effects in Dutch. *Cognitive Brain Research*, 2003, 16: 38~50
- [18] Friederici A D, Gunter T C, Hahne A, et al. The relative timing of syntactic and semantic processes in sentence comprehension. *Neuroreport*, 2004, 15(1): 165~169
- [19] Wassenaar M, Hagoort P. Word-category violations in patients with Broca's aphasia: An ERP study. *Brain and Language*, 2005, 92: 117~137
- [20] Meyer M, Friederici A D, Cramon D Y. Neurocognition of auditory sentence comprehension: event related fMRI reveals sensitivity to syntactic violations and task demands. *Cognitive Brain Research*, 2000, 9: 19~33
- [21] Newman S D, Just M A, Keller T A, et al. Differential effects of syntactic and semantic processing on the subregions of Broca's area. *Cognitive Brain Research*, 2003, 16: 297~307
- [22] Moro A, Tettamanti M, Perani D, et al. Syntax and the Brain: Disentangling Grammar by Selective Anomalies. *NeuroImage*, 2001, 13: 110~118
- [23] Petersson K M, Forkstam C, Ingvar M. Artificial syntactic violations activate Broca's region. *Cognitive Science*, 2004, 28: 383~407
- [24] Swaab T Y, Brown C, Hagoort P. Understanding ambiguous words in sentence contexts: electrophysiological evidence for delayed contextual selection in Broca's aphasia. *Neuropsychologia*, 1998, 36: 737~761
- [25] Kempler D, Curtiss S, Metter E J, et al. Grammatical comprehension, aphasic syndromes and neuroimaging. *Journal of Neurolinguistics*, 1991, 6(3): 301~318
- [26] Caplan D, Hildebrandt N, Makris N. Location of lesions in stroke patients with deficits in syntactic processing in sentence comprehension. *Brain*, 1996, 119 (Pt 3): 933~949
- [27] Stromswold K, Caplan D, Alpert N, et al. Localization of Syntactic Comprehension by Positron Emission Tomography. *Brain and Language*, 1996, 52(3): 452~473
- [28] Just M A, Carpenter P A, Keller T A, et al. Brain activation modulated by sentence comprehension. *Science*, 1996, 274: 114~116
- [29] Stowe L A, Broere C A, Paans A M, et al. Localizing components of a complex task: sentence processing and working memory. *NeuroReport*, 1998, 9: 1995~1999
- [30] Peelle J E, McMillan C, Moore P, et al. Dissociable patterns of brain activity during comprehension of rapid and syntactically complex speech: Evidence from fMRI. *Brain and Language*, 2004, 91: 315~325
- [31] Friederici A D, Meyer M, Cramon D Y. Auditory language comprehension: an event-related fMRI study on the processing of syntactic and lexical information. *Brain Lang.*, 2000, 74: 289~300
- [32] Meyer M, Alter K, Friederici A. Functional MR imaging exposes differential brain responses to syntax and prosody during auditory sentence comprehension. *Journal of Neurolinguistics*, 2003, 16: 277~300
- [33] Ruchkin D S, Grafman J, Cameron K, et al. Working memory retention systems: A state of activated long-term memory. *Behavioral and Sciences*, 2003, 26(6): 709~777
- [34] Fiebach C J, Schlesewsky M, Friederici A D. Syntactic working memory and the establishment of filler-gap dependencies: insights from ERPs and fMRI. *J. Psycholinguist. Res.*, 2001, 30: 321~338
- [35] Cooke A, Zurif E B, DeVita C, et al. Neural basis for

- sentence comprehension: grammatical and short-term memory components. *Hum. Brain Mapp.*, 2002, 15: 80~94
- [36] Kiehl K A, Laurens K R, Liddle P F. Reading Anomalous Sentences: An Event-Related fMRI Study of Semantic Processing. *NeuroImage*, 2002, 17: 842~850
- [37] Dogil G, Ackermann H, Grodd W, et al. The speaking brain: a tutorial introduction to fMRI experiments in the production of speech, prosody and syntax. *Journal of Neurolinguistics*, 2002, 15: 59~90
- [38] Daum I, Ackermann H. Cerebellar contributions to cognition. *Behav Brain Res.*, 1995, 67(2): 201~10
- [39] Marien P, Engelborghs S, Pickut B A, et al. Aphasia following cerebellar damage: fact or fallacy? *Journal of Neurolinguistics*, 2000, 13: (2-3) 145~171
- [40] Fabbro F, Moretti R, Bava A. Language impairments in patients with cerebellar lesions. *Journal of Neurolinguistics*, 2000, 13: 173~188

The Brain Mechanism of Syntactic Processing

Gao Bing^{1,2} Cao Hui³ Cao Pin⁴

¹*State Key Laboratory of Brain and Cognitive Science, Institute of psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)*

²*Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)*

³*Students' affairs division, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)*

⁴*School of Educational Science, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)*

Abstract: Syntactic processing is very important in language comprehension, by which all the semantic units are integrated and a whole semantic representation are constituted. The brain mechanism of syntactic processing is a very important issue in the study of psycholinguistics. With the development of technique of ERP and functional imaging, the possibility to study the brain mechanism of syntactic processing has emerged. In this paper, the studies about the brain mechanism of syntactic processing were reviewed and the issues and the debate in the domain were discussed.

Key words: syntactic processing, brain imaging, brain lesion studies, syntactic violations, syntactic operation.