

综述

语言理解中的语义加工：不同模态神经影像的研究

王穗苹*, 黄健

华南师范大学心理健康与认知科学重点实验室, 心理应用研究中心, 心理学院, 广州 510631

摘要: 语义加工在语言理解过程中扮演着核心作用。随着认知神经科学技术的发展, 在过去的20余年间, 研究者们对语义加工的时间进程和大脑机制开展了深入的研究, 构建了多个经典的理论模型。未来的研究应着重于对语义加工的概念进行更精细而系统的划分, 在此基础上, 从大脑功能协同与交互的角度以及不同成像技术辐合性运用的角度对语义加工开展更为系统的研究。

关键词: 阅读理解; 语义加工; 不同模态神经影像

中图分类号: B842.5

Semantic processing in language comprehension: evidence from multi-methodologies

WANG Suiping*, HUANG Jian

Guangdong Provincial Key Laboratory of Mental Health and Cognitive Science, Center for the Study of Applied Psychology, and School of Psychology, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

Abstract: Semantic processing plays a key role in the language comprehension. In the past more than two decades, by using different kinds of cognitive neuroscience methods, the time course and the neural basis of semantic processing had been comprehensively investigated, and a few classic models had been proposed based on these studies. Future studies should focus more on a precise and systematic definition of the concept of semantic processing. Furthermore, by using the convergence evidence from multi-methodologies, more systematic studies on semantic processing should be carried out from the perspective of the wholeness and the interactivity of the brain function to understand the processes.

Key words: language comprehension; semantic processing; multi-modeling imaging

语言的出现, 是人类历史发展过程中的一个划时代的事件。语言的出现使得人类可以通过抽象的符号突破时间和空间的界限与他人沟通, 并保存知识和经验。然而语言理解作为一项人类的高级认知功能, 其运作机制是异常复杂的。研究者在19世纪就开始关注语言加工的大脑机制, 其中标志性的事件是通过尸检技术发现了 Broca 和 Wernicke 这两个跟语言相关的大脑区域。但是由于技术限制, 对于语言理解过程大脑机制的研究并未取得实质性的

进展。随着20世纪末期认知神经科学技术的进步, 尤其是随着以事件相关电位 (event-related potential, ERP)、功能磁共振成像 (functional magnetic resonance imaging, fMRI) 为代表的脑功能成像技术在语言研究中的运用, 人类对于语言理解的大脑机制的了解获得了突破性的进步^[1]。

语言理解的根本目的是获得意义的联贯性表征, 其中语义加工扮演着最为核心的作用。目前, 研究者基本同意, 语义加工至少包含两个基本而核

Received 2018-05-11 Accepted 2018-07-30

Research from corresponding author's laboratory was supported by grants from the National Natural Science Foundation of China (No. 31571136, 31500880), the National Social Science Foundation of China (No. 15AZD048), and Guangzhou Philosophy and Social Science Foundation, China (No. 2018GZYB40).

*Corresponding author. Tel: +86-20-85216510; E-mail: wangsuiping@m.scnu.edu.cn

心的加工成分, 即词汇语义提取 (lexical retrieval) 以及语义的整合性加工 (semantic integrative processing)。对单词汇的语义加工只需要进行词汇语义提取, 而对于更大的语料, 例如多个词汇所构成的短语、句子或语段, 则不仅需要提取出单个词汇的语义信息, 而且还需要将单独的语义信息进行整合 (integration), 才能获得整体的短语 / 句子的语义信息, 而这种语义层面的整合加工, 就被定义为语义整合加工^[2,3]。

在语言理解问题上, 研究者特别关注其内部各子过程如何组织这一问题, 即是模块化的 (modular) 还是相互作用的 (interactive), 是并行的还是串行的, 这些问题与人类认知的基本机制也有极大的关系。语言理解的模块化理论^[4-6] 强调每一个子过程都是相互独立的, 从时序来看, 加工是从较低水平到高水平逐渐深入, 例如词汇提取在前, 而句意整合在后。而交互作用理论则认为^[7,8], 句子理解的每一过程都是各种信息交互作用、相互制约与满足的结果, 因此在语义提取的最初阶段, 句法信息、语境、语义等更高水平的信息会同时起作用, 制约和限制着词汇语义的提取。语义加工各认知过程如何组织, 这一问题可以具体化到不同层面的信息在“何时” (when) “何地” (where) 得到加工的问题上。因此只有通过系统地结合语义理解过程中的时间进程以及大脑空间定位, 通过整合“何时”和“何地”的问题, 才能更好地揭示语义加工的运作机制。本综述将首先从语义加工的时间进程与大脑机制两个角度回顾多模态的研究证据, 在此基础上介绍相关的重要理论, 并就研究的热点问题及对未来的发展趋势进行展望。

1 语义加工的时间进程

由于语义加工的过程进行得十分迅速, 稍纵即逝, 如何有效锁定其内在加工过程开展研究, 这一直是语义研究领域的难题。传统对语言理解的研究大多使用的是反应时以及阅读时间记录的方法, 但这种方法所记录的指标通常反映了语义加工系统输出端的活动, 容易受无关因素的干扰, 敏感度较低。因此想要更加精细地了解语义加工的运作机制, 研究者需要使用更加敏感且实时的研究技术才能揭示语义加工中的即时而连续的心理过程。在众多方法中, 眼动追踪 (eye-tracking) 和 ERP 记录是用于确定语言认知加工真实时间进程相对较为有效的方

法。在以下部分, 我们将讨论语义加工研究中运用 ERP 技术所得到的一些重要结果, 同时也将谈到眼动结合 ERP 的研究将如何使阅读理解加工时程的研究得以推进。

1.1 经典的语义N400成分

在所有与语言加工相关的 ERP 成分中, N400 是最受关注的一个成分, 这一成分最早见于 1980 年 Kutas 和 Hillyard 一项极有影响的研究^[9], 随后已成为至少 1 000 多份研究报告的主题^[10,11]。该研究采用语义违背范式, 具体来说, 被试以每秒一词的速度逐词阅读一个句子, 大多为语义合理的正常句, 但某些句子句末的名词却换成一个不连贯的词汇而形成语义违背句, 结果发现与正常句相比, 语义违背句的关键词引发一个显著更大的负成分, 由于这一负成分从关键词呈现之后 250 ms 左右出现, 在 400 ms 左右到达峰值, 因此被命名为 N400。许多研究经已证实 N400 跟语义加工过程关系十分密切, 无论是词汇的语义提取^[10,11], 还是语义的整合^[5,12], 均主要反映在 N400 的时间窗内。例如, 在句子阅读中, 如果目标词是非词、跟语境不相符的词、存在语义和语用错误的词或者是与理解者所具有的世界性知识不一致的词, 都会产生更大的 N400 效应^[11]。同时, 虽然任务形式、单词在句子中的位置和刺激呈现的速度、被试的年龄等都或多或少地会影响到目标词 N400 的波幅, 但 N400 的变化只受到语义信息的影响, 因此当出现句法不合理, 或者词汇物理属性的变化时, 并不会影响 N400 的波幅。因此在这个基础上, Kutas 等人提出 N400 独特地反映了语义加工^[11]。

由于 N400 成分非常稳定, 且与语义加工之间存在非常密切的关系, 因此在过去的 20 余年间研究者们以 N400 成分为核心开展了大量的研究, 并基于此提出了多个重要的理论模型。但是随着研究的推进, 尤其是随着不同研究技术的研究结果的推进, 语义加工似乎可以在更早的时间窗出现, 并持续到比 N400 更晚的时间窗, 表现出一个较长时间持续的动态过程。

1.2 早期的语义提取与整合

虽然 N400 的语义效应非常稳定, 但是行为学和眼动的研究均显示, 语义信息的提取和整合在很早的时间窗就出现, 甚至在 N400 的潜伏期 250 ms 之前就出现了^[13-15]。但是在常规的 ERP 研究中, 在 N400 之前的脑电早期成分, 例如 N1 和 P2, 却

较少地发现与语义变量存在关系。Penolazzi 等人认为，这可能是由于语言研究领域材料的特性所导致^[16]。相比于 N400，早期 ERP 成分如 N1 和 P2 都属于持续时间较短的成分，因此刺激物理属性的变化会非常容易造成早成分的潜伏期和成分形态发生变化。然而在语言研究中，为了提高研究的生态效度，在同一个实验条件中，研究者会尽可能地放大刺激之间的各种物理属性，如词长（类似中文的笔划数）、词频等信息。由于这些变化的物理属性都会对早期成分造成影响，一定程度上增加了早期成分的变异度，因此可能导致研究者很难在这些成分上发现更为复杂和抽象的语义变量的影响。

近期一些研究严格控制了上述提及的各种可能影响因素，发现语义加工确实可以反映在早期的 ERP 成分上。例如，Sereno 等人观察到，在词汇判断任务中，相比于高频词，低频词会在 120 ms 左右诱发出一个更大的 N1 成分^[17]；相应地，Pulvermüller 等人研究显示，相比于功能词，实义词则会在 160 ms 左右诱发出一个更大的 N1^[18]；此外，Hinojosa 等人研究显示，与假词相比，动物词和工具词会诱发出一个更大的 P2 成分^[19]，这说明词义的提取速度极快。而在语义整合方面，Penolazzi 等人也发现预期性和词频的操纵都可以导致 N1、P2 成分的变化，且两者在这一早期时间窗内就出现交互^[16]。该研究结果似乎表明语境对目标词的预期性几乎在词汇提取的同一时间窗内产生效应。

采用眼动技术进行阅读研究的结果，也一定程度支持语义信息的提取和整合可能发生在 N400 之前的时间窗。在阅读的过程中，读者的视野区域可以根据视敏度分为三个区域：中央凹、副中央凹，以及边缘视区。虽然直接注视的中央凹视区视敏度最高，读者可以获得最有效的信息加工，但在副中央凹视区呈现的信息也可以被有效地加工^[14]。研究较为一致地发现，通过预览，读者可以获得副中央凹词汇的形态、语音、词素等较低水平的词汇信息^[20]，有趣的是，越来越多的研究甚至发现通过预览还能获得词汇的语义信息^[21-24]。近期，本研究组采用伴侧快速系列视觉呈现 (rapid serial visual paradigm, RSVP) 范式，结合眼动和 ERP 技术对这一问题进行了系统的检验。伴侧 RSVP 范式是对传统逐字或逐词阅读的 RSVP 范式的改进，在伴侧 RSVP 范式中，句子中每个字在被逐一呈现在屏幕中央的同时，该字之前和之后的一个字会被分别呈现在该字的左

边和右边副中央凹视区处。实验时要求被试保持对中央区字的注视，由于每一屏的信息呈现时间极短，被试无法通过眼跳直接注视副中央凹呈现的字，因此在确保了自然阅读状态的同时严格界定了中央凹和副中央凹区域。利用这一范式我们依然发现语境信息可以对预览词的加工产生即时影响，这说明词汇语义提取和整合可能发生在非常早的时窗，至少在 N400 之前^[25, 26]。

1.3 晚期语义整合进程

语义加工除了可以反映在早期时间窗外，最近的研究发现语义变量还可以反映在比 N400 更晚的 ERP 成分，如 P600 上。之前的研究显示，句法加工会诱发出更大的 P600 成分，因此研究者往往认为 P600 可能主要反映的是句法加工^[27]，但近些年的研究显示，纯粹语义变量也可以导致 P600 等晚期成分出现变化^[28, 29]。在句子阅读过程中，读者可以通过词汇语义（如词汇的生命性）和句法信息，激活词汇在句子中所扮演的题元角色，如动作的实施者（施事）或者动作的接受者（受事）。Kuperberg 等人发现，句子中名词词义上的生命性、动词对题元角色的限定性等会使读者对动词的题元角色产生特定的预期，如果句子的语序或句法标记所标示的题元角色与这种预期相违背，例如主宾错误反转从而导致语义违反，则在关键词上将诱发晚期正波幅的改变，由于这一晚期正波与句法的 P600 效应无论是在潜伏期还是分布上都非常相似，因此也被命名为语义 P600^[28]。值得注意的是，在同一时间窗，Van Petten 等人提出了另一个特异于语义加工的晚期前额正波，主要出现在高限制语境中低预期连贯的目标词上，如在“小明去理发店修剪……”这一句子语境中，如果目标词不符合语境预期，但却与语境意义联贯，如“胡子”时，则相比于预期词（如“头发”），非预期的合理词将在晚期时间窗诱发出一个更大的晚期前额正波。研究者在不同的语言背景下操纵语境和关键词之间的关系，都可较为稳定地观察到这一晚期前额正波^[30]。

语义加工中不同地形分布的晚期正波，可能反映了语义加工过程与不同程度长时记忆表征的相互作用^[31]。在阅读过程中，我们不仅会形成与词汇语义本身直接相关的文本表征，还会根据文本信息形成情景模型，并对后续未出现的信息产生预期，以便进行高效的言语理解，而预期的强弱会随着文本本身的语境信息而出现不同的变化。如果文本信息

提供了较为模糊的语境信息, 则读者无法根据情景模型对后续出现的文本信息产生非常精确的预期, 此时如果后续的文本信息与模糊的预期不相符, 则会引发一个经典的、分布偏后的晚期正波; 假如语言材料本身所提供的语境限制性较高, 读者可以根据语境较为精确地预期出后续出现的文本信息, 甚至预期到具体的词汇信息, 此时目标词与精确预期的违背则表现出词汇预期违背的特性, 并反映在前额分布的晚期正波上。

需要注意的是, 关于这两类不同的晚期正波实质牵涉到什么加工, 是语言特异性的语义加工, 还是领域普遍性的一般认知控制加工, 目前研究者仍有争论^[28, 29]。未来的研究和理论不仅需要澄清语义加工中 P600 和 N400 的关系, 相应地也要厘清不同地形分布的晚期正波之间的关系。

2 语义加工的大脑机制

对语言加工各成分如何相互作用进行探讨, 不仅可以从时间进程的角度, 还可以从空间定位的角度进行考察。最近, 越来越多的研究者开始利用各种先进的成像技术, 如高空间分辨率的正电子发射断层扫描 (positron emission computed tomography, PET) 和 fMRI, 以及同时兼具高时间与空间分辨率的脑磁图 (magnetoencephalography, MEG) 和事件相关光学成像 (event-related optical signals, EROS) 技术, 考察了语义加工的大脑功能定位及其动态激活过程, 同时, 也有越来越多的研究者采用多种探索不同脑区结构和功能联结的技术, 例如弥散张量成像 (diffusion tensor imaging, DTI) 和静息态脑功能联结 (resting-state connectivity) 等, 研究支撑语义加工的大脑结构和功能网络。经过多年的研究, 研究者发现跟语义加工中最为密切的大脑区域主要包括左侧颞中回 (left middle temporal gyrus, LMTG), 尤其是 LMTG 的中后部和左侧额下回 (left inferior frontal gyrus, LIFG), 而近年来也有研究发现颞叶前部 (anterior temporal lobe, ATL) 在语义加工中也扮演着重要的作用。以下将从这几个重要的大脑区域分析其与语义加工之间的关系。

2.1 LMTG和语义加工

早期关于 LMTG 跟语义加工之间关系的证据主要来自病人的研究。研究显示, LMTG 后部受到损伤可导致病人的阅读理解能力受到极大影响^[32]。例如, Dronkers 等人研究显示, LMTG 后部受损甚至

会影响病人对单个词汇的识别和理解, 这似乎表明 LMTG 后部在词汇提取和识别过程中扮演着极为重要的作用, 这一区域受损可能导致词汇提取困难, 最终导致整体阅读能力的下降^[32]。

在正常人的研究中, Lau 等人指出, 无论词汇、句子或语段层面的语义提取都会显著激活 LMTG 后部^[10]。在词汇层面的研究中, 研究者常使用语义启动范式探讨词汇语义提取的大脑功能定位。研究显示, 相比于语义相关的词对, 与启动词语义相关度低的目标词在语义提取上也较为困难, 相应地, fMRI 研究显示, 这种加工的困难更强地激活了 LMTG 后部^[10]。基于病人和正常人的研究结果, 研究者认为, LMTG 后部与词汇语义信息的提取密切相关^[10, 12]。LMTG 中后部的激活在句子层面的语义加工中也均有报道。例如在经典的语义违背范式中, 由于违背句中读者需要花费更多的资源进行目标词语义信息的提取, LMTG 中后部也可观察到显著激活^[12]。相应地, 在预期实验范式里, 相比于容易预期到的目标词, 句中不易预期到的目标词需要更多的资源用于词汇语义信息的提取, 因而同样观察到 LMTG 中后部的激活^[33]。更进一步地, 研究者发现词汇语义提取中 LMTG 后部的激活具有跨语言的稳定性。本研究组最近的研究证实, 无论是采用违背还是预期范式, 都可以稳定地观察到 LMTG 后部的激活^[34, 35]。由于不同大小的语义单元在加工时都可以观察到 LMTG 这一区域的激活, 也支持了这一区域负责一种较为基本的语义提取功能。

2.2 LIFG和语义加工

关于语言理解的大脑机制, 常常被提及的另一个脑区是 LIFG。这一区域的激活常常出现在控制性语义启动的范式^[10], 以及在使用违背范式或预期范式的句子研究中^[12], 研究者通过操纵语义联贯性或目标词在语境中的预期性来研究整合, 其基本假设是语义违背句或低预期句相比于正常句需要花费更多的资源进行整合。有趣的是, 不论采用的是何种范式^[33, 34], 研究结果均支持语义整合加工与 LIFG 有关。事实上, 本研究组通过对公开发表的 40 多篇与句子加工相关的研究进行综述, 发现 LIFG 在涉及语义整合范式的加工中出现激活的概率最高^[36], 倾向于支持 LIFG 是语义整合加工核心区域的观点^[12]。更进一步地, 本研究组的研究还发现 LIFG 前部 (BA47/45) 在语义整合加工中扮演着核心的作用^[36]。在更高层面的语段加工中, 与语段情景相违背的目

标句，即使该句单独呈现时语义是正常的，也可以引发 LIFG 稳定的激活^[37]。

值得注意的是，先前许多研究也显示，LIFG 与认知控制等一般认知加工也有密切的联系。到底 LIFG 所观察到的激活反映的是语言独特性的认知加工还是一般的认知控制过程，这仍然不清楚。Hagoort 等人认为，语义整合时由于需要将词汇信息保持在工作记忆中，因此必然也伴随着一般认知加工的参与，包括自上而下地选择合适的语义信息、抑制无关语义信息，完成信息整合进而形成一个更大的语义表征^[12]。为了证明这一假设，本研究组使用 fMRI 技术细致地探讨了 LIFG 跟语义整合加工和一般认知控制加工之间的关系^[38]。具体来说，我们通过采用经典的语义预期实验范式引发语义整合加工，此外，在实验中还让同一批被试进行经典的色词判断任务 (Stroop 任务)，以考察一般认知控制所诱导的效应。结果显示，语义整合加工不仅激活了 LIFG 前部 (BA47/45)，还激活了与一般认知加工密切相关的 LIFG 后部 (BA44)，而一般认知加工只激活了 LIFG 的后部 (BA44)。在其他几项相关的研究中，研究者同样发现，LIFG 前部 (BA47/45) 跟语义整合加工关系十分密切^[39, 40]。这些研究不仅支持了 Hagoort 等人提出的假设^[12]，说明语义整合加工不仅涉及到整合词汇语义信息，同时这个过程还牵涉到了一般认知加工，更重要的是，这些研究进一步说明 LIFG 前部 (BA47/45) 跟整合加工相关，而其前部 (BA44) 则跟整合中涉及到的一般认知加工相关。

2.3 ATL和语义加工

近年来，越来越多的研究者关注 ATL 在语义加工中的作用，研究显示 ATL 的腹侧区域可能是跟语义加工之间存在非常密切的关系^[41]。关于 ATL 与语义加工的关系，最早的研究证据来自于语义痴呆病人^[41]。这种病人的症状是对常见物体特征和概念性知识的缺失或损伤，这种语义记忆的损伤会随着 ATL 的渐进性萎缩而不断加重。但是，病人的其他认知能力，如注意和情节记忆并不受影响，显示了语义痴呆病人选择性地损伤语义认知的能力。基于这种疾病，Patterson 等人提出，双侧 ATL 可能负责对概念的特异性特征进行整合，从而对物体形成整体表征，该区域可视为语义记忆中的中枢结点^[41]。Patterson 和 Lambon Ralph 认为，概念表征的实现需要包括模态特异性脑区 (即感知觉运动皮层) 和

联合脑区的共同参与^[41, 42]，当负责中枢角色的 ATL 受损，人类就只能提取概念特异性的一些特征，如颜色、形状等，但是无法准确地提取其更加抽象的概念特征，因此表现出各种典型的语义痴呆现象。

来自其他成像技术的结果同样支持 ATL 可能在概念整合中扮演重要角色。例如，Pobric 等人采用经颅磁刺激 (transcranial magnetic stimulation, TMS) 技术干扰 ATL 腹侧区域，发现显著地影响被试在词汇命名和同义词判断等需要提取领域一般性概念表征的实验任务^[43, 44]，研究者认为 ATL 可能负责多模态 (amodal) 整合功能，即整合不同模态的特征属性，以便更好地组织我们的语义系统^[41]。此外，来自 MEG 的研究证据显示，语言信息，不论是听觉还是视觉信息，都会汇总进入 ATL 进行加工^[45]。而 DTI 的研究则显示，左前颞叶 (left anterior temporal lobe, LATL) 是语言加工腹侧通路的一个重要终端，主要负责整合各种信息，从而形成更复杂的表征^[46]。例如 Hickok 等人提出的听觉语言模型就认为，在语音加工中，ATL 负责整合音素而获得整体语音信息^[47]。

虽然早期的研究主要关注的是概念加工中语义特征的整合和表征，而在高层次的语义整合加工，如连贯语义理解中，ATL 可能同样扮演着重要的作用。在相关的研究中，研究者常将合理句中的词汇随机打乱，此时，读者可以提取每个单独的词汇语义的信息，但无法进行语义整合，因此，将合理的句子跟词序被打乱的句子相比，可对语义整合加工的机制进行检测。fMRI 的结果表明，相比于词汇被打乱的句子，合理句显著地激活 ATL^[10]。根据类似的证据，一些研究者倾向于认为语义整合加工的大脑核心区是 ATL，而不是 LIFG^[10, 48]。但值得注意的是，在许多正常人的 fMRI 研究中，ATL 与语义加工的关系并不容易稳定地被观测到。这部分是由于 fMRI 技术的局限性所导致的。尽管 fMRI 技术有高空间分辨率，但在检测 ATL 的信号方面却存在一定的问题。这是因为 ATL 处于空气、脑脊液和灰质皮层的交界处，其介质变化较大，在 fMRI 时，可能因磁场不均匀而使得该区域信号出现丢失或扭曲，因而降低了对这个区域检测的敏感性。近年来，研究者已经开始关注这个问题，例如，Visser 和 Axelrod 等人通过各种方法，如使用特殊的扫描序列 (如不同参数的优化组合以及失真校正方法) 等，努力提高这一区域的信噪比^[49, 50]。有趣

的是, 当提高 ATL 信号检测能力之后, 确实越来越多的研究证实了 ATL, 尤其是 ATL 的腹侧区域跟语义加工之间存在着密切的联系。例如, 通过采用特殊的成像序列, Visser 等人在语义加工任务和与之匹配的非语义任务对比中发现了 ATL 的腹侧区域出现显著激活, 而且其激活状况并不受输入模态(文字和图片)的影响^[51]。最近本研究组使用特殊的成像序列, 也证实 ATL 在整合加工中扮演着重要作用。在这个研究中, 我们操纵了两种语义类别, 分别是语义关系和整合关系。语义关系是指词汇之间存在着语义特征的共享, 例如: 医生-护士。而整合关系是指词汇之间并不存在语义特征的共享, 但是它们可以通过整合而形成一个更大的语义表征单元, 例如: 草莓-蛋糕。语义关系可能主要反映了词汇语义提取等认知加工, 而整合关系则主要反映了语义整合加工。fMRI 的结果显示, 两种语义关系在大脑激活上存在着明显的分离, ATL 和 LIFG 只有在整合关系中才会有更强的激活, 但语义关系中更强激活的则是与语义提取相关的 LMTG 中后部^[52]。

因此, 结合词汇概念表征, 以及句子和语段的语义理解研究, ATL 在语义加工中, 尤其在语义整合上扮演着重要的角色, 不仅是将不同的特征整合成抽象概念, 而且在将多个概念整合成更大的语义表征单元这种加工中也十分重要。

2.4 核心区域之间的网络联结和语义加工

语言理解是一个系统而复杂的过程, 其必然涉及到广泛的大脑区域^[53], 通过在这些区域的联结, 最终完成语言理解。事实上, 早期脑损伤的研究已经证明, 严重的语言障碍更多并不是来自于单个大脑区域的损伤, 而主要来自于不同大脑区域之间连接的损伤^[54]。更进一步的研究显示, 大脑重要区域之间除了功能上连接外, 结构之间的连接同样在语言加工过程中扮演着非常重要的作用^[55]。

许多技术都可用于研究大脑结构的联结, 其中, DTI 技术可以较好地对不同大脑区域之间的白质纤维走向和连接进行追踪。采用 DTI 技术, 研究者重点考察了语义加工过程中涉及到的三个重要区域(MTG, IFG 和 ATL)之间的纤维连接, 发现了背侧和腹侧两条大的纤维通路^[46, 56]。背侧通路的纤维连接包括了弓状束(arcuate fascicle, AF)以及上纵束(superior longitudinal fascicle, SLF), 主要从 S/MTG 出发, 到达 IFG。而腹侧通路则具体包括了两条通路,

其中一条是极外囊纤维系统(extreme capsule fiber system, ECFS), 连接颞叶后部到 IFG; 另一条是钩状束(uncinate fasciculus, UF), 从 ATL 出发至 IFG。虽然有研究发现背侧通路跟词汇语义提取存在一定关系^[57], 但也有研究发现可能腹侧通路在语义加工中扮演着更加重要的作用^[58]。例如 Han 等人和 Bi 等人对脑损伤病人的研究显示, 腹侧通路的损伤程度跟语义加工损伤程度存在独特的关系^[59, 60]。除了对病人的研究外, 在正常人的研究中同样发现, 腹侧通路在语言理解、语言学习中扮演着重要角色^[61, 62]。本研究组最近一项在健康被试人群的 DTI 研究显示, 虽然背侧和腹侧通路在阅读中的语义加工上都扮演着重要的作用, 但是阅读者在加工不同语义类型时, 例如语义关系和整合关系, 依赖于不同的结构纤维连接。具体来说, 整合关系的大脑激活网络主要由 UF 这一纤维系统对 ATL 和 IFG 进行连接; 而语义相关关系的大脑激活网络则主要由 AF 和 EC 进行连接, 表明语义相关和整合关系确实存在着不同的大脑结构网络^[52]。

研究大脑皮层之间的功能连接还可以通过静息态或任务态脑功能联结技术来实现。静息态脑功能联结技术可以考察不同大脑皮层自发活动之间的相关性, 进而构建不同大脑区域之间的功能网络。跟 DTI 结果类似的是, 近年来静息态功能联结技术的研究显示, 额叶和颞叶的语言相关皮层及其子区域间存在很强的功能联结^[63, 64], 并且其联结强度与语言能力有很强的相关^[65, 66], 说明各语义加工区域之间不仅存在纤维结构的联系, 其活动也具有同步性。同时, 静息态脑功能联结的强度一定程度可以解释和预测具体的语义任务。例如, Wei 等人的研究发现 LMTG 后部的静息态信号和各种具体的语义任务之间存在明显的相关, 并且以 LMTG 后部为种子点与其他重要的语言区之间功能连接可以显著预测不同语义任务的行为表现^[67]。除此之外, 任务态下的大脑功能连接也提供了有价值的信息。不少证据表明, 不同的语言任务会对大脑功能网络产生调制作用。例如, 本研究组最近一项研究显示, 在外显和内隐状态下完成句子阅读任务时, 大脑功能连接模式会产生明显变化, 反映不同语义加工形式可能涉及了不同的大脑功能网络^[39]。具体来说, 当让受试关注阅读材料中某一词汇呈现字体的大小时, 语义加工处于一种较为内隐的状态, 此时几个重要的相关区域均表现出显著的功能连接。然而当要求

受试进行外显的句子阅读任务，如判断句义合理性时，因为注意等认知控制加工的参与，相比于内隐状态，外显任务下的功能连接强度和网络全局效应都显著增强，且以 LIFG 为核心节点的功能连接增强最为显著。此外，大脑默认网络 (default mode network) 在语义和非语义任务下的表现也有所不同。默认网络是指缺少特定任务状态下的大脑活动状态，当处于特定任务状态下，这一网络会处于去激活的状态^[68]。尽管如此，Binder 等人与 Humphries 等人的研究却显示，虽然被试在完成具体的感知任务时，默认网络的确会产生去激活的效应，但在语义任务下，这一网络却仍然保持激活^[69,70]。据此，研究者推测默认网络在概念提取和整合中也起着重要作用^[71]。

3 语义加工大脑机制的重要理论

在大量多模态研究数据的基础上，研究者提出了语义加工的认知神经机制模型，以更加全面系统地总结和归纳语义加工可能牵涉的大脑机制。以下介绍几个较具影响力的模型，包括 Friederici 提出的三阶段加工模型，Hagoort 等人提出的记忆-整合-控制 (memory-unification-control, MUC) 模型，Jung-Beeman 提出的 BAIS (bilateral, activation, integration, and selection) 模型，以及 Lau 等人提出的 N400 产生源模型等。

3.1 Friederici 的三阶段加工模型^[5]

这个模型认为复杂语料 (例如句子) 的加工是分成三个阶段来完成的。第一个阶段主要依据词类信息快速建立短语层面的句法结构，反映在脑电的早期左前负波 (early left anterior negativity, ELAN) 这一成分上，其对应的大脑区域是在 ATL 上。随后，词汇语义信息以及词汇的形态学信息得到加工，反映在 N400 时间窗，对应于大脑内侧颞叶和 MTG，尤其是 LMTG 后部以及 LIFG 前部 BA47/45 区。第三阶段是语义和句法之间信息的交互，完成整合并形成最终的表征，反映在 P600 时间窗，对应的大脑加工区域是在 LIFG。这一模型主要是来自句法加工的研究，其基本核心是句法优先观，即独立的句法结构信息先建立，之后才是语义加工。但在语义加工方面，这一模型并没有细致地区分语义加工的各成分及其特点、反映的时间窗和大脑功能定位。只是强调语义加工反映在 N400 上，主要由 MTG 负责，只有在正常的语义加工受阻时，LIFG 才会参与，以促使语义加工顺利进行。

3.2 Hagoort 等人提出的 MUC 模型^[3,12]

在语义加工的大脑模型中，常被引用的是 Hagoort 提出的 MUC 模型。这一模型认为语义加工主要是由三部分组成，“记忆”成分负责储存词汇的语义信息，语义加工时首先会激活这些词汇的语义信息。其相关的大脑区域主要是在左侧颞叶的广大区域，尤其 MTG 和 STG 的区域。当信息是以听觉形式出现时，则词汇语义激活更多地反映在 LSTG 后部，而以视觉形式出现时，则词汇语义激活更多地反映在 LMTG 后部。如果加工的是一个更大的语料，例如多个多词汇的短语和句子，则激活的词汇语义信息需要送到 LIFG 进行整合，这是获得整体意义的一个关键区域。研究者强调语义整合加工主要定位在 LIFG 前部 (BA47/45) 的位置，而 LIFG 后部 (BA44) 更多地与句法信息整合有关。MUC 模型还提出，若语义加工受阻，一般认知加工则会参与，其大脑区域主要位于左侧的额中回附近，通过监控加工的参与使受阻的语义加工顺利地进行。总体上说，MUC 模型较好地地区分了词汇语义提取和语义整合，并对这两个加工过程的大脑功能区域有一个清楚的界定。但对这两个加工过程具体的时间进程及如何交互，并没有更多的说明。

3.3 Jung-Beeman 提出的 BAIS 模型^[48]

这一模型与 MUC 模型的相似之处是他们同样认为语义加工存在着三个成分，但在三个成分的表述及其对应的大脑功能区域上，BAIS 与 MUC 则是大相径庭。BAIS 模型中语义加工存在激活、整合与选择三个成分，首先是激活，即词汇的语义信息等得到激活，这一激活过程主要发生在双侧 Wernicke 区。第二个成分是整合，单独的词汇信息或者小块的语义信息，需要进行整合加工而形成更大的语义表征，Jung-Beeman 认为整合加工发生在 ATL。第三个成分则是选择，当语义加工遇到障碍时，则不仅需要抑制对语义加工造成干扰的无关信息，并且需要重新选择合适的信息以完成最终的语义理解。Jung-Beeman 认为这种选择加工并不是语言特异性的，在非语言加工中同样存在。它定位于 IFG，尤其是当任务需要进行精细选择时，IFG 的激活会增强。很显然，BAIS 同样没有对几个不同加工成分的时间进程和交互模式做出一个明确说明。

3.4 Lau 等人提出的 N400 产生源模型^[10]

Lau 等人对各种不同的 N400 效应以及它们对应的产生源做了详细分析。基于这些分析，他们提

出 N400 产生源模型。他们认为, 词汇语义提取发生在 N400 时间窗, 位于 LMTG 后部; 而提取之后的语义信息则会送到 ATL 部和角回 (angular gyrus, AG) 进行语义整合。此外, 跟 Jung-Beeman 模型相同的是, 他们也同样认为在语义加工过程中, IFG 负责一般化的认知加工, 但对 IFG 的功能, 他们做出了更加精细的界定, 认为 IFG 前部 (BA47/45) 负责策略性地提取词汇语义信息, 而其前部 (BA44) 则负责策略性抑制无关信息。这一模型跟 BAIS 模型总体上较一致, 不同之处在于对词汇语义提取相关的脑区和发生的时间预测更为精细。此外, 虽然这一模型指出语义整合加工发生在 ATL 和 AG, 但是关于整合发生于何时、如何与和语义提取的脑区交互, 模型也并未进行清楚的说明。此外, 虽然该理论同样强调一般认知加工在语义理解中的重要作用, 但这些加工出现在什么时候, 以何种方式参与到具体的语义加工过程, 依然没有得到足够的说明。

4 争议与未来研究的趋势

在过去 20 余年间, 研究者对于语义加工的大脑机制有了更全面和深入的了解, 积累了大量研究证据, 也提出了一些重要的理论模型。然而这一领域也依然存在着一些争议, 甚至有些争议到了针锋相对, 难以调和的状况。以下将对较为核心的一些争议进行介绍, 进而探讨未来研究的趋势和可能的热点问题。

4.1 颞叶与额叶在语义整合中的作用

研究者普遍同意, 要实现语义的理解, 理论上必须有一个过程将不同水平的语义单元, 如概念、短语进行统合, 以构建语言材料所传递的完整意义, 这一整合过程发生的神经机制一直是研究者十分关心的问题, 围绕其产生的争议也十分激烈。经典的 MUC 模型主要强调将 LIFG 视为一个核心的整合区, 认为词汇语义提取和语义整合分别在 LMTG 和 LIFG 两个不同的大脑区域。的确, 涉及到语义整合的脑成像研究绝大部分均报告 LIFG 的激活, 本研究组利用 fMRI 技术还进一步分离了 LIFG 的不同亚区, 其中, LIFG 前部 (BA47/45) 跟整合加工最为密切相关, 后部 (BA44) 跟一般认知加工关系密切^[38, 40]。除此以外, 由于许多研究也发现 ATL 在概念表征中扮演着核心地位, 负责整合概念中的各种特征属性, 以及将不同的概念信息进行整合成一个更大的语义表征, 因此, 一些研究者认为语义

的整合也需要这一区域的参与^[10]。由于 LIFG 和 ATL 都跟整合加工有关, 他们是不是反映了相同性质的整合就成为一个重要问题。

对这一问题, 本研究组对比了发现 ATL 激活的文献与发现 LIFG 激活的文献, 发现从所加工的语义特征来看, 当使用语义合理句与随机排列的词串、或者对比正常句与休息状态时往往都会发现 ATL 的激活; 而当使用语义违背句与正常句进行比较时则主要发现的是 LIFG 的激活^[36]。因此 ATL 也许与合理句的整合加工相关, 而 LIFG 的激活可能主要与语义不合理句所引发的语义整合加工相关。相应地, 从加工进程上看, ATL 和 LIFG 的激活也存在着一定的分离。最近, 本研究组采用高时间和空间分辨率的 EROS, 并采用经典的预期实验范式研究了句子理解中的语义加工过程, 研究结果显示 LIFG 前部 (BA47/45) 和 ATL 的激活表现出不同的进程^[40]。当加工更难进行语义整合的非预期条件时, 相比于预期条件, LIFG 前部 (BA47/45) 出现更强的激活, 且激活发生在 N400 时间窗。而 ATL 的激活模式则相反, 在更容易进行语义整合的预期条件下, 其激活要比非预期条件下的更强。有趣的是, 这个激活发生得很早, 在 N400 之前的 200~300 ms 时间窗中。这种加工性质和加工时间进程的差异似乎表明, LIFG 前部和 ATL 虽然可能都与整合加工有关, 但它们所参与的整合加工可能类型有所不同: 当语境信息和目标词之间语义关系合理, 读者可以通过 ATL 快速地完成语义整合, 从而建立起连贯的语义表征。而当这种语义合理性降低, 则读者需要花费更多时间来建立可能的连贯表征, 此时则需要 LIFG 前部的参与。

因此, 我们认为, 未来的研究对整合加工的定义需要进行更加全面和细致的分析, 例如, 研究者要更仔细地界定研究整合的设计强调的是整合的努力程度还是信息整合的结果。此外, 通过整合形成的表征是否稳固也可能是一个重要的变项。近期脑成像研究中多变量激活模式分析技术的使用, 为这一领域的推进提供了一些新的视角。以往研究主要采用的是比较不同条件间激活强度大小的单变量分析方法, 可能会使我们忽略激活模式的差异及其所蕴含的效应。研究者可以通过多元模式分析 (multivariate pattern analysis, MVPA) 和表征相似性分析 (representational similarity analysis, RSA) 技术, 考察和比较信息整合的结果和被整合概念之间神经表征

的异同，从而探讨整合加工的本质。总体上，未来的研究应该采用更加精细的实验设计，进一步分离不同的语义整合加工类型；还要采用更多样的分析方法，更全面地考察不同语义整合加工类型可能涉及的神经通路的差异，这将有助于我们更全面和精细地理解语义整合的本质及相关的大脑机制。

4.2 语言加工大脑功能的协同与交互

虽然在现有研究中，研究者发现了与语义加工相关的多个重要脑区，如 MTG, IFG 和 ATL 等，但是对这些区域的具体功能还存在较大争议。这一方面可能是因为不同研究者采用的研究范式不同导致研究结果不一致，但更为重要的原因可能是研究者过于孤立地关注一个或者局部脑区的功能。正如前文所提到的，语义加工的大脑网络会随语义加工的状态、任务而出现明显的变化，因此从整体的角度重新看待各脑区的功能，以及某一区域作为网络的结点如何与其他重要的脑区交互，这或许是一个更加重要的研究视角。

目前的确在语义加工的大脑网络方面取得了一定进展，但研究的数量相对较少，基本停留在探讨特定大脑网络与特定语义加工是否存在相关关系上，但是这些区域自身之间具有何种关系，类似问题研究者依然了解尚浅。同样，近年来所发展的一些新方法、新技术，或许可以对相关的研究有所推进。其中，动态因果建模技术^[72]由于可以揭示不同脑区的互动关系，越来越受研究者关注。这种分析方法主要由三部分组成。首先，需要揭示大脑兴趣区在静息状态下的初始连接状态；其次，通过具体的实验刺激和实验任务，观测兴趣区之间大脑连接的变化；最后，确定刺激输入的初始脑区。确定好这些参数后，借助贝叶斯模型选择的方法，可以推断出不同脑区间的互动。这一技术已经在语言研究中得到了应用，并且发现不同语言操作下脑区间的交互通路是不同的，而且存在正馈与反馈等不同方式^[73, 74]。大脑区域在不同刺激和状态下的互动关系十分适用于描述像语义加工这种复杂的认知加工，后续的研究可以系统地操纵不同的实验材料、实验任务等，通过观察大脑网络的互动关系的变化，从联结机制的角度为了解语义加工的实质提供重要的证据。

对语义加工的认识，从语言认知系统内部各成分的相互关系来进行考虑固然十分重要，但通过分辨语义加工和其他非语言加工，尤其是与一般认知

加工之间的动态关系，对我们理解语言加工的实质有着十分重要的价值。许多研究者都认为，在语义加工的过程中必然涉及到一般认知加工的卷入，在使用违背等研究范式时，这种卷入尤其明显。事实上，在违背范式研究中经常发现的经典区域 LIFG，同时也是一般认知加工中的控制性选择和抑制等功能的核心区域。未来的研究需要考虑如何通过严谨的设计对语义加工和一般认知加工进行有效的分离，这也是探索两者相互作用的重要基础。过去几年，本研究组的工作已经表明，和语义加工关系密切的 LIFG 可能存在不同的亚区，其中前部 (BA47/45) 负责语义整合加工，而后部 (BA44) 与一般认知控制关系更为密切^[38, 40]。未来对两者的关系还需要更多深入的研究，而这一问题的解决对于人类认知系统的实质是模块化还是交互作用等基本理论问题具有重要的启示作用。

总体上，未来对语义加工的大脑功能的研究，需要遵循大脑功能协同交互的方法论原则，一方面要从语义加工和其他一般认知加工之间整体关系的分析角度，另外一方面要从大脑整个网络分析（包括结构和功能网络）的角度，考察语义加工关键节点的功能及其相互关系，才能对其有更全面的认识。

4.3 不同成像技术的局限和多模态技术的辐合

虽然以往的研究对语义加工的时间进程和脑功能定位都均有涉及，但在上述两方面研究者仍多有争议，很多争议事实上也与不同技术的使用关系密切。例如，在时间进程方面，传统语义加工的研究主要关注 N400 成分而非早期的 ERP 成分，可能是因为早期成分易受材料物理属性影响，因而难以检测对应的语义特性^[16]。由于大多数语义操纵都会诱发 N400 效应，因此不同的研究者对于 N400 所对应的语义加工机制也有很多不同的观点。例如，一些研究者认为 N400 反映的主要是词汇语义提取^[75]；另一些观点则认为 N400 反映语义整合^[76]，还有一些研究者认为 N400 反映的并不是语义加工，而是一般认知加工，如认知控制中的抑制加工^[77]。最近，使用高时间和空间分辨率的 EROS 技术，本研究组发现，不同的语义操纵在 N400 时间窗涉及到了极为不同的大脑激活模式^[40]。因此后续的研究也许应该同时关注早成分、N400、晚成分，以及三者之间的关系，才能更加准确地了解语义加工的时间进程。

在空间定位方面，目前主流研究采用的脑成像技术本身也有一定的局限，需要引起研究者的关注。

例如 fMRI 时间分辨率较低, 对于 ATL 等语言加工关键区域信号检测不足, 一定程度上会影响 ATL 功能的检测, 导致理论建构过程中出现较大偏差。很显然, 多种脑成像技术的辅合使用, 包括多技术同步采集技术的使用, 以及新成像序列和数据分析方法的引入, 都可帮助我们更好地理解语言加工的关键脑区及脑区间的关系。这一方面也有很多研究的先例, 如在阅读理解方面, 尝试同步记录 ERP 与眼动数据, 以在预视状态下更详尽地考察各水平语义加工如何在早期时间窗中交互。而采用 EROS 和 ERP、ERP、fMRI 等技术同步采集的方法, 可以更全面地展示语义加工脑网络动态激活的全貌, 这对于先前研究结果的统合、建立普适性的语义加工模型都至关重要。

此外, 大脑区域以及脑网络的活动改变是否真的影响了语义加工? 这种因果关系的探询也越来越受研究者的关注。虽然前文所提及的 ERP、fMRI 等技术可以观测大脑的活动变化, 但基于这些技术所得到的结果仅适用于推论大脑与认知加工之间的相关关系而非因果关系。近年来, 随着 TMS、经颅电刺激 (transcranial direct current stimulation, TDCS) 等技术的发展, 揭示大脑活动与认知加工之间的因果关系也成为可能。TMS 通过脉冲磁场在大脑皮层引发电流回路, 进而暂时和无损地干扰局部大脑皮层的活动, 研究者因而有机会清楚地观测到大脑相关区域活动的增强和抑制对认知活动的直接影响^[78]。Pobric 等人采用重复经颅磁刺激 (repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS) 干扰 ATL 腹侧区域, 结果发现被试在命名任务和同义词匹配任务中都受到了影响, 一定程度上说明 ATL 腹侧区域在概念表征的整合中起到重要作用^[43, 44]。此外, Whitney 等人采用 rTMS 干扰 LIFG 和 LMTG 后部, 发现其在需要更多控制性语义的任务中受到了显著的影响, 据此认为 LIFG 以及 LMTG 后部可能是控制性语义加工的网络的重要节点^[79]。本研究组最近的一项研究也显示^[80], 如果利用 TMS 干扰 LMTG 中后部, 则语义启动效应会受到影响, 这种影响主要发生在启动词与目标词间隔时间较短的情况下, 而当两者间隔时间较长, 则刺激 LMTG 中后部并不会影响启动效应的产生。由于 LMTG 中后部通常被认为和词汇语义提取有关, 这一结果进一步表明, 其参与的更有可能是早期自动化的词汇提取过程。总的来说, 未来的研究应着重考虑多技术的辐

合, 不同的研究技术取长补短, 同时结合研究者感兴趣的问题选择适当的技术组合, 将能从不同的维度提供辐合性的、全方位、立体的证据, 以更全面地了解语义加工及其相关的大脑网络。

5 结语

语言理解是人类的高级认知功能, 也是人类区别于动物的核心功能之一。对于语言加工过程的探索, 不仅可以揭示人类高级心理功能的运作机制, 同时也可以理解人类最独特的心智功能, 为揭示人类文明的演化提供重要的视角^[81]。在本综述中, 我们系统回顾了过去 20 余年间, 认知神经科学技术的使用如何对语言理解中的核心过程——语义加工的时空进程提供了重要的研究证据, 介绍了在这些研究基础上所建构的重要理论。虽然目前的研究工作还未能对语义加工的复杂进程及神经机制达成共识, 研究者甚至在某些关键问题上存在较大的分歧, 但随着研究者对核心问题的把握越来越精准, 随着认知神经科学技术的进步, 以及数据分析方法的推进, 未来对复杂的语言理解加工将会有更加深刻而全面的认识。

参考文献

- Hagoort P. Should psychology ignore the language of the brain? *Curr Dir Psychol Sci* 2008; 17(2): 96–101.
- Levelt WJ. Accessing words in speech production: stages, processes and representations. *Cognition* 1992; 42(1): 1–22.
- Hagoort P. On Broca, brain, and binding: a new framework. *Trends Cogn Sci* 2005; 9(9): 416–423.
- Fodor JA. *The Modularity of Mind: An Essay on Faculty Psychology*. Cambridge, MA, MIT Press, 1983.
- Friederici AD. Towards a neural basis of auditory sentence processing. *Trends Cogn Sci* 2002; 6(2): 78–84.
- Gerrans P. Modularity reconsidered. *Lang Commun* 2002; 22(3): 259–268.
- Snedeker J, Trueswell JC. The developing constraints on parsing decisions: The role of lexical-BAISes and referential scenes in child and adult sentence processing. *Cogn Psychol* 2004; 49(3): 238–299.
- MacDonald MC, Seidenberg MS. Constraint satisfaction accounts of lexical and sentence comprehension. In: Traxler MJ, Gernsbacher MA (Eds). *Handbook of Psycholinguistics*, 2nd Edition. London: Elsevier Inc., 2006, 581–611.
- Kutas M, Hillyard SA. Reading senseless sentences: brain potentials reflect semantic incongruity. *Science* 1980; 207: 203–205.

- 10 Lau EF, Phillips C, Poeppel D. A cortical network for semantics: (de)constructing the N400. *Nat Rev Neurosci* 2008; 9(12): 920–933.
- 11 Kutas M, Federmeier KD. Thirty years and counting: finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP). *Annu Rev Psychol* 2011; 62(1): 621–647.
- 12 Hagoort P, Baggio G, Willems RM. Semantic Unification. In: Gazzaniga MS (ed). *The Cognitive Neurosciences*. 4th ed. MIT press, 2009, 819–836.
- 13 Marslen-Wilson W, Tyler LK. Processing structure of sentence perception. *Nature* 1975; 257(5529): 784–786.
- 14 Rayner K. Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychol Bull* 1998; 124(3): 372–422.
- 15 Sereno S, Rayner K. Measuring word recognition in reading: eye movements and event-related potentials. *Trends Cogn Sci* 2003; 7(11): 489–493.
- 16 Penolazzi B, Hauk O, Pulvermüller F. Early semantic context integration and lexical access as revealed by event-related brain potentials. *Biol Psychol* 2007; 74(3): 374–388.
- 17 Sereno SC, Rayner K, Posner MI. Establishing a time-line of word recognition: evidence from eye movements and event-related potentials. *Neuroreport* 1998; 9(10): 2195–2200.
- 18 Pulvermüller F, Lutzenberger W, Birbaumer N. Electrocortical distinction of vocabulary types. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1995; 94(5): 357–370.
- 19 Hinojosa JA, Martín-Loeches M, Muñoz F, Casado P, Fernández-Frías C, Pozo MA. Electrophysiological evidence of a semantic system commonly accessed by animals and tools categories. *Cogn Brain Res* 2001; 12(2): 321–328.
- 20 Schotter E, Angele B, Rayner K. Parafoveal processing in reading. *Atten Percept Psychophys* 2012; 74(1): 5–35.
- 21 Hohenstein S, Kliegl R. Semantic preview benefit during reading. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn* 2014; 40(1): 166–190.
- 22 Yan M, Richter EM, Shu H, Kliegl R. Readers of Chinese extract semantic information from parafoveal words. *Psychon Bull Rev* 2009; 16(3): 561–566.
- 23 Yang J, Wang S, Tong X, Rayner K. Semantic and plausibility effects on preview benefit during eye fixations in Chinese reading. *Read Writ* 2012; 25(5): 1031–1052.
- 24 Barber HA, Mej M, Kutas M. An electrophysiological analysis of contextual and temporal constraints on parafoveal word processing. *Psychophysiology* 2013; 50(1): 48–59.
- 25 Zhang WJ (张文嘉), Li N, Guan SW, Wang SP. Extraction of semantic information from parafoveal words in the reading of Chinese: An ERPs study. *Acta Psychol Sin (心理学报)* 2014; 46(9): 1261–1270 (in Chinese with English abstract).
- 26 Li N, Niefind F, Wang S, Sommer W, Dimigen O. Parafoveal processing in reading Chinese sentences: Evidence from event-related brain potentials. *Psychophysiology* 2015; 52(10): 1361–174.
- 27 Osterhout L, Holcomb PJ. Event-related brain potentials elicited by syntactic anomaly. *J Mem Lang* 1992; 31: 785–806.
- 28 Kuperberg GR. Neural mechanisms of language comprehension: challenges to syntax. *Brain Res* 2007; 1146: 23–49.
- 29 Bornkessel-Schlesewsky I, Schlesewsky M. An alternative perspective on “semantic P600” effects in language comprehension. *Brain Res Rev* 2008; 59(1): 55–73.
- 30 Van Petten C, Luka BJ. Prediction during language comprehension: Benefits, costs, and ERP components. *Int J Psychophysiol* 2012; 83(2): 176–190.
- 31 Kuperberg G. The proactive comprehender what event-related potentials tell us about the dynamics of reading comprehension. In: Miller B, Cutting L, McCardle P (Eds). *Unraveling the Behavioral, Neurobiological, and Genetic Components of Reading Comprehension*. Baltimore: Paul Brookes Publishing, 2013.
- 32 Dronkers NF, Wilkins DP, Van Valin RD, Redfern BB, Jaeger JJ. Lesion analysis of the brain areas involved in language comprehension. *Cognition* 2004; 92(1–2): 145–177.
- 33 Baumgaertner A, Weiller C, Büchel C. Event-related fMRI reveals cortical sites involved in contextual sentence integration. *NeuroImage* 2002; 16(3): 736–745.
- 34 Huang J, Zhu Z, Zhang JX, Wu M, Chen HC, Wang S. The role of left inferior frontal gyrus in explicit and implicit semantic processing. *Brain Res* 2012; 1440: 56–64.
- 35 Zhu Z, Hagoort P, Zhang JX, Feng G, Chen HC, Bastiaansen M, Wang S. The anterior left inferior frontal gyrus contributes to semantic unification. *NeuroImage* 2012; 60(4): 2230–2237.
- 36 Zhu Z (朱祖德), Wang S, Feng G, Liu Y. Left inferior frontal gyrus and semantic unification in sentence comprehension. *Adv Psychol Sci (心理科学进展)* 2011; 19(8): 1147–1157 (in Chinese with English abstract).
- 37 Van Berkum JJA. Understanding sentences in context: what brain waves can tell us. *Curr Dir Psychol Sci* 2008; 17(6): 376–380.
- 38 Zhu Z, Feng G, Zhang JX, Li G, Li H, Wang S. The role of the left prefrontal cortex in sentence-level semantic integration. *NeuroImage* 2013; 76: 325–331.
- 39 Zhu Z, Fan Y, Feng G, Huang R, Wang S. Large scale brain functional networks support sentence comprehension: evidence from both explicit and implicit language tasks. *PLoS One* 2013; 8(11) 8(11): e80214.
- 40 Huang J, Wang S, Jia S, Mo D, Chen HC. Cortical dynamics

- of semantic processing during sentence comprehension_evidence from event-related optical signals. *PLoS One* 2013; 8(8): e70671.
- 41 Patterson K, Nestor PJ, Rogers TT. Where do you know what you know? The representation of semantic knowledge in the human brain. *Nat Rev Neurosci* 2007; 8(12): 976–987.
- 42 Lambon Ralph MA. Neurocognitive insights on conceptual knowledge and its breakdown. *Proc R Soc Lond B Biol Sci* 2014; 369(1634): 1–11.
- 43 Pobric G, Jefferies E, Ralph MA. Anterior temporal lobes mediate semantic representation: mimicking semantic dementia by using rTMS in normal participants. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2007; 104(50): 20137–20141.
- 44 Pobric G, Jefferies E, Ralph MA. Category-specific versus category-general semantic impairment induced by transcranial magnetic stimulation. *Curr Biol* 2010; 20(10): 964–968.
- 45 Marinkovic K, Dhond RP, Dale AM, Glessner M, Carr V, Halgren E. Spatiotemporal dynamics of modality-specific and supramodal word processing. *Neuron* 2003; 38(3): 487–497.
- 46 Catani M, Mesulam M. The arcuate fasciculus and the disconnection theme in language and aphasia: History and current state. *Cortex* 2008; 44(8): 953–961.
- 47 Hickok G, Poeppel D. The cortical organization of speech processing. *Nat Rev Neurosci* 2007; 8: 393–402.
- 48 Jung-Beeman M. Bilateral brain processes for comprehending natural language. *Trends Cogn Sci* 2005; 9(11): 512–518.
- 49 Visser M, Jefferies E, Lambon Ralph MA. Semantic processing in the anterior temporal lobes: a meta-analysis of the functional neuroimaging literature. *J Cogn Neurosci* 2010; 22(6): 1083–1094.
- 50 Axelrod V, Yovel G. The challenge of localizing the anterior temporal face area: A possible solution. *NeuroImage* 2013; 81: 371–380.
- 51 Visser M, Jefferies E, Embleton KV, Lambon Ralph MA. Both the middle temporal gyrus and the ventral anterior temporal area are crucial for multimodal semantic processing: distortion-corrected fMRI evidence for a double gradient of information convergence in the temporal lobes. *J Cogn Neurosci* 2012; 24(8): 1766–1778.
- 52 Feng G, Chen Q, Zhu Z, Wang S. Separate brain circuits support integrative and semantic priming in the human language system. *Cereb Cortex* 2015; 26(7): 3169–3182.
- 53 Vigneau M, Beaucousin V, Hervé PY, Duffau H, Crivello F, Houdé O, Tzourio-Mazoyer N. Meta-analyzing left hemisphere language areas: Phonology, semantics, and sentence processing. *NeuroImage* 2006; 30(4): 1414–1432.
- 54 Lichtheim L. On aphasia. *Brain* 1885; 7: 433–484.
- 55 Friederici AD. Pathways to language: fiber tracts in the human brain. *Trends Cogn Sci* 2009; 13(4): 175–181.
- 56 Catani M, Jones DK. Perisylvian language networks of the human brain. *Ann Neurol* 2004; 57: 8–16.
- 57 Glasser MF, Rilling JK. DTI tractography of the human brain's language pathways. *Cereb Cortex* 2008; 18(11): 2471–2482.
- 58 Friederici AD, Gierhan SM. The language network. *Curr Opin Neurobiol* 2013; 23(2): 250–254.
- 59 Han Z, Ma Y, Gong G, He Y, Caramazza A, Bi Y. White matter structural connectivity underlying semantic processing: evidence from brain damaged patients. *Brain* 2013; 136(10): 2952–2965.
- 60 Bi Y, Han Z, Zhong S, Ma Y, Gong G, Huang R, Caramazza A. The white matter structural network underlying human tool use and tool understanding. *J Neurosci* 2015; 35(17): 6822–6835.
- 61 Saur DI, Kreher BW, Schnell S, Kümmerer D, Kellmeyer P, Vry MS, Umarova R, Musso M, Glauche V, Abel S, Huber W, Rijntjes M, Hennig J, Weiller C. Ventral and dorsal pathways for language. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2008; 105(46): 18035–18040 .
- 62 Wong FC, Chandrasekaran B, Garibaldi K, Wong P. White matter anisotropy in the ventral language pathway predicts sound-to-word learning success. *J Neurosci* 2011; 31: 8780–8785.
- 63 Hampson M, Peterson BS, Skudlarski P, Gatenby JC, Gore JC. Detection of functional connectivity using temporal correlations in MR images. *Hum Brain Mapp* 2002; 15(4): 247–262.
- 64 Xiang HD, Fonteijn HM, Norris DG, Hagoort P. Topographical functional connectivity pattern in the perisylvian language networks. *Cereb Cortex* 2010; 20(3): 549–560.
- 65 Koyama MS, Adriana DM, Xi-Nian Z, Clare K, Maarten M, Jutagir DR, Milham MP. Resting-state functional connectivity indexes reading competence in children and adults. *J Neurosci* 2011; 31(23): 8617–8624.
- 66 Koyama MS, Kelly C, Shehzad Z, Penesetti D, Castellanos FX, Milham MP. Reading networks at rest. *Cereb Cortex* 2010; 20(11): 2549–2559.
- 67 Wei T, Liang X, He Y, Zang Y, Han Z, Caramazza A, Bi Y. Predicting conceptual processing capacity from spontaneous neuronal activity of the left middle temporal gyrus. *J Neurosci* 2012; 32(2): 481–489.
- 68 Gusnard DA, Raichle ME. Searching for a baseline: functional imaging and the resting human brain. *Nat Rev Neurosci* 2001; 2(10): 685–694.
- 69 Binder JR, Medler DA, Desai R, Conant LL, Liebenthal E. Some neurophysiological constraints on models of word

- naming. *Neuroimage* 2005; 27: 677–693.
- 70 Humphries C, Binder JR, Medler DA, Liebenthal E. Time course of semantic processes during sentence comprehension: an fMRI study. *Neuroimage* 2007; 36: 924–932.
- 71 Binder JR, Desai RH. The neurobiology of semantic memory. *Trends Cogn Sci* 2011; 15(11): 527–536.
- 72 Friston KJ, Harrison L, Penny W. Dynamic causal modeling. *NeuroImage* 2003; 19(4): 1273–1302.
- 73 Mechelli A, Crinion JT, Long S, Friston KJ, Ralph MA, Patterson, Price CJ. Dissociating reading processes on the basis of neuronal interactions. *J Cogn Neurosci* 2005; 17(11): 1753–1765.
- 74 Nakamura K, Kouider S, Makuuchi M, Kuroki C, Hanajima R, Ugawa Y, Ogawa, S. Neural control of cross-language asymmetry in the bilingual brain. *Cereb Cortex* 2010; 20(9): 2244–2251.
- 75 Kutas M, Federmeier KD. Electrophysiology reveals semantic memory use in language comprehension. *Trends Cogn Sci* 2000; 4(12): 463–470.
- 76 Brown C, Hagoort P. The processing nature of the N400: evidence from masked priming. *J Cogn Neurosci* 1993; 5(1): 34–44.
- 77 Debrulle JB. The N400 potential could index a semantic inhibition. *Brain Res Rev* 2007; 56(2): 472–477.
- 78 Walsh V, Cowey A. Transcranial magnetic stimulation and cognitive neuroscience. *Nat Rev Neurosci* 2000; 1: 73–79.
- 79 Whitney C, Kirk M, O’sullivan J, Lambon Ralph MA, Jefferies E. The neural organization of semantic control: TMS evidence for a distributed network in left inferior frontal and posterior middle temporal gyrus. *Cereb Cortex* 2010; 21(5): 1066–1075.
- 80 Zhu Z, Gold BT, Chang CF, Wang S, Juan CH. Left middle temporal and inferior frontal regions contribute to speed of lexical decision: A TMS study. *Brain Cogn* 2015; 93: 11–17.
- 81 Chen HZ (陈焯之). Cognitive research of Chinese reading. In: Pan DL, Shu H, Chen HC (Eds). *Cognitive Research in Chinese*. Jinan: Shandong Educational Press, 1997, 159–194 (in Chinese).