

顶中区 N200: 一个中文视觉词汇识别特有的脑电反应

张学新^{①②}, 方卓^②, 杜英春^③, 孔令跃^④, 张钦^⑤, 邢强^⑥

① 香港中文大学心理学系, 香港;

② 汕头大学医学院, 汕头 515041;

③ 中国科学院心理研究所行为科学重点实验室, 北京 100101;

④ 北京大学对外汉语教育学院, 北京 100871;

⑤ 首都师范大学心理学系, 北京 100048;

⑥ 广州大学心理学系, 广州 510006

E-mail: jxzhang@cuhk.edu.hk

2011-08-08 收稿, 2011-12-06 接受

国家自然科学基金(30670702)和香港中文大学 Direct Grant (2020940)资助

摘要 除中文外, 世界上现今使用的几乎所有文字均为拼音字母文字(如英文), 其词汇识别涉及分辨几十个字母或语音单位的一维线性组合. 中文词汇包含数量众多的方块汉字, 需要在部件、单字和多字层次上抽取复杂的形状和空间信息. 两类文字视觉形态上的巨大差异, 是否对应不同的大脑加工过程? 对于这个心理学和脑科学的重大问题, 过去 30 多年的实验研究并没有得出明确的结论. 采用脑电技术和视觉词汇判断任务, 让以汉语为母语的被试区分真词和假词, 结果显示, 中文双字词在其呈现后约 200 ms 诱发了一个负走向的、以脑顶部和中央区域为中心、分布广泛的脑电反应, 称为顶中区 N200. 此外, 词汇重复呈现时, 该 N200 出现一个罕见的、大幅度的增强效应. 类似的效应在英文等字母文字的识别中并不存在, 提示顶中区 N200 是一个中文特有的脑电反应. 进一步的实验表明, 该 N200 不反映感知觉加工, 也不反映语音、语义加工, 而反映词形加工, 提示中文词汇在其识别过程的早期就完成了对个体词形的视觉分析, 涉及相当广泛、高级的视觉加工脑区. 作者最近提出的汉字拼音理论, 把汉字同拼音文字并置为成熟的人类文字仅有的 2 个逻辑类型, 指出相对于拼音文字, 汉字是更为彻底的视觉文字, 其脑机制应该更重视觉加工. 拼音理论与顶中区 N200 的发现相互支持, 从理论和实验 2 个方面揭示了中文的独特性, 强有力地论证了它与拼音文字的本质区别.

关键词

N200
汉字
词汇识别
正字法
拼音理论
拼音文字

语言在人类高级智力活动中占据中心地位, 而词汇又是语言的基础. 对词汇识别的认知和脑神经机制的深入理解, 有可能为研究人脑信息加工的基本原理带来突破. 阅读是现代社会高度强调和着力培养的一项核心认知技能. 对书面词汇识别的认知和脑神经机制的透彻认识, 必将对阅读教育产生深远的影响. 与世界现今使用的数千种拼音字母文字截然不同, 中文是唯一的自源性古典文字的直接后裔, 至今仍保持其数千年前已高度成熟、非字母化的方块字结构^[1]. 中文的存在, 为语言研究提供了一个

珍贵的样本. 中文和拼音文字的对比研究, 有助于揭示人类语言的普遍性本质.

中文的一些特点, 如作为其基本单位的汉字具有二维图形结构, 是否导致独特的心理加工过程? 人们很早就开始关注这个问题, 并根据一些心理学的实证研究提出, 较之拼音文字, 汉字加工更多地涉及右脑^[2,3]. 此后基于脑损伤病人的神经心理学研究也引发了类似的观点^[4]. 自 20 世纪 80 年代起, 中国大陆、台湾、香港以及海外的学者对中文加工开展了大量的心理学研究, 研究手段上从单纯的行为学方

英文版见: Zhang X X, Fang Z, Du Y C, et al. The centro-parietal N200: An event-related potential component specific to Chinese visual word recognition. Chin Sci Bull, 2012, 57, doi: 10.1007/s11434-011-4932-y

法逐渐扩展到最前沿的认知神经科学技术,如事件相关电位(脑电)和功能核磁共振^[5-7]。这些新技术能更为直接地记录认知过程中的脑神经活动,超越了依赖行为指标间接推测大脑活动的局限性^[8]。语言学界也开始注重使用神经科学技术去解决传统语言学中的问题^[9]。然而30多年的探索,包括近年来的认知神经科学研究,并没有揭示出公认、可靠的中英文词汇加工脑机制上的区别^[10-14]。个别研究中观察到的跨语言的脑活动差异,重复验证性不强,是否反映中文词汇加工的独特性也不明确。

假设中文词汇的确存在其特有的加工机制,有些原因可能妨碍了发现这样的机制。过去半个多世纪的心理语言学主要以英文为研究对象,其中的视觉词汇识别研究也集中在英文的单纯词上^[15]。中文词汇识别研究跟随这个传统,也主要以单字词为主^[16-18]。然而,中文词汇中更有代表意义的却不是单字词。按照新近的一个中文语料研究(www.chineseldc.org),单字词仅占总词汇的2.8%,而双字词和三字词分别占63.9%和17.5%,所以理论上多字词是中文词汇的一个核心特色,应该得到更多关注。但事实上文献中对多字词研究相对较少,而且以行为方法研究为主^[19],使用神经科学技术研究的不多。此外,语言加工,特别是词汇识别,涉及很多非常迅速的处理过程,通常数百毫秒即已完成。当前认知神经科学中占主导地位、最受关注的功能核磁共振技术,其时间分辨率以秒计算,很难分辨复杂识别过程中的不同阶段。脑电具有毫秒量级的分辨率,能够显示词汇识别的时间进程^[20,21],但由于其空间分辨率上的缺陷,在中文研究中没有得到足够重视,相关工作比较零散,缺乏基本数据的积累。

最近几年,我们使用脑电技术系统性地研究中文双字词的识别,观察到了一个新的脑电成分^[22,23],有可能是一个反映中文与拼音文字不同加工机制的脑神经指标。本文将报告6个实验,描述该成分的基本特性并初步确定其对应的认知加工过程。所有实验都采用语言研究中常用的视觉词汇判断任务,让以汉语为母语的被试区分双字真词和假词。

1 实验1:中文双字词识别的早期脑电活动

1.1 研究方法

16名(8男/8女)健康大学生自愿参加了本实验,

均为右利手,年龄在21~28岁之间(平均24.2岁),母语均为汉语,视力或矫正视力正常。被试实验前均阅读并签署由香港中文大学科学研究与伦理审查委员会批准的知情同意书。

被试坐在电磁屏蔽隔音室内的沙发上,面对计算机屏幕,视距约70 cm,左、右手食指分别放在电脑键盘的F和J键上。要求双眼注视屏幕中央的注视点,在刺激呈现和做反应时,尽量避免头部运动,少眨眼。双字词汇共计192个,一半真词,一半假词。假词是把真词的首字、尾字重新组合而成,如“技究”,不构成真词,也不跟任何真词同音,其物理属性跟真词完全匹配。每个被试经练习后完成3组正式测试,各组间有短暂休息。

每组总计64个刺激,包括16个高频词(平均词频765,平均笔画数13.9),16个低频词(平均词频21,平均笔画数17.6)和32个假词,各种刺激类型随机混合排列。词频根据《现代汉语词频词典》^[24]计算,单位为每百万次的出现次数。每个词出现在屏幕中心,视角约为 $4.3^\circ \times 2.3^\circ$,持续时间为400 ms,其前有一个500 ms的中央注视点。被试应尽可能迅速而准确地判断刺激是否为真实的中文词,如果是,按一个键,如果不是,按另一个键。左右按键被试间平衡。从词汇刺激呈现算起的1900 ms为有效反应窗口。被试按键后,程序随机等待600~800 ms,开始呈现下个词之前的注视点。

采用Neuroscan公司(美国)64导脑电设备,利用Ag/AgCl电极帽记录脑电。电极按照扩展的10-20系统放置,带通滤波范围为0.1~70 Hz,采样频率为500 Hz。所有电极与头皮接触电阻小于5 k Ω 。记录竖直眼电的电极位于左眼下方和左眉骨上方。记录水平眼电的电极位于两眼外侧。以鼻尖为物理参考,连续记录原始脑电,离线使用双侧乳突信号平均值做再参考。取样从词汇刺激出现前100 ms开始,持续到刺激出现后900 ms。分析采用Scan 4.3软件(<http://www.neuroscan.com>)。以-100~0 ms的电压均值为准,做基线校正。离线滤波选用带通滤波(0.1~30 Hz)。眼动校正中,最小sweep数设定为20,眨眼时间长度为400,阈限为10%。叠加平均中排除错误反应和振幅大于 $\pm 100 \mu\text{V}$ 的反应。所有实验因伪迹舍弃的数据小于总数据的10%。

1.2 结果和讨论

统计所有被试,高频真词条件的平均反应时和

错误率显著快于、低于低频真词条件(548 vs. 621 ms, 1.4% vs. 6.3%, $P < 0.01$), 两者均显著快于假词条件(718 ms, 11.1%, $P < 0.01$). 反应时的计算排除了错误反应. 这些行为结果再现了经典的词汇效应和词频效应, 确证了实验控制的可靠性. 图 1 显示了代表性电极上的平均脑电反应, 不同颜色的曲线分别对应高频、低频和假词条件. 对峰值点在 300~400 ms 之间的负波, 选择了从前到后 4 排、从左到右 3 列 12 个电极 (FC1, FCz, FC2; C1, Cz, C2; CP1, CPz, CP2; P1, Pz, P2), 计算这些电极从 300~400 ms 间 100 ms 时段内脑电的振幅平均值. 该振幅在假词条件下显著高于真词, 在低频条件下显著高于高频条件, 有理由把它确认为文献中广泛报道的跟语义加工密切相关的 N400^[25]. 可以看到, 在大多数电极上都出现了 N1, P2 和 N400 这 3 个词汇识别研究中经常出现的脑电成分^[15,26,27]. 由于不是关注重点而且同文献结论基本吻合, 所有实验中关于这 3 个成分的结果均简要叙述, 略去具体统计过程.

新的结果是出现在刺激呈现后约 216 ms 的一个负波, 简称 N200. 这个波峰的幅度不太大, 但分布较广泛, 在额区、中区和顶部脑区都有. 在其峰值点 216 ms 的左右各取 20 ms 的窗口, 计算一个 40 ms 时段内在前述 12 个电极上的波幅平均值, 发现该波幅对高频、低频和假词都没有区别(所有成对比较的 P 值均大于 0.5).

中文视觉双字词的 ERP 研究工作非常少. 注意到 N200 反应后, 核查文献发现, 这些研究中也曾记录到了类似的反应但未被关注, 可能因为其幅度较小, 也可能因为研究者考察比如具体性和名动属性对脑电反应的调制, 关注词汇的语义表征和相关的更晚期的 N400^[26,28] 而不是其词典表征(lexical representation). 另一方面, 使用单字词的研究结果一般看不到这个反应^[27,29]. 理论上, 单字词或者并不诱发 N200, 或者与双字词相比, 诱发的 N200 更为微弱. 这个问题需要将来采用有更大 power 的实验设计进一步研究.

2 实验 2: 中文、朝鲜文双字词 N200 时段的脑电比较

2.1 研究设计

一种可能是, 实验 1 观察到的 N200 不反映语言

加工, 而源自双字词的某种物理属性. 比如, 它可能反映了视觉系统对 2 个刺激紧密顺序排列的一种特殊反应. 为了考察这一基于刺激感知觉特性的解释, 本实验继续采用词汇判断任务, 呈现一系列双字词, 由中文词和朝鲜文词(彦文词)随机混合而成, 要求被试对两者做出区分(图 2). 受中文影响, 彦文单字也是由笔画和部件排列为一个方块构成. 从基本单元和总体构型上, 彦文词是与汉字感知觉特性非常接近的文字材料. 然而, 对于不懂朝鲜语者, 彦文双字词是没有任何语言意义的视觉符号. 本实验试图考察这种跟中文词感知觉特性高度相似的刺激是否会诱发 N200.

2.2 研究方法

新的 16 名(8 男/8 女)健康大学生自愿参加了本实验, 均为右利手, 年龄在 19~24 岁之间(平均 22.2 岁), 没有学习和使用彦文经验. 其他情况, 包括实验程序、刺激参数和脑电的记录、分析等与实验 1 相同, 不同之处如下所述. 使用的机器为 Brain Products 公司(美国) 64 导的 BrainAmp 脑电设备. 记录时的物理参考是缺省设置的 FCz 电极, 离线处理仍按双侧乳突信号的平均值做再参考, 并插值计算出 FCz 的信号.

每个被试完成 2 组测试, 每组包含 72 个词汇刺激, 一半中文词, 一半彦文词, 顺序随机混合排列. 中文词平均词频为 37.9. 匹配了中文词和彦文词的笔画数(11.0 vs. 11.2, $P > 0.5$). 词汇刺激呈现在屏幕中央, 要求被试尽可能迅速而准确地判断刺激是否为中文词汇, 如果是, 按一个键, 如果不是, 按另一个键.

2.3 结果和讨论

有一个被试的数据因技术故障无法使用. 对其余 15 个被试, 中文和彦文词的平均反应时和错误率十分接近(504 vs. 514 ms, $P > 0.2$; 3.6% vs. 3.8%, $P = 0.5$). 图 2 显示在一些代表性电极上中文和彦文条件下的平均脑电反应. 类似实验 1, 在大多数电极上都出现了 N1, P2 和 N400 3 个成分. 前 2 个成分反映非语言特有的基本感知加工^[30], 其波幅和潜伏期在 2 种条件间高度接近, 特别是 N1 在枕区高度一致, 提示两类刺激的基本物理属性, 如视觉复杂度是匹配的. 彦文词对应的 N400 幅度显著高于中文词, 符合 N400 通常的特性, 即对无意义刺激显示更强的反应. 中文词在 218 ms 左右, 诱发了一个清晰、分布广泛的

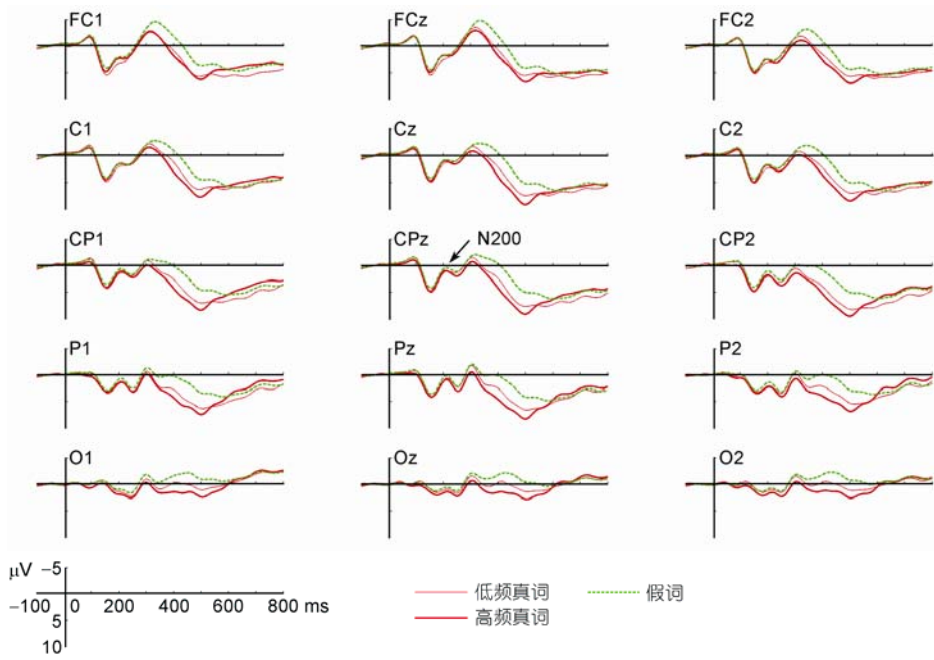


图 1 实验 1 各实验条件下的平均脑电反应

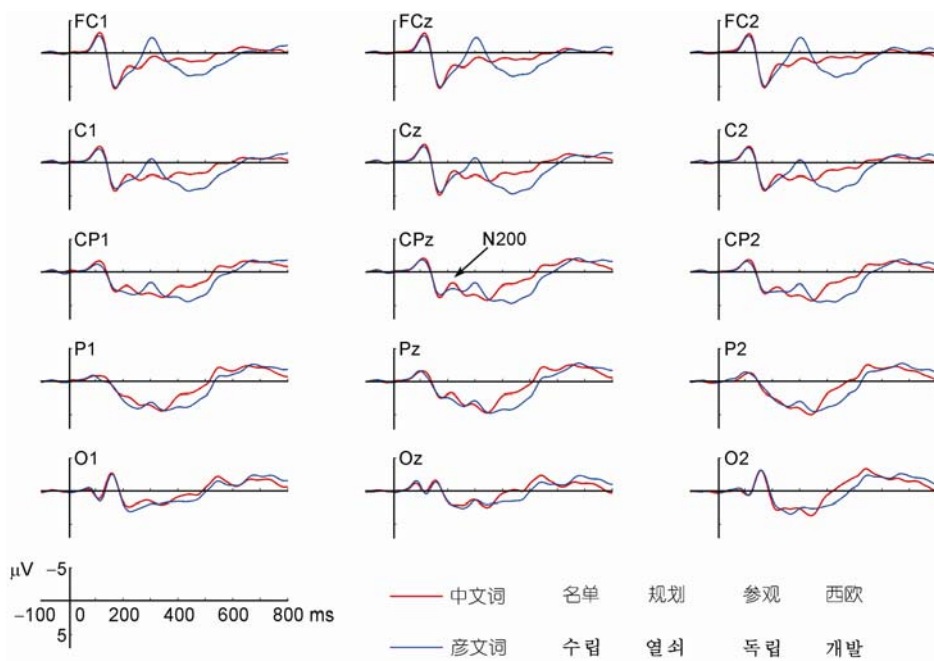


图 2 实验 2 各实验条件下的平均脑电反应

N200, 重复了实验 1 的基本结果. 与之对照, 彦文词没有诱发类似的反应, 其对应的脑电波形在 P2 和 N400 2 个峰值点之间基本上是单调平滑变化.

这些结果不支持对 N200 的感知觉解释, 说明把

2 个视觉刺激空间上并置起来, 并不能诱发出 N200. N200 不能归结为中文双字词的某种特殊的、非语言的物理属性, 因为跟中文词物理属性高度匹配的彦文词并不诱发这个反应. 换言之, 中文词能够而彦文

词不能够诱发 N200, 应该是因为前者对被试而言是有意义的语言材料, 而后者不是. 所以, N200 应该反映了某种语言加工过程.

3 实验 3: 重复启动对 N200 的影响

3.1 研究设计

以下 4 个实验采用神经启动范式, 探究 N200 具体对应的语言加工过程. 该范式结合传统的启动方法和认知神经科学技术, 观察一个刺激如何影响随后呈现的另一个相关刺激的神经活动, 被普遍认为是揭示物体和词汇识别脑机制的有力工具^[31]. 本实验使用的启动类型为重复启动, 即首先出现的刺激跟随后出现的刺激完全一样. 这种情况通常可以获得最明显的启动效应^[32].

与实验 2 相同, 呈现一系列双字词汇, 由中文词和彦文词随机混合而成, 要求被试对两者做出区分. 不同的是, 在刺激序列里包含了 4 种类型的启动-目标刺激对. 2 个相邻刺激(第 n 和 $n+1$ 个刺激)中, 第一个为启动刺激, 第 2 个为目标刺激. 根据启动词和目标词的关系, 定义如下条件: (1) 真词对照条件, 两者都是真词且相互无关; (2) 真词重复条件, 两者是同一个真词; (3) 彦文对照条件, 两者都是彦文词且互不相同; (4) 彦文重复条件, 两者为同一个彦文词. 根据实验 2 结果, 预期中文词会诱发 N200, 而彦文词不会. 着重考察中文词或彦文词的重复启动是否影响 N200 或相应时段的脑电反应.

3.2 研究方法

新的 20 名(9 男/11 女)健康大学生自愿参加了本实验, 均为右利手, 年龄在 21~26 岁之间(平均 23.7 岁). 其他情况包括实验程序、刺激参数和脑电记录、分析与实验 2 相同, 不同之处如下所述.

正式实验使用 90 个中文双字词(平均词频 50.2)和 90 个彦文双字词, 匹配两组刺激笔画数(12.0 vs. 11.7). 对中文, 随机选用其中 60 个词用于重复条件, 均分为 3 组, 每组构建 20 对重复词对, 3 组的重复间隔分别为 0, 1, 2 (同一个词的 2 次呈现之间没有、有 1 个或 2 个其他刺激). 对彦文, 采用同样的方式构建 3 组重复词对. 将这些重复词对和其余的 30 个中文词、30 个彦文词随机混合排列, 构成一个长度为 300 (60×2+30+60×2+30)的刺激序列. 均分该序列为 4

组, 每组包含 75 个刺激. 为增加数据量, 重复以上过程, 构造另外 2 个包含 300 个刺激的序列, 均分为 8 组. 每个被试完成如此构建的 12 组测试, 组间有短暂休息. 最初的设计关注重复间隔对重复效应的影响, 但间隔为 1 和 2 的重复词对没有显现任何有意义的效应, 所以以下仅讨论间隔为 0 的即时重复(immediate repetition)条件. 在 4 种实验条件中, 行为和脑电的结果均针对目标词. 中文词和彦文词的重复条件各有 60 个数据点. 由刺激构建过程可知, 相邻刺激不重复的情况远远多于重复的情况, 所以中文和彦文的对照条件各有约 110 个数据点.

3.3 结果和讨论

行为结果显示了显著的重复启动效应, 中文重复条件下对目标词的平均反应时和错误率都显著快于、低于中文对照条件(482 vs. 506 ms, $P < 0.001$; 2.6% vs. 6.5%, $P < 0.001$). 彦文词没有显示任何启动效应(513 vs. 518 ms, $P > 0.1$; 5.0% vs. 4.2%, $P > 0.3$). 图 3 在一些代表性电极上显示了 4 种条件下的平均脑电反应. 类似实验 2, 中文和彦文的对照条件, 在大多数电极上都出现了 N1, P2 和 N400 3 个成分, 前两个成分在各条件间没有明显区别, 提示刺激基本物理属性是匹配的. 仿照实验 1 的分析方法, 在 300~400 ms 间 100 ms 的时段内, 发现彦文词对应的 N400 幅度显著高于中文词, 显示对无意义刺激反应更强. 对于中文词, 与对照条件相比, 重复启动条件导致 N400 幅度的显著降低, 这是词汇识别文献中早已确立的重复启动效应^[32], 表明一个词汇的第一次加工, 明显促进了它第 2 次呈现时的语义加工. 彦文词的 N400 没有重复启动效应, 可以理解为它对中文被试而言没有语义表征, 也就不存在 2 次加工时的语义促进.

在对照条件下, 中文目标词诱发出一个清晰的 N200 成分, 而彦文词没有, 这就重复了前 2 个实验的结果. 关键是, 相对于对照组, 重复启动条件下中文词诱发出一个幅度显著增大(更负)的 N200 (0.6 vs. 1.3 μV , $P < 0.005$). 该重复效应以中央和顶部脑区为中心, 分布范围较广. 与之对照, 彦文词在这个时段的脑电反应, 重复条件和对照条件没有任何区别(1.7 vs. 1.9 μV , $P > 0.1$). 以上分析的时段和电极选择都仿照实验 1.

许贵芳^[33]给以中文为母语、英文为第 2 语言的

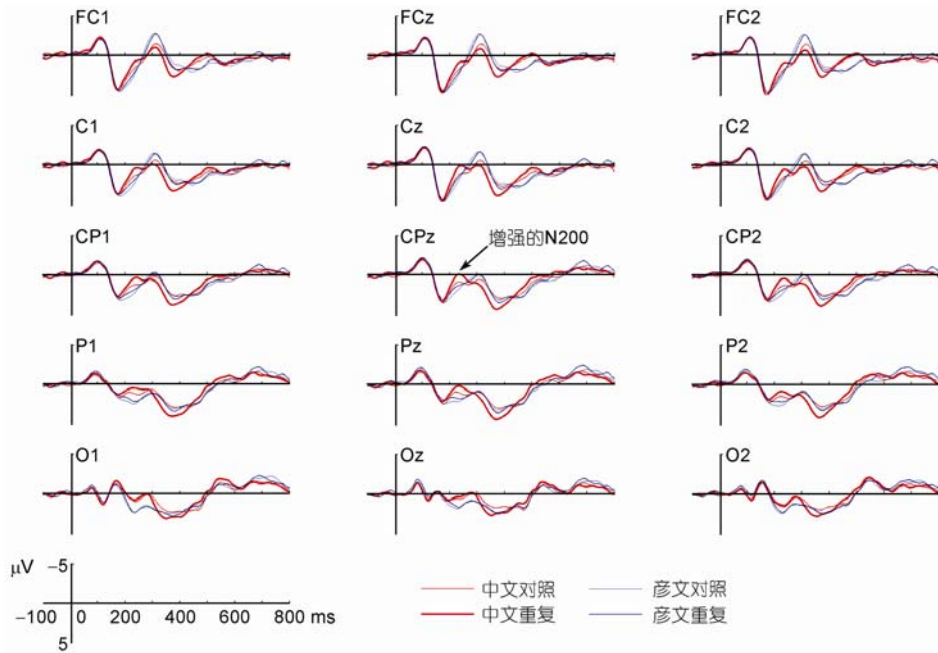


图3 实验3各实验条件下的平均脑电反应

被试呈现一系列词, 要求他们对其做语义判断. 其刺激类型里含有中文双字词重复呈现这个条件, 其结果中也记录到了中文词的第一次呈现诱发了 N200. 重复呈现时诱发了显著增强的 N200, 是对本研究结果可靠性的一个独立验证. 但许贵芳主要关注双语加工对 N400 的影响, 倾向于把这个早期反应解释为非语言的抑制功能, 类比于 Go/No-Go 任务中的抑制性 N2. 事实上, 许贵芳所观察到的 N200 和本文所观察到的 N200, 潜伏期明显早于抑制性 N2 (提早约 100 ms). 抑制性 N2 不能合理解释 N200 的另一个原因是, 许贵芳和我们使用的词汇判断任务是个常用的语言任务, 并不包含抑制过程.

4 实验4: N200 重复增强与语音启动的关系

4.1 研究设计

实验 3 发现中文双字词重复呈现时, 除了出现 N400 波幅显著降低这一已知现象, 还出现了 N200 显著增强这一新现象. 词汇作为语言材料, 其加工涉及词形、语音、语义 3 个维度. N200 的重复启动效应可能源自 3 类加工中的某一类或几类. 本实验改变启动词和目标词之间的关系, 使两者词形和语义不同, 但具有共同的语音特性(即为同音词), 来考察语音加工

是否对 N200 的重复增强效应有贡献.

与实验 3 一样, 采用词汇判断任务, 但真词之外, 不再使用彦文词, 而是如实验 1 使用由 2 个真实汉字组合构成的假词. 根据相邻 2 个刺激的关系, 刺激序列中包含了 4 类的启动-目标词对: (1) 真词对照条件, 两者都是真词且相互无关; (2) 真词重复条件, 两者是同一个真词; (3) 真词语音启动条件, 2 个相邻真词是同音词(声调也相同), 但词形不同, 语义无关; (4) 假词条件, 启动为真词, 而目标词是不相关的假词. 前两个条件在实验 3 中出现过, 后 2 个条件是新增的.

4.2 研究方法

新的 20 名(11 男/9 女)大学生自愿参加了本实验, 均为右利手, 年龄在 21~25 岁之间(平均 23.0 岁). 其他情况, 包括实验程序、刺激参数和脑电的记录、分析均与实验 3 相同, 不同之处如下所述.

正式实验包括 60 对双字真词同音词 (平均词频分别为 6.2, 6.1; 平均笔画数分别为 16.7, 16.6), 60 个用于重复条件的真词(词频: 6.2; 笔画数: 16.6), 400 个用于控制条件的真词(词频: 5.9; 笔画数: 16.7)和 120 个双字假词(笔画: 16.8). 匹配了各组间的笔画数和真词各组间的词频. 每个被试完成 10 组测试, 每组共计 76 个刺激, 由 6 对同音词对、6 对重复词对和

40个控制真词、12个假词随机混合排列而成。在4种实验条件中,行为和脑电的结果均针对目标词。同音和重复条件各有60个数据点。由刺激构建过程可知,相邻刺激不重复的情况远远多于重复的情况,所以中文对照条件有410个数据点。

由于主要关心3种真词条件,与实验3不同,这里只要求被试对假词做按键反应,而对真词不做反应。这样,假词实际上是非关键的填充材料,出现次数较少,而真词条件可以获得更多的数据。缺点是不能得到对真词的行为反应数据。作为弥补,使用新的一组来自同样群体的16名被试,进行了一个不记录脑电的行为实验。材料、任务和程序都保持不变,唯一的不同是指示被试看到真词按一个键,假词按另一个键。实验结果显示了高度显著的重复启动效应,真词重复相对于真词对照条件更快、错误更少(523 vs. 633 ms, $P < 3 \times 10^{-9}$; 2.1% vs. 3.6%, $P < 0.05$)。语音启动效应不显著(629 vs. 633 ms, $P > 0.5$; 4.8% vs. 3.6%, $P > 0.2$)。真词对照条件比假词条件更快、错误更少(633 vs. 861 ms, $P < 4 \times 10^{-8}$; 3.6% vs. 19.0%, $P < 5 \times 10^{-5}$)。

4.3 结果和讨论

行为结果显示对假词的平均反应时为980 ms,错误率为8.8%,对真词的误报率为3.2%。如图4所

示,对照条件和假词条件的目标词诱发了N1, P2, N200和N400,其反应模式跟实验2和3基本相似,不再重复叙述。此外,假词条件和真词对照条件下诱发的N200没有区别,再现了实验1中观察到的结果,即N200的幅度不受整词真假性的影响。仿照实验1的计算方法,与真词对照条件相比,真词重复条件导致N400幅度的显著降低,同时导致N200幅度的显著增强(1.5 vs. 2.5 μV , $P < 0.0005$),再现了实验3的结果。N200重复效应在中央和顶区仍然比较显著,相对于实验3,额区更为显著。

语音启动导致一定程度的N400波幅的显著降低,这与文献中单字词的结果是一致的^[27],说明这里语音启动的操纵是有效的。但最关键的结果是,语音启动不影响N200,语音启动条件和真词对照条件下诱发的N200波幅没有任何统计区别(2.6 vs. 2.5 μV , $P > 0.5$)。

5 实验5: N200重复增强与语义启动的关系

5.1 研究设计

类似实验4,这里进一步改变启动词和目标词之间的关系,使两者词形和语音不同,但语义相关,以考察语义加工是否对N200的重复增强效应有贡献。与实验4一样,采用词汇判断任务,呈现一系列的双

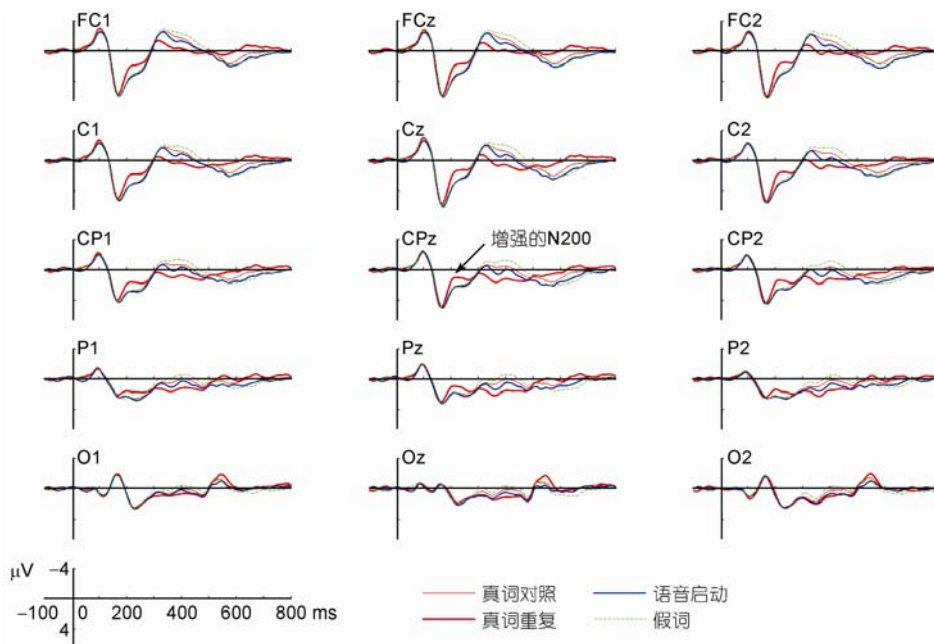


图4 实验4各实验条件下的平均脑电反应

字真词和假词,要求被试对两者进行区分.刺激序列中包含了5类的启动词-目标词对:(1)真词对照条件,两者都是真词且互不相关;(2)真词重复条件,两者是同一个真词;(3)两者都是真词且语义相关;(4)假词对照条件,两者都是假词且词形和语音均无关;(5)假词重复条件,两者是同一个假词.前2个条件在实验3和4中出现过,后3个条件是新增的.

5.2 研究方法

新的20名(15男/5女)大学生自愿参加了本实验,均为右利手,年龄在19~25岁之间(平均22.3岁).其他情况,包括实验程序、刺激参数和脑电的记录、分析与实验3相同,不同之处如下所述.正式实验包括50对语义相关词对(词频分别为34.2,34.3;笔画数分别为17.1,16.8),50个用于重复条件的真词(频率:32.9;笔画数:16.7),50个用于重复条件的假词(笔画数:17.2),200个用于控制条件的真词(频率:31.7;笔画数:16.7)和300个假词(笔画:16.8).各组刺激均为双字词汇,匹配了各组真词间的笔画数和词频.由来自同样群体的16名被试使用5点量表评定(1为意义无关,5为意义高度相关),语义相关词对的平均相关度为3.84,标准差为0.27.

每个被试完成10组测试,每组共计80个刺激,由5对语义相关词对、5对真词重复词对、5对假词重复词对和20个控制真词、30个假词随机混合排列而成,真假词各40个.在以上5种实验条件中,行为和脑电的结果均针对目标词.所有条件均包含50个数据点,除了真词和假词对照条件,分别包含约100和150个数据点.原因类似于实验3和4,刺激构建过程自然导致相邻刺激不重复的情况多于重复的情况.

5.3 结果和讨论

行为结果显示了清楚的重复启动和语义启动效应.真词重复条件下对目标词的平均反应时和错误率都显著快于、低于真词对照条件(589 vs. 722 ms, $P < 5 \times 10^{-12}$; 2.1% vs. 7.8%, $P < 1 \times 10^{-6}$).语义启动条件下出现类似的结果(661 vs. 722 ms, $P < 3 \times 10^{-9}$; 1.8% vs. 7.8%, $P < 5 \times 10^{-6}$).假词重复条件下的反应时显著快于假词对照条件(650 vs. 788 ms, $P < 1 \times 10^{-11}$),错误率没有显著差别(3.2% vs. 4.4%, $P > 0.1$).

如图5所示,真、假对照条件下的目标词诱发了

N1, P2, N200和N400,其反应模式跟实验3和4相应结果基本相似,不再重复叙述.此外,真词和假词诱发的N200也没有区别,再现了实验1和4中的结果,即N200的幅度不受整词真假性的影响.与真词对照条件相比,真词重复条件导致N400幅度的显著降低,同时导致N200幅度的显著增强(1.8 vs. 2.6 μV , $P < 0.005$),再现了实验3和4的结果.该重复效应的分布跟实验4比较接近.

与假词对照条件相比,假词重复也导致N400显著降低,其效应大小弱于真词重复的效应.然而,假词重复也导致N200增强(1.4 vs. 2.5 μV , $P < 5 \times 10^{-5}$),其效应大小跟真词重复对应的效应没有区别(2 \times 2交互作用 $F(1,19) = 1.0$, $P > 0.3$).相对于真词对照组(相当于无语义启动情况),语义启动条件出现了显著的N400幅度降低,再现了经典脑电的语义启动效应^[25].最关键的结果是,语义启动没有影响N200,语义启动条件和真词对照条件对应的N200波幅没有任何统计区别(2.3 vs. 2.6 μV , $P > 0.3$).由于实验4和5排除了语音、语义的影响,可以认为N200的重复效应应该反映了视觉词形的加工.

6 实验6:局部词形重复对N200的影响

6.1 研究设计

实验3~5通过排除法,推导出N200重复效应反映双字词视觉词形加工的结论.为直接检验这一结论,这里通过操纵启动词和目标词之间的词形相似性,观察N200重复效应是否会有相应的变化.

与实验4一样,采用词汇判断任务,呈现给被试一系列的双字真词和假词,要求他们对两者进行区分,但主要关注真词刺激.假词由2个真字构成,数量很少,仅作为检测目标出现.刺激序列中包含了4类由真词构成的启动-目标词对:(1)对照条件,两者完全无关(如钱币-微弱);(2)完全重复条件,两者是同一个词(如思索-思索);(3)首字重复条件,两者第1个字相同但第2个字不同(如荣幸-荣华);(4)尾字重复条件,两者第2个字相同但第1个字不同(如流利-互利).前2个条件在实验3~5中出现过.后2个新增的条件中,启动词和目标词不同,但它们包含1个共同的单字,单字的字形信息是双字词词形信息的一部分,所以2个词在正字法上具有部分相似性,构成局部词形重复.

6.2 研究方法

新的26名(4男/22女)大学生自愿参加了本实验,均为右利手,年龄在17~25岁之间(平均20.2岁)。其他情况,包括实验程序、刺激参数和脑电的记录、分析与实验4相同,不同之处如下所述。每个被试完成10组正式测试,每组共计80个刺激,由5对完全重复、5对首字重复、5对尾字重复、20对对照条件和10个假词随机混合排列而成。

正式测试总计使用200对对照词对(启动词:平均词频为7.2,首、尾字平均笔画数为8.2,8.4,平均字频为689,789;目标词相应数值为7.2,8.5,8.6,916,572),50对完全重复词对(启动词:6.8,8.7,8.9,466,523;目标词:同启动词),50对首字重复词对(启动词:6.8,8.6,8.1,619,638;目标词:7.0,8.6,7.9,619,738),50对尾字重复词对(启动词:平均词频为6.9,9.1,8.7,418,504;目标词:7.4,8.6,8.7,664,504)和100个假词(首、尾字平均笔画数为8.6,8.2,平均字频为536,852)。词频、字频单位均为每百万中出现次数。匹配了不同条件间刺激的词频和笔画数。对照条件中目标词的首字字频显著高于其他条件。该条件数据点较多(200次测试),实验后将这些测试依该字频数值分为高低两组进行事后分析,发现该因素对结果没有任何明显影响。

与实验4一样,要求被试对假词尽快做按键反应,对真词不做反应。假词作为检测目标,数量较少,这样真词条件可以获得更多的数据点。在4种真词条件中,行为和脑电的结果均针对目标词。

6.3 结果和讨论

各真词条件行为结果的平均误报率(因正确反应为无需反应)均在3%以下,且彼此间无统计区别。假词检测的平均正确率为97.1%,平均反应时为745 ms。如图6,目标词诱发了N1, P2, N200和N400,其反应模式与实验3~5中的真词条件基本相似。仿照实验4的分析方法,对N200和N400波幅做单因素4水平ANOVA分析,两者均有显著结果(N200: $F(3,75) = 11.3, P < 0.001$; N400: $F(3,75) = 18.2, P < 0.001$)。从对照条件、尾字重复、首字重复到完全重复,N200的波幅依次增大(更负),分别为4.2, 3.9, 3.4和2.8 μV ; N400则呈相反走向,波幅分别为-0.8, 0.1, 0.4和1.4 μV 。与对照条件相比,完全重复导致N400幅度显著降低($t(25) = 7.1, P < 5 \times 10^{-7}$),同时导致N200幅度显

著增强($t(25) = -6.1, P < 5 \times 10^{-6}$),再现了实验3~5中的结果。

与对照相比,首字重复导致N400幅度降低($t(25) = 4.0, P < 5 \times 10^{-4}$)和N200幅度增强($t(25) = -2.80, P < 0.01$);尾字重复也导致N400降低($t(25) = 3.4, P < 0.005$)和不显著的N200增强($t(25) = -1.1, P = 0.3$)。就是说,当双字词完全重复、启动词和目标词的词形相似性最大时,N200重复效应的幅度也最大,而当双字词部分重复、启动词和目标词的词形相似性较小时,N200重复效应的幅度也较小。这个结果为N200反映词形加工的观点提供了较为直接的证据。无论是首字重复还是尾字重复,启动词和目标词作为整词都是不同的,所以,部分重复条件下出现N200增强,也就说明N200不可能纯粹反映了整词表征,而更可能既与整词加工(lexical processing)有关,也跟词汇下加工(sub-lexical processing)有关。首字重复下的N200增强,其幅度显著小于完全重复下的N200增强(0.6 vs. 1.4 $\mu\text{V}, t(25) = -2.10, P < 0.05$),也说明整词的重复效应,不仅仅来自于首字。

首字重复时的N200波幅高于尾字重复,达到边缘显著($t(25) = -1.9, P = 0.06$),说明N200的重复效应不能完全归结为双字词所含单字的重复,否则首字、尾字重复的结果应该是一样的。首字重复对N200的影响更大,这提示首字较之尾字对整词加工更为重要,说明2个单字没有受到平等的并行加工,或说双字词的识别可能包含从首字到尾字的串行加工。由于首、尾字条件下的N400没有区别($t(25) = 1.0, P = 0.35$),这种加工应该不反映语义加工,更可能是跟词形有关。

7 总讨论

本研究的一系列实验表明,中文双字词的识别会诱发一个早期的脑电反应N200,分布广泛,以顶、中部脑区为中心,在枕区和颞区不太明显,也没有明显的单侧化趋向(实验1和2);重复启动会导致N200出现一个非常清晰的增强效应(实验3);物理属性同中文双字词高度相似的非语言的视觉刺激并不能诱发N200(实验2),其重复呈现也对N200没有任何影响(实验3)。这些结果提示,N200应该反映语言加工,而不是低层次的感知觉加工。进一步关注N200具体跟语言加工中形(orthography)、音(phonology)、义(semantics)3个因素中的哪些因素相关,实验4和5观察到,N200的重复效应不受语音、语义启动的影响,

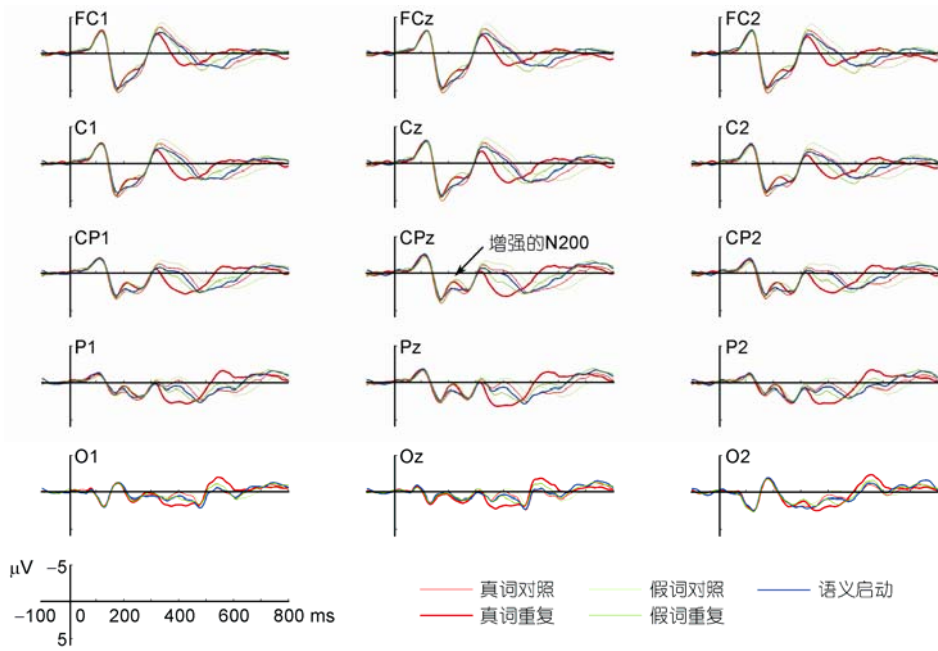


图 5 实验 5 各实验条件下的平均脑电反应

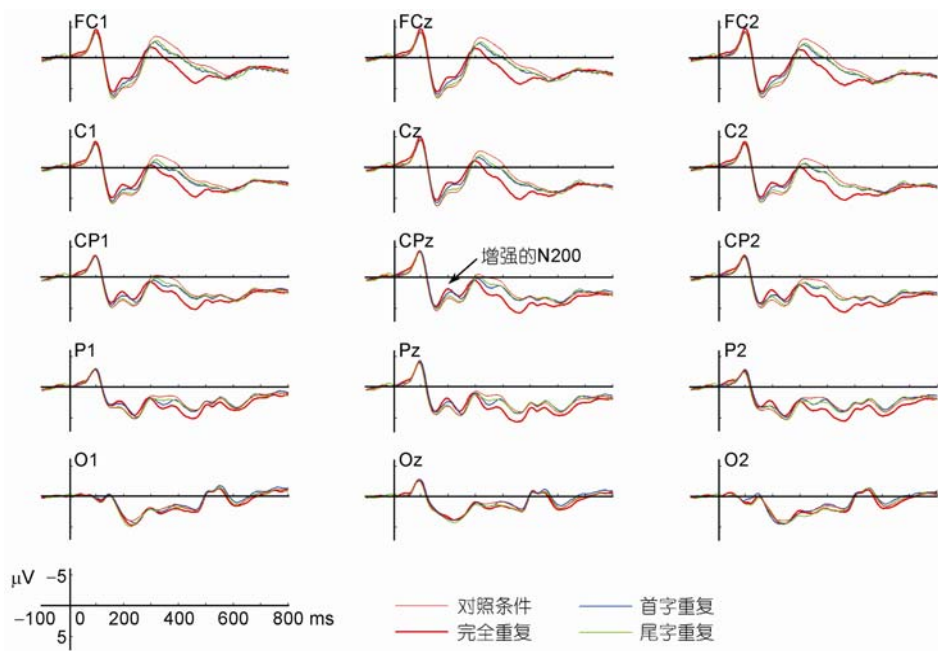


图 6 实验 6 各实验条件下的平均脑电反应

不能归结为启动词和目标词在语义或语音上的相似性。这就在实验 2 和 3 结果的基础上排除了 N200 跟语音、语义的关系，从而确定了 N200 的加工应该反映剩余的第三个因素，即词形加工或在正字法层次上对词

汇视觉表征的加工。实验 6 通过操纵双字词启动词和目标词的词形相似性，为这个结论提供了更为直接的证据。若不加限定，词形(word form)既可以指视觉词汇的正字法表征，也可以指听觉词汇的语音表

征. 本文中的用法是指视觉词形, 而不是听觉词形.

黄贤军等人^[34]最近用脑电研究听觉呈现的中文双音节词的重复效应, 其结果中既没有显示任何 N200 反应, 在 N200 时段也没有出现任何负向增强. 许贵芳^[33]也研究了听觉呈现的双音节词的重复效应,

所得结果类似. 就是说, 即使通过听觉通道直接激活中文视觉双字词对应的语音表征, 也不会观察到 N200 的重复增强, 这就提示视觉通道中双字词重复呈现诱发的 N200 增强, 不太可能来自于词汇语音表征的重复激活(图 7). 这 2 个研究提供了强有力的佐

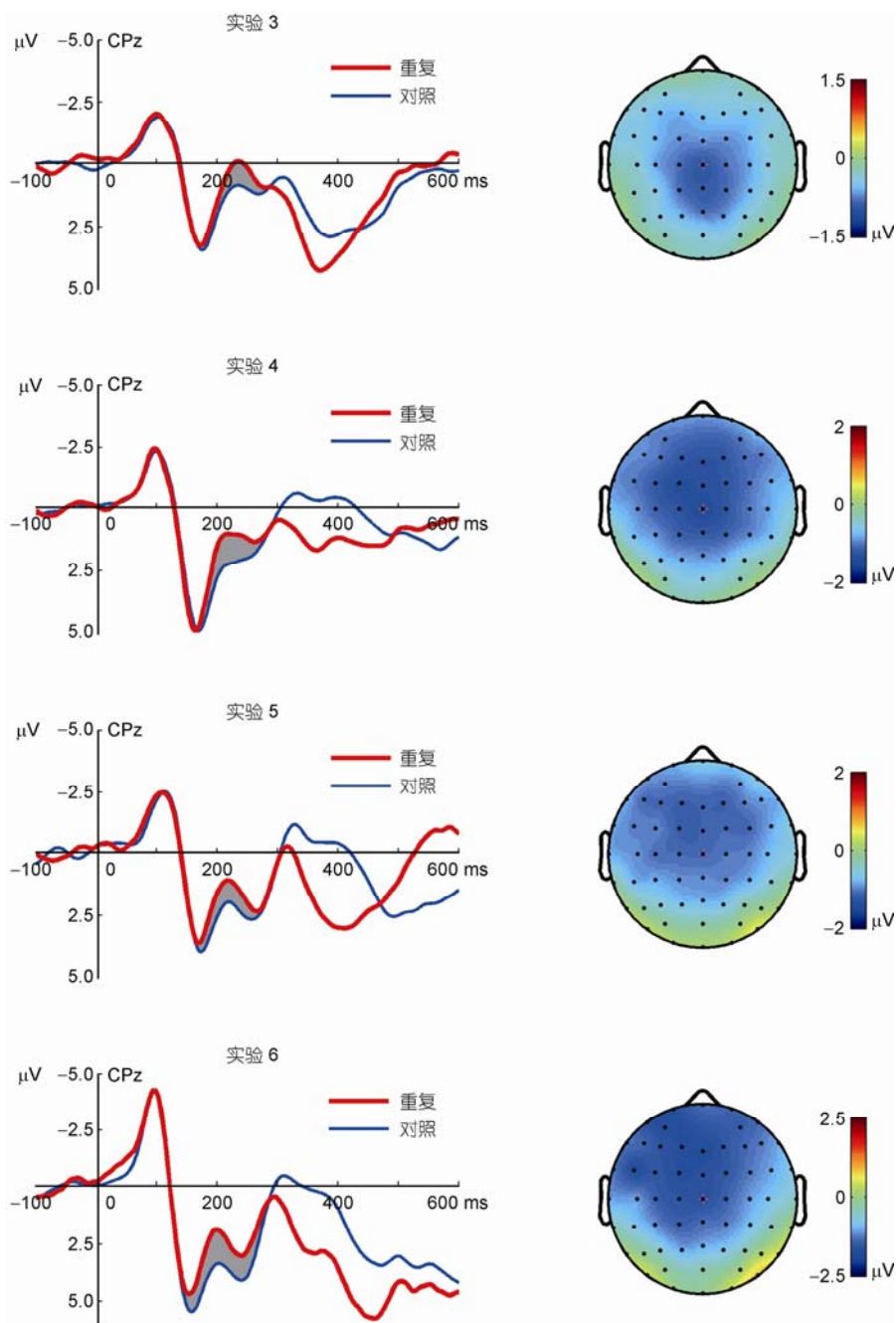


图 7 实验 3~6 中真词对照和真词重复条件下 CPz 电极的平均脑电反应和 2 个条件间差异波波幅(N200 峰值点为中心 40 ms 时间窗口内平均值)的脑区分布

图中“十”字标示 Cz 电极. 对实验 6, 真词重复条件指完全重复条件

证,说明本文报道的 N200 具有通道特异性,的确反映中文词汇的视觉词形加工,不反映语音或语义加工,也不能归结于所用词汇刺激的其他特点,如为包含 2 个语义单位的复杂词。

拼音文字中对复杂词的认知神经科学研究近年来刚刚起步。由于如英语等的语言特点(多数复杂词由屈折法或派生法构造),针对复合词的研究更少。目前搜索到的仅有的 2 个相关脑电研究中,Lehtonen 等人^[35]比较了对芬兰语屈折词和单纯词进行词汇判断的早期脑电反应,没有发现任何区别。EI Yagoubi 等人^[36]研究了意大利语中的复合词,其 Cz 电极的波形出现了一个 N2 反应,但潜伏期相当晚,在 300 ms 左右,而且这个反应对非复合词也同样出现,跟本文报道的 N200 不太相像。

实验 1 和 4 中发现 N200 不受双字词整词频率的影响,对真词和由真字构成的假词有类似的反应,其重复效应对真词和假词也非常相似。词频反映了对刺激的熟悉性。作为一个整体,假词可看作是词频为零,熟悉性极低的刺激。这些结果说明, N200 不大可能与对整词词形的熟悉性有关。但 N200 具体反映了整词词形的哪些属性,需要进一步研究。

回顾文献,虽然过去 30 多年来,在英文和其他字母文字中使用脑电对重复启动效应做了非常深入系统的研究,但类似本研究中的 N200,尤其是它显示的重复增强特性,相关研究中均未报道过^[37-43]。一个特别具有说服力的例子是,许贵芳^[33]报道的视觉双字词实验是仿照一个拼音文字的研究^[44]设计的,不同的是改用了中文被试和中文词汇刺激。图 8 给出了这 2 个实验范式完全一致的直接对比研究的关键结果,可以看到中文和拼音文字 N200 时段在代表电极上脑电反应的明显差异,即中文词出现清晰的 N200 反应,重复启动时出现极为显著的负向增强,而英文词和西班牙文词,在同样时段既没有诱发 N200,重复启动时也没有任何负向增强。

字母文字研究中得到广泛认可的启动效应都出现在刺激呈现 300 ms 以后,表现为脑电波形的正向偏移,在此之前没有任何负波成分出现重复增强迹象。有报道英文词诱发一个 N250 效应^[45],但它仅在阈下屏蔽启动范式中出现,其头皮分布主要在颞、枕叶,其重复效应是幅度降低,这些特点都跟这里的 N200 完全不同。英文研究也有一些跟词形加工相关的 N200 的报道^[46,47],其基本范式是呈现启动-目标刺

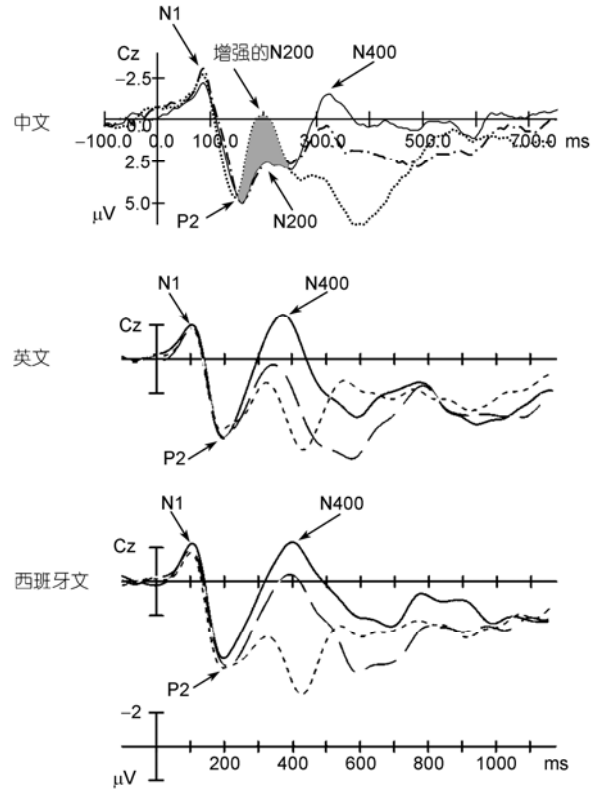


图 8 中文和拼音字母文字在采用完全相同的视觉词汇加工范式的两个实验中的结果对比

中文词汇首次呈现时(实线)诱发清晰的 N200,重复呈现时(圆点虚线)N200 出现十分显著的负向增强(灰色标记区域),英文和西班牙词汇首次呈现时(实线)在同样时段没有诱发任何负向反应,重复呈现时(圆点虚线)也没有任何负向增强。中文结果取自许贵芳^[33],字母文字结果取自 Alvarez 等人^[44],已获使用许可

激对,启动刺激有时会加屏蔽,由于启动跟目标间的间隔很短(如 200 ms 左右),不易单独考察对目标词的脑电反应,同本文的范式不易比较。更重要的是,这些 N200 的脑区分布以后部枕、颞叶为主,比较局部化,跟此处报道的脑区分布以顶中区为主,分布相对广泛的 N200 显著不同。

脑电研究对 N2 的更多报道,大多数都不是针对语言材料的,通常认为反映知觉不匹配、注意、控制和抑制功能等非语言因素^[48,49],不像此处报道的 N200,在一种文字里出现,在另一种文字里不出现,很难归结为非语言因素。此外,很多研究中的 N2 潜伏期都在 300 ms 左右,跟这里观察到的 N200 相当不同。对脑电成分的确定,在考虑正负走向、潜伏期、脑区分布之外,还要看该成分在何种范式下受何种变量的影响。同样是 200 ms 时段的负波,可能对完

全不同的加工过程. 为了避免混淆, 我们暂时把本文的 N200 称为“顶中区 N200”, 利用其脑区分布以顶区、中央区为主的特性, 来跟类似时段出现的其他负波相互区分. 随着更多实验数据的积累, 这个命名也可能需要调整, 以反映对该 N200 更为透彻的认识.

N400 是脑电在语言研究中最重要发现, 它在重复启动下的幅度降低也是最显著的脑电效应之一. 这里采用词汇判断这一众多英文研究中使用的标准范式, 仅仅改换成为中文刺激, 在中文被试上除了重现经典的 N400 重复效应外, 还反复多次记录到这样一个时段早、幅度大、分布广, 而且走向同 N400 完全相反的重复效应. 如果类似的现象在英文中存在, 很难解释为什么在大量已有的研究中都没有观察到, 而且其中一些使用的实验范式同本研究高度相似. 与英文研究对照, 在数量不多、目前尚不成系统的中文词汇识别的脑电研究文献中, 已有的少量实验就清楚显现了 N200 及其重复效应. 这就说明, N200 很有可能是中文词汇识别特有的一个脑电反应, 在拼音字母文字如英文中并不存在.

启动效应通常的解释是先前加工使得后继加工变得更容易, 所以重复启动一般都是导致脑和神经活动的降低. 使用不熟悉的材料, 个别情况会出现脑活动的重复增加现象^[50,51]. 与之不同, 本研究使用的词汇材料都是高度熟悉的. 中文词的重复启动, 同时导致了 N400 的振幅降低和 N200 的振幅增强, 是一个非常奇特的现象, 将对启动的神经机制研究提供了一个新的途径. 在脑电文献中, 唯一类似的现象是 Schweinberger 等人^[52]发现的面孔重复呈现时诱发的一个 N250 的幅度增强. 这个效应局限于枕叶, 显示右半球优势. Schweinberger 等人猜测该效应可能反映了跟识别相关的短暂激活, 但没有解释为什么是增强效应. 他们着重强调的是, 这个重复效应的存在说明在 N250 的时间段, 人类视觉达成了对个体面孔的识别. 在这个时段前的 N170, 得到广泛研究, 对面孔刺激敏感, 但 N170 不显示重复效应. 也就是说, 连续呈现两个面孔, 不管它们是相同的还是不同的, N170 的反应都是一样的. 换言之, N170 仅仅表示视觉系统识别出一个刺激是属于面孔这个类别(category)的, 但并没有识别出它是哪个具体的面孔或面孔类别的个体成员(individual exemplar). 与之对比, N250 显示重复效应, 说明视觉系统在这个时段已经能分辨出两次呈现的面孔是相同的, 还是不同的, 也就是

说, 能够区分不同的个体面孔了. 这种区分根据的应该是刺激图形的结构特征, 而不是其简单的物理属性, 原因在于 N250 之前的其他脑电成分并不表现出重复效应.

根据同样的逻辑, 顶中区 N200 显示出重复效应, 说明它作为一个神经反应, 能够在“词 A-词 B (非重复)”和“词 A-词 A (重复)” 2 个刺激对之间做出区分, 即认知加工在 200 ms 这个时段, 已经分辨出两个词是不同的个体(individual exemplars). 由于该重复效应对语音、语义启动不敏感, 所以 N200 应该是反映了对个体词形表征(orthographic representation at the level of individual exemplars) 的加工. 这就意味着中文词的词形在 200 ms 时段已经得到识别. 已知随后发生的 N400 对词频敏感, 区分真假词, 反映了词汇水平上的语义通达. 两个结果相结合, 就把中文从词形识别到语义通达这个过程限定在 N200 到 N400 之间, 为其刻画了一个较为清晰的时间过程.

除了对面孔敏感外, N170 也经常显现出对视觉词汇较强的反应幅度^[53,54]. 本研究在通常考察 N170 的枕颞叶电极上记录到了 N170, 与 N200 不同, 该成分没有显示任何重复效应. 此外, 词汇诱发的 N170 通常呈现以脑后部枕、颞区为中心、带有左侧偏侧化的局部分布, 而此处报道的 N200 具有以顶、中央区为中心、分布比较广泛的特点. 所以, 顶中区 N200 不太可能是 N170 在时间上的一个简单延迟. 综合上面的讨论, 如果 N170 反映了对词汇刺激类别的分辨, 那它可能与顶中区 N200, N400 一起标志了中文词汇识别的 3 个阶段.

有理由猜测, 在 200 ms 左右, 中文词汇和面孔都达到了类别内的个体识别, 而 N200 和 N250 反映的都是识别中构建刺激结构描述的过程. 但与面孔的 N250 重复效应相比, 中文词 N200 的重复效应幅度大、头皮分布也更为广泛, 超出了枕叶等较为初级的视觉脑区, 而涉及到顶叶等更高级的脑区, 提示其对应的识别过程可能远远复杂于面孔识别, 或者至少机制相当不同. 而对非面孔的自然物体和英文词汇, 没有发现类似的重复效应, 说明对它们的识别机制可能跟面孔和中文词不同. 虽然都是语言材料, 中英文词汇涉及的视觉加工可能相当不同. 比如, 英文的词形表征仅仅涉及分辨几十个字母的一维排列组合, 其结构编码应该相对简单. 中文词汇从数量上需要区分 5000 个左右的常用单字, 从结构上需要在部

件、单字和多字层次上抽取复杂的二维形状信息并编码各部分间的位置关系,有些类似于复杂的空间和场景知觉。

作者最近提出了汉字拼义理论,试图从心理加工的角度给予中文书面语言一个新的定性^[55]。该理论认为汉字在词汇水平上,是一个通过拼合意义基本单位(义基),构建新概念的拼义文字,跟拼音文字属于成熟的人类文字仅有的2个逻辑类型,保证效率前提下不能相互转换。特别的,拼音文字植根于听觉通道,不能摆脱语音信号的一维线性和语音基本单位数量有限的局限性,本质上是语音信号的转写。文字如果要做到有效拼义,就必须突破听觉的局限性,利用加工能力更强的视觉通道,而且还必须充分发挥人类视觉最出色的、二维空间的图形识别能力。这样,拼义理论预期,相对于拼音文字,中文词汇加工会更多涉及视觉加工。

中文和字母文字都有早期词形加工,但字母文字中跟词形相关的 N200 对刺激重复不敏感。根据 Schweinberger 等人^[52]系列研究的关键逻辑,这样的词形加工不够精确,仅完成了类别识别,即仅能确定一个刺激是字母串,但不能区分不同的字母串,不是在个体词形水平上的真正识别。与之形成鲜明对比,中文词汇诱发的 N200 对刺激重复非常敏感,说明已经实现了对个体词形的识别,或说中文词汇的词形识别过程在刺激出现后 200 ms 左右就完成了,看来早于拼音字母文字。中文识别完成较早,可能是因为它利用了高度并行的、加工能力更强的视觉通道,而

不是强调串行加工、能力较弱的听觉通道。当然完成较早也可能意味着加工更为简单,但这种解释跟两种文字中 N200 效应的脑区分布模式是矛盾的。字母文字中的 N200 局限于颞、枕脑区,而中文的 N200 出现在涉及复杂视觉分析如场景、空间知觉的顶叶脑区附近,提示中文词形的识别可能超越了颞、枕叶加工能力的范围,需要更多的加工资源和更高级的脑区。

综合这些考虑,我们认为, N200 的发现表明,以汉字为基本单元的中文词汇识别在早期就存在一个针对词形的加工过程,涉及相当广泛、高级的视觉加工,而这个加工过程在以字母为基本单元的英文词汇识别中并不存在,这就提示前者相对于后者更重视觉处理,跟拼义理论认为中文相对于英文是更为彻底的视觉文字的核心观点是一致的。根据文献分析,顶中区 N200 应该是迄今观察到的揭示中文与拼音文字不同加工机制的最为清楚的一个脑神经活动指标,其发现与拼义理论相互印证,从理论和实验两个方面揭示了中文的独特性,为中文与拼音文字存在本质区别的观点提供了强有力的证据。

虽然拼义理论能解释顶中区 N200,而该 N200 的发现也支持拼义理论,两者相互印证和加强,但它们仍代表两个相对独立的研究结果,在逻辑上不能由一方推导出另一方,也可能两者没有必然的联系。比如, N200 也有可能用其他理论来解释,拼义文字如果是视觉文字,它在脑加工机制上也可能以别的方式体现出来。拼义理论目前对 N200 现象提供了一种可能的解释,但这种解释是否正确,还需要进一步验证。

参考文献

- 1 周有光. 世界文字发展史. 上海: 上海教育出版社, 1997
- 2 Wang W S Y. The Chinese language. *Scient Am*, 1973, 228: 50-60
- 3 Tzeng O, Hung D, Cotton B, et al. Visual lateralization effect in reading Chinese characters. *Nature*, 1979, 282: 499-501
- 4 郭可教, 杨奇志. 汉字认知的“复脑效应”的实验研究. *心理学报*, 1995, 27: 78-83
- 5 彭聃龄, 舒华, 陈焯之. 汉语认知研究. 济南: 山东教育出版社, 1997
- 6 彭聃龄. 汉语认知研究: 从认知科学到认知神经科学. 北京: 北京师范大学出版社, 2006
- 7 Wu J T, Liu I M. Chinese lexical access. In: Bond M H, ed. *The Handbook of Chinese Psychology*. Hong Kong: Oxford University Press (China) Ltd, 1996. 30-42
- 8 Gazzaniga M S, Ivry R B, Mangun G R. 认知神经科学. 周晓林, 高定国, 译. 北京: 中国轻工业出版社, 2011
- 9 杨亦鸣, 梁丹丹, 顾介鑫, 等. 名动分类: 语法的还是语义的——汉语名动分类的神经语言学研究. *语言科学*, 2002, 1: 31-46
- 10 魏景汉, 匡培梓, 张东松, 等. 全视野汉字词义联想的 ERP 特征与汉字认识的 ERP 甄别. *心理学报*, 1995, 27: 413-419
- 11 Peng D L, Xu D, Jin Z, et al. Neural basis of the non-attentional processing of briefly presented words. *Hum Brain Mapp*, 2003, 18: 215-221
- 12 Lee C Y, Tsai J L, Kuo W J, et al. Neuronal correlates of consistency and frequency effects on Chinese character naming: An event-related fMRI study. *NeuroImage*, 2004, 23: 1235-1245

- 13 Zhang J X, Zhuang J, Ma L F, et al. Semantic processing of Chinese in left inferior prefrontal cortex studied with reversible words. *NeuroImage*, 2004, 23: 975–982
- 14 Hu W, Lee H L, Zhang Q, et al. Developmental dyslexia in Chinese and English populations: Dissociating the effect of dyslexia from language differences. *Brain*, 2010, 133: 1694–1706
- 15 Barber H, Kutas M. Interplay between computational models and cognitive electrophysiology in visual word recognition. *Brain Res Rev*, 2007, 53: 98–123
- 16 张积家, 张厚粲, 彭聃龄. 分类过程中汉字的语义提取(2). *心理学报*, 1991, 2: 139–144
- 17 宋华, 张厚粲, 舒华. 在中文阅读中字音、字形的作用及其发展转换. *心理学报*, 1995, 27: 139–144
- 18 Ding G S, Peng D L, Taft M. The nature of the mental representation of radicals in Chinese: A priming study. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 2004, 30: 530–539
- 19 丁国盛, 彭聃龄. 汉语逆序词识别中整词与词素的关系. *当代语言学*, 2006, 8: 36–45
- 20 拉克. 事件相关电位基础. 范思陆, 丁玉珑, 曲折, 译. 上海: 华东师范大学出版社, 2009
- 21 刘燕妮, 舒华. ERP与语言研究. *心理科学进展*, 2003, 11: 296–302
- 22 Zhang J X, Kong L Y, Zhang Q, et al. An early ERP component for compound word processing. In: the 13th International Conference on the Processing of East Asian Languages (ICPEAL), 2009, Oct 9–11, Beijing
- 23 Zhang J X, Kong L Y, Zhang Q, et al. One novel ERP component brings three discoveries in language, memory, and attention. In: Annual Meeting of the Human Brain Mapping Society, 2010, June 6–11, Barcelona
- 24 现代汉语词频词典. 北京: 北京语言学院出版社, 1986
- 25 Kutas M, Federmeier K D. Thirty years and counting: Finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP). *Ann Rev Psychol*, 2011, 62: 621–647
- 26 Zhang Q, Guo C Y, Ding J H, et al. Concreteness effects in the processing of Chinese words. *Brain Lang*, 2006, 96: 59–68
- 27 Zhang Q, Zhang J X, Kong L Y. An ERP study on the time course of phonological and semantic activation in Chinese word recognition. *Int J Psychophysiol*, 2009, 73: 235–245
- 28 张钦, 丁锦红, 郭春彦. 名词与动词加工的 ERP 差异. *心理学报*, 2003, 35: 753–760
- 29 Hsu C H, Tsai J L, Lee C Y, et al. Orthographic combinability and phonological consistency effects in reading Chinese phonograms: An event-related potential study. *Brain Lang*, 2009, 108: 56–66
- 30 Maeno T, Gjini K, Iramina K, et al. Event-related potential P2 derived from visual attention to the hemi-space, source localization with LORETA. *Int Cong Seri*, 2004, 1270: 262–265
- 31 Schacter D L, Wig G S, Stevens W D. Reductions in cortical activity during priming. *Curr Opin Neurobiol*, 2007, 17: 171–176
- 32 Henson R N A, Rugg M D. Neural response suppression, hemodynamic repetition effects, and behavioral priming. *Neuropsychologia*, 2003, 41: 263–270
- 33 许贵芳. 不熟练汉英双语者语言表征与切换的 ERP 研究. 硕士学位论文. 天津: 天津师范大学, 2008
- 34 黄贤军, 张钦, 丁锦红, 等. 不同延迟条件下语音词的重复效应. *心理学报*, 2011, 43: 599–607
- 35 Lehtonen M, Cunillera T, Rodriguez-Fornells A, et al. Recognition of morphologically complex words in Finnish: Evidence from event-related potentials. *Brain Res*, 2007, 1148: 123–137
- 36 EI Yagoubi R, Chiarelli V, Mondini S. Neural correlates of Italian nominal compounds and potential impact of headedness effect: An ERP study. *Cogn Neuropsychol*, 2008, 25: 559–581
- 37 Karayanidis F, Andrews S, Ward P, et al. Effects of inter-item lag on word repetition: An event-related potential study. *Psychophysiology*, 1991, 28: 307–318
- 38 Doyle M C, Rugg M D, Wells T. A comparison of the electrophysiological effects of formal and repetition priming. *Psychophysiology*, 1996, 33: 132–147
- 39 Doyle M C, Rugg M D. Word repetition within- and across-visual fields: An event-related potential study. *Neuropsychologia*, 1998, 36: 1403–1415
- 40 Rugg M D, Nieto-Vegas M. Modality-specific effects of immediate word repetition: Electrophysiological evidence. *Neuroreport*, 1999, 10: 2661–2664
- 41 Strien J, Peter P, Verkoeijena N, et al. Electrophysiological correlates of word repetition spacing: ERP and induced band power old/new effects with massed and spaced repetitions. *Int J Psychophysiol*, 2007, 66: 205–214
- 42 Huber D E, Tian X, Curran T, et al. The dynamics of integration and separation: ERP, MEG, and neural network studies of immediate repetition effects. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 2008, 34: 1389–1416
- 43 McDonald C R, Thesen T, Carlsson C, et al. Multimodal imaging of repetition priming: Using fMRI, MEG, and intracranial EEG to reveal spatiotemporal profiles of word processing. *NeuroImage*, 2010, 53: 707–717

- 44 Alvarez R P, Holcomb R J, Grainger J. Accessing word meaning in two languages: An event-related brain potential study of beginning bilinguals. *Brain Lang*, 2003, 87: 290–304
- 45 Holcomb P J, Grainger J. On the time course of visual word recognition: An event-related potential investigation using masked repetition priming. *J Cogn Neurosci*, 2006, 18: 1631–1643
- 46 Grossi G, Coch D. Automatic word form processing in masked priming: An ERP study. *Psychophysiology*, 2005, 42: 343–355
- 47 Brown C M, Hagoort P, Chwilla D J. An event-related brain potential analysis of visual word priming effects. *Brain Lang*, 2000, 72: 158–190
- 48 Patel S H, Azzam P N. Characterization of N200 and P300: Selected studies of the event-related potential. *Int J Med Sci*, 2005, 2: 147–154
- 49 Folstein J R, Petten C V. Influence of cognitive control and mismatch on the N2 component of the ERP: A review. *Psychophysiology*, 2008, 45: 152–170
- 50 James T W, Gauthier I. Repetition-induced changes in BOLD response reflect accumulation of neural activity. *Hum Brain Mapp*, 2005, 27: 37–46
- 51 Grill-Spector K, Henson R, Martin A. Repetition and the brain: neural models of stimulus-specific effects. *Trends Cogn Sci*, 2006, 10: 14–23
- 52 Schweinberger S R, Huddy V, Burton A M. N250r: A face-selective brain response to stimulus repetitions. *Neuroreport*, 2004, 15: 1501–1505
- 53 Bentin S, Mouchetant-Rostaing Y, Giard M H, et al. ERP manifestations of processing printed words at different psycholinguistic levels: Time course and scalp distribution. *J Cogn Neurosci*, 1999, 11: 235–260
- 54 Cao X H, Li S, Zhao J, et al. Left-lateralized early neurophysiological response for Chinese characters in young primary school children. *Neurosci Lett*, 2011, 492: 165–169
- 55 张学新. 汉字拼义理论: 心理学对汉字本质的新定性. *华南师范大学学报(社会科学版)*, 2011, 4: 5–13