

绝句韵律边界的认知加工及其脑电效应*

李卫君 杨玉芳

(中国科学院心理研究所, 北京 100101)

摘要 语言理解过程中, 句子内部的韵律短语边界会诱发反映韵律短语终止的特异性脑电成分终止正漂移 (CPS, closure positive shift), 而句末语调短语边界则会诱发反映句法终止和完整语言单元结束的脑电效应 P3。研究采用汉语特有的语篇绝句, 考察了听者加工绝句中各句末语调短语边界的认知过程及其诱发的脑电效应。结果发现五言绝句内部各语调短语边界分别诱发了时间进程、头皮分布和波幅均相同的 CPS, 表明语篇内部韵律边界加工不受其所处语篇位置的影响; 五言和七言绝句末的韵律边界则分别诱发了一个 P3, 并且前者诱发的 P3 波幅小于后者, 而二者在时间进程和头皮分布上不存在差异。本研究表明, 句末语调短语边界诱发何种脑电效应与其承担的功能有关, 既表示前面信息终止又预期后面信息出现的句末边界会诱发 CPS, 而只表示信息终止的句末边界则会诱发 P3。

关键词 韵律边界; P3; 终止正漂移

分类号 B842

1 前言

韵律边界是口语韵律特征的重要组成部分, 在口语句子和语篇的理解过程中发挥着重要作用。句子产生的研究(要求被试大声朗读句子)发现, 韵律结构和句法结构之间关系密切, 较大的句法边界通常会伴随短语末音段延长, 无声段(Cooper & Paccia-Cooper, 1980; Price, Ostendorf, Shattuck-Hufnagel, & Fong, 1991; Wightman, Shattuck, Ostendorf, & Price, 1992), 以及相对较大的音高移动(Price et al., 1991)。句子理解的研究表明, 听者会即时使用口语中的韵律边界信息, 在句法分析初期引导句子加工, 并消除话语中存在的歧义(Kjelgaard & Speer, 1999; Marslen-Wilson, Tyler, Warren, Grenier, & Lee, 1992; Schepman & Rodway, 2000; Speer, Kjelgaard, & Dobroth, 1996; Steinhauer, Alter, & Friederici, 1999; Warren, 1995)。此外, 成人和婴儿都会即时使

用韵律边界线索约束词汇通达(Christophe, Peperkamp, Pallier, Block, & Mehler, 2004; Gout, Christophe, & Morgan, 2004; Salverda, Dahan, & McQueen, 2003)。总之, 韵律边界在单词, 句子和语篇各个层面的加工过程中都起着极为重要的作用(Frazier, Carlson, & Clifton, 2006), 也得到了研究者的广泛关注。

但是, 受到方法学的限制和传统语言学理论的影响(注重句法和语义的研究, 而相对忽略韵律), 近 10 年人们才开始关注韵律边界的认知神经基础。1999 年, 研究者(Steinhauer et al., 1999) 发现听者在加工句中的韵律短语边界时, 会诱发一个正波, 它对应于韵律短语边界, 主要反映韵律短语的终止, 被研究者称为 CPS (closure positive shift)。它是一个中后部分布的正波, 在中线波幅最大, 但其头皮分布会随着刺激特性的不同发生变化(Li & Yang, 2010; Pannekamp, Toepel, Alter, Hahne, & Friederici,

收稿日期: 2010-04-13

* 国家自然科学基金 (NSFC:60775026)、国家自然科学基金青年基金(NSFC:31000505), 中国科学院心理研究所青年人才科研启动经费 (Y0CX052S01)、脑与认知科学国家重点实验室基金等项目资助。

国外的研究中将本研究中的韵律短语称为语调短语; 本研究采用韵律短语的说法是为了将其与句子末尾的语调短语相区分。

P3 是一类复杂的 ERP 成分, 大致包括 P3a 和 P3b 两类; 两者除了在诱发因素上不同以外, P3a 是一个前中部分布正波, 而 P3b 是一个中后部分布正波。本文中的 P3 均指 P3b。

通讯作者: 杨玉芳, E-mail: yangyf@psych.ac.cn, 电话: 010-64888629

2005)。进一步的研究还表明, CPS 的出现与句法、语义、音素等音段信息无关, 只反映纯粹的韵律信息加工 (Pannekamp et al., 2005; Steinhauer & Friederici, 2001)。不过, 韵律边界和句法边界会发生即时的相互作用 (Bogels, Schriefers, Vonk, Chwilla, & Kerkhofs, 2010; Kerkhofs, Vonk, Schriefers, & Chwilla, 2007), 二者不一致要比一致时诱发波幅更大的 CPS。即使出生五个月的婴儿也对韵律短语边界非常敏感, 不过他们对边界的加工只是一种对声学线索较低水平的感知 (Claudia & Friederici, 2009), 只有到了九个月才会形成对边界的整体感知, 并诱发 CPS (Pannekamp, Weber, & Friederici, 2006)。对口语句子不同层级韵律边界的研究则表明, 除了韵律短语边界, 韵律层级上较低的次要韵律短语边界 (minor phonological phrase boundary) 也能诱发 CPS, 并且无声段长度是导致二者潜伏期和波幅差异的主要因素 (Li & Yang, 2009)。此外, 一些研究发现书面语中的逗号和音乐中的小节边界也能够诱发此脑电效应 (Knosche et al., 2005; Liu, Wang, & Jin, 2010; Nan, Knosche, & Friederici, 2006; Neuhaus, Knosche, & Friederici, 2006; Steinhauer & Friederici, 2001), 因为它们都内隐或外显地引发了与口语韵律边界类似的韵律切分。

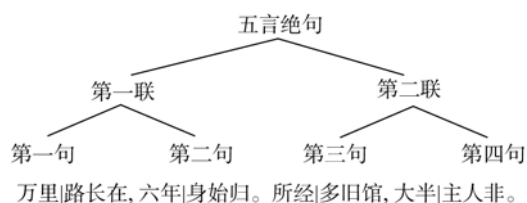
关于边界加工的神经基础, Ischebeck (Ischebeck et al., 2007) 使用 fMRI 技术发现韵律短语边界激活了和韵律加工有关的颞上回 (STG)。通过 MEG (Knosche et al., 2005) 和 fMRI (Nan et al., 2008) 技术发现, 音乐小节边界激活了边缘系统、额下回、额中回和顶内沟等反映记忆和注意加工的区域, 由此表明边界加工不只是对边界声学线索的感知, 还反映了高级的认知加工过程。

综上对句子理解的研究表明, 不管口语还是书面语, CPS 都是由句子内部的韵律短语边界或者逗号诱发的。句子末尾也是一个典型的韵律边界, 对于它是否能够诱发 CPS, 以上研究都没有涉及。实际上, 早在 1975 年, Friedman 等人 (Friedman, Simson, Ritter, & Rapin, 1975) 就发现句末也会诱发一个正效应, 并且波幅远大于句子内部词汇诱发的正波。他们将句末诱发的正效应命名为 P3, 认为它主要反映了句法中止的操作; 只要大脑识别出一个完整的语言单元结束时, 比如读完一个句子, 就会诱发这个正波。随后的一些研究发现, 句子不论是以视觉还是听觉方式呈现, 也不论是要求被试完成词汇再认、句子正误判断还是其他任务, 这个成分

都会在句末稳定地诱发 (Fischler, 1985; Fischler, Bloom, Childers, Arroyo, & Perry, 1984; Kutas & Hillyard, 1980, 1980, 1982, 1983, 1984; McCallum, Farmer, & Pocock, 1984)。尽管研究者们对其头皮分布是否存在偏侧化存在较大争议 (Friedman et al., 1975; Kutas & Hillyard, 1982; Van & Kutas, 1991), 但普遍认为它是一个中后部分布的正波, 在中线附近最显著。

根据以上研究, 似乎可以得出这样一个结论, 即句子内部的韵律短语边界会诱发反映韵律切分的脑电效应 CPS, 而句末语调短语边界则会诱发反映句法终止操作的 P3。那么, 如果一个句子是处于语篇情境当中, 其末尾反映了怎样的加工过程, 并会诱发什么脑电效应呢? 一方面, 一个句子的结束表明一个完整句法单元的终止, 因此句子边界可能会诱发 P3。另一方面, 语篇中某一句子的结束只代表本句的终止, 听者或读者还会根据句法、语义、韵律等信息预期该句后面有其他内容出现。因此在句末完成的是一种切分过程, 从而诱发 CPS。此外, 处于语篇中的句子必然会有先后顺序, 这些不同位置的句子, 其边界加工是否会受到所处位置的影响也还不知道。其中, 语篇末尾的句子最为特殊, 因为读者或听者在这个句末完成的只有终止过程, 我们预期语篇末尾的句子会诱发 P3, 并且终止信息量的大小可能会对其产生影响。

本研究拟使用五言绝句这样一类较为特殊的语篇作为实验材料, 系统考察绝句中不同位置句子边界的认知加工及其诱发的脑电效应。绝句每首两联共四句, 每句字数相同且分别为一个相对完整的语言单元, 对应起承转合四个部分 (如下例所示)。在每句内部, 后三个字在节奏上与前几个字较为松散, 形成所谓的“三字脚” (王力, 2005)。本文中, 我们将三字脚与前面几个字之间形成的停顿称为句内边界 (通过“|”表示)。绝句的结构简单, 短小精悍, 而韵律表现丰富, 适宜于使用 ERP 技术系统考察语篇中不同位置边界加工的问题。更为重要的是, 以七言绝句作为参照, 能够精确地考察绝句末终止信息量是否以及如何影响 P3。



2 研究方法

2.1 被试

20 名(男, 女各 10 人)来自中国农业大学的本科生, 年龄 19~24 岁。所有被试均身心健康、无精神神经病史、右利手、听力和视力正常。

2.2 实验材料

正式实验包括五言绝句, 七言绝句和各种词牌名的宋词各 50 首。使用宋词的主要目的是为了干扰被试对绝句比较规则的节律产生预期。此外,

这些绝句都是事先通过熟悉性评定获得的不熟悉绝句。选取不熟悉的绝句是为了避免被试听完最初的句子就知道后面的内容, 从而影响听者对绝句的正常加工。所有实验材料都由一位男性专业发音人在隔音室中录制, 声音的采样率为 22kHz。五言绝句句内边界前音节(如“里、年、经、半”)、句末边界前音节(如“在、归、馆、非”)和七言绝句句末边界前音节音高和时长特点如图 1 所示。

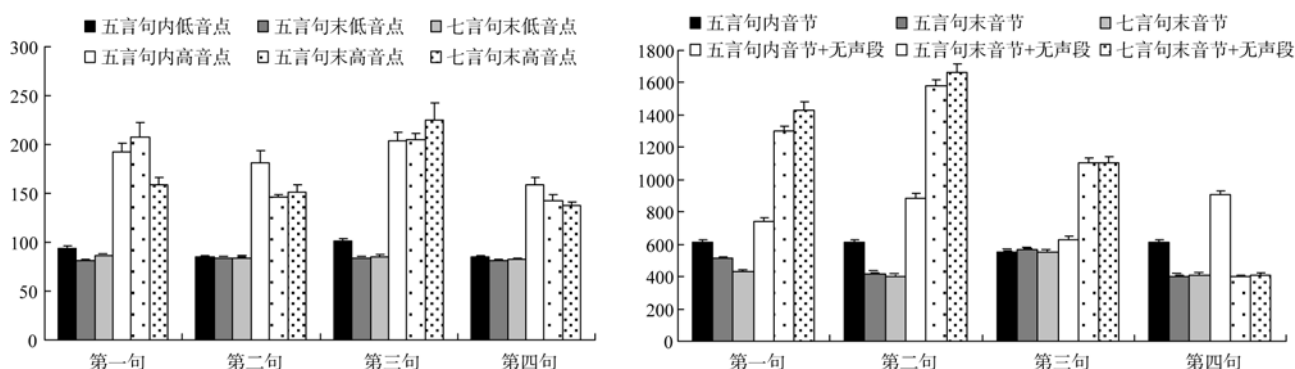


图 1 五言绝句和七言绝句音高和时长特点

注: 左侧表示五言绝句句内、句末和七言绝句句末边界前音节音高低音点和高音点的音高值; 右侧表示五言绝句句内、句末和七言绝句句末边界前音节时长以及音节和无声段时长之和。

统计分析以五言绝句句内、句末和七言绝句句末边界前音节的位置作为自变量, 以各音节的音高和时长值作为因变量进行一元方差分析。根据沈炯提出的双线模型(沈炯, 1985), 汉语中音域下限(低音点)在语流中的延伸反映节奏单元结构, 而音域上限(高音点)跟语义加强有关。本研究同时考察低音点和高音点^{*}。绝句末尾的无声段无法确定其具体数值, 所以音节与无声段时长之和的统计分析只分析两种绝句的前三句。

音高低音点和高音点的方差分析结果显示, 五言绝句句内边界前音节低音点差异显著, $F(3, 148)=16.96, p<0.001$ 。多重比较表明, 除第二句和第四句差异不显著以外, 其他所有成对比较差异都显著, $ps<0.001$ 。五言绝句句内边界前音节高音点差异显著, $F(3, 167)=4.61, p<0.005$ 。多重比较表明, 第三句和第四句差异显著, $p<0.005$, 其他所有成对

比较差异不显著。五言绝句和七言绝句句末边界前音节低音点差异不显著, 五言: $F(3, 145)=3.42, p>0.05$; 七言: $F(3, 120)<1$; 而高音点差异显著, 五言: $F(3, 165)=23.03, p<0.001$; 七言: $F(3, 168)=14.22, p<0.001$ 。多重比较表明, 五言绝句中, 第一句和第三句句末边界前音节高音点分别显著高于第二句和第四句, $ps<0.001$; 而七言绝句中第三句句末音节高音点显著高于其他各句, $ps<0.05$ 。

时长分析表明, 五言绝句句内边界前音节时长差异显著, $F(3, 196)=5.16, p<0.005$ 。多重比较表明, 第三句显著短于其他各句, $ps<0.05$, 其他所有成对比较差异不显著。五言绝句句内边界前音节和无声段时长之和的差异显著, $F(3, 196)=34.54, p<0.001$ 。多重比较表明, 除第二句和第四句之间的差异不显著以外, 其他所有成对比较差异都显著, $ps<0.005$ 。五言绝句和七言绝句句末边界前音节

* 音节的高音点和低音点分别指这个音节音高曲线的最大值和最小值。阴平声只取高音点, 上声只取低音点, 阳平和去声分别取其高音点和低音点。由于绝句中每个句内和句末音节的声调不可能完全相同, 因此得到的高音点和低音点数目就有差别, 具体体现在对音高低音点和高音点分析中, 各句音节数量不同。本研究, 经方差齐性检验发现, 所比较的各句内和句末音节的音高低音点和高音点音高值方差齐性。

时长差异显著, 五言: $F(3,196)=52.55, p<0.001$; 七言: $F(3,196)=49.30, p<0.001$ 。多重比较表明, 两种绝句第三句句末边界前音节时长显著长于其他各句, $ps<0.005$, 并且五言绝句第一句末边界前音节时长还显著长于第二句和第四句, $ps<0.001$ 。五言绝句和七言绝句各句末边界前音节和无声度时长之和差异显著, 五言: $F(2,147)=60.29, p<0.001$; 七言: $F(2,147)=34.65, p<0.001$ 。多重比较表明, 两种绝句各句末边界前音节和无声度时长之和成对比较差异均显著, $ps<0.001$ 。

最后, 对五言绝句和七言绝句末尾音节的分析表明, 二者在音高低音点、高音点和时长上差异均不显著, 低音点: $t(47)=0.53, p>0.05$; 高音点: $t(97)=0.72, p>0.05$; 时长: $t(98)=0.61, p>0.05$ 。

2.3 实验程序

通过 E-prime 在计算机上执行实验程序。被试在一间光线柔和的隔音室内, 坐于一张舒适的椅子上, 两眼注视屏幕中央, 双眼距离屏幕 1m。屏幕中央首先出现一个“+”, 提醒被试集中注意力。300ms 以后, 听觉呈现一首诗, 要求被试认真听诗歌。听完诗歌后, 完成词汇辨别任务。具体是, 如果屏幕上呈现“空格”二字, 即按空格键继续; 如果是其他词汇, 则判断这个词汇在刚才的诗歌中是否出现过(占总材料数的 1/3)。按“F”键或“J”键进行反应, 比率各自为 50%, 并在被试间进行左右手的平衡。正式实验分 4 个 block 进行, 同一类型诗歌连续呈现不超过 3 个, 实验持续 1 小时左右。实验前, 告诉被试在 block 之间可以眨眼和适当活动身体, 在屏幕上出现词汇(“空格”或者其他词语)时可以眨眼休息。在被试通过音箱听实验材料的同时, 记录被试的脑电信号。

2.4 ERP 记录与分析

实验采用根据国际 10-20 系统扩展的 64 导电极帽, 以 NeuroScan ERP 工作站记录 EEG 信号。头皮与电极之间阻抗小于 5 k Ω , 滤波带通 0.05–100Hz, 采样频率为每导联 500Hz。以位于左眼上下眶的电极记录垂直眼电, 位于眼外侧 1.5cm 处的左右电极记录水平眼电。以双侧乳突平均值为参考, 具体是, 在记录中所有电极参考置于左乳突的一只参考电极, 离线分析时再次以置于右乳突的一只有效电极进行再参考, 即从各导联信号中减去 1/2 该参考电极所记录的信号。

根据垂直眼电矫正眨眼伪迹, 并进行 40Hz 低通滤波, 自动排除其他波幅大于 $\pm 75\mu V$ 的伪迹信

号。分析时程为五言绝句每句第二个音节、最后一个音节, 和七言绝句末尾音节开始前 200ms 和随后的 1500ms。分别叠加并平均各边界前音节诱发的 EEG, 得到根据句内和句末边界前音节锁时的 ERP 总平均波形。采用 SPSS 13.0 统计软件 ERP 波形的测量指标进行重复测量方差分析, 并对不满足球形检验的统计效应采用 Greenhouse-Geisser 法进行矫正 p 值。

3 结果

3.1 五言绝句各句内 ERP 波形结果

从图 2 可以看到, 五言绝句各句内边界前音节分别诱发了一个位于基线上方的漂移, 并且第一句句内边界前音节诱发的漂移与其他各句比相对较正。统计分析以边界前音节开始后 700~1200ms 时间窗的平均波幅作为测量指标, 进行条件(第一句内, 第二句内, 第三句内和第四句内), 半球(左侧: F3/C3/P3; 中线: FZ/CZ/PZ; 右侧: F4/C4/P4)和区域(前部: F3/FZ/F4; 中部: C3/CZ/C4; 后部: P3/PZ/P4)的三因素重复测量方差分析。对五言绝句各句内边界前音节诱发的脑电效应进行方差分析表明, 条件的主效应显著, $F(3,57)=3.21, p<0.05$ 。然而, 多重比较(采用 Bonferroni 方法, 以下同)结果表明, 所有成对比较差异均不显著, 只是第一句句内边界诱发的脑电效应其波幅大于第四句, $p=0.069<0.1$ 。此外, 条件和半球的交互作用显著, $F(6,114)=3.26, p<0.01$ 。简单效应分析表明, 在左半球, 条件的主效应不显著, $F(3,57)=1.96, p>0.05$; 在中线和右半球, 条件的主效应显著, 中线: $F(3,57)=3.41, p<0.05$; 右半球: $F(3,57)=4.78, p<0.01$ 。多重比较表明, 在右半球, 第一句句内边界诱发脑电效应的波幅显著大于第四句, $p<0.001$ 。

通过以上统计分析结合图 2 可见, 五言绝句第一句句内边界相对其他各句诱发了较大的波幅; 如果五言绝句各句末诱发的脑电效应其波幅大于第一句句内边界诱发的脑电效应, 其必然大于其他各句内边界。因此, 在进一步的分析中, 我们选取第一句句内边界前音节诱发的脑电波作为句内边界的代表, 以确定五言绝句各句末边界诱发的脑电成分。

3.2 五言绝句各句末 ERP 波形结果

从图 3 可以看到, 相对于句内边界, 五言绝句各句末边界分别诱发了一个正效应; 前三句句末诱发的正效应不存在差别, 而第四句诱发的正效应在

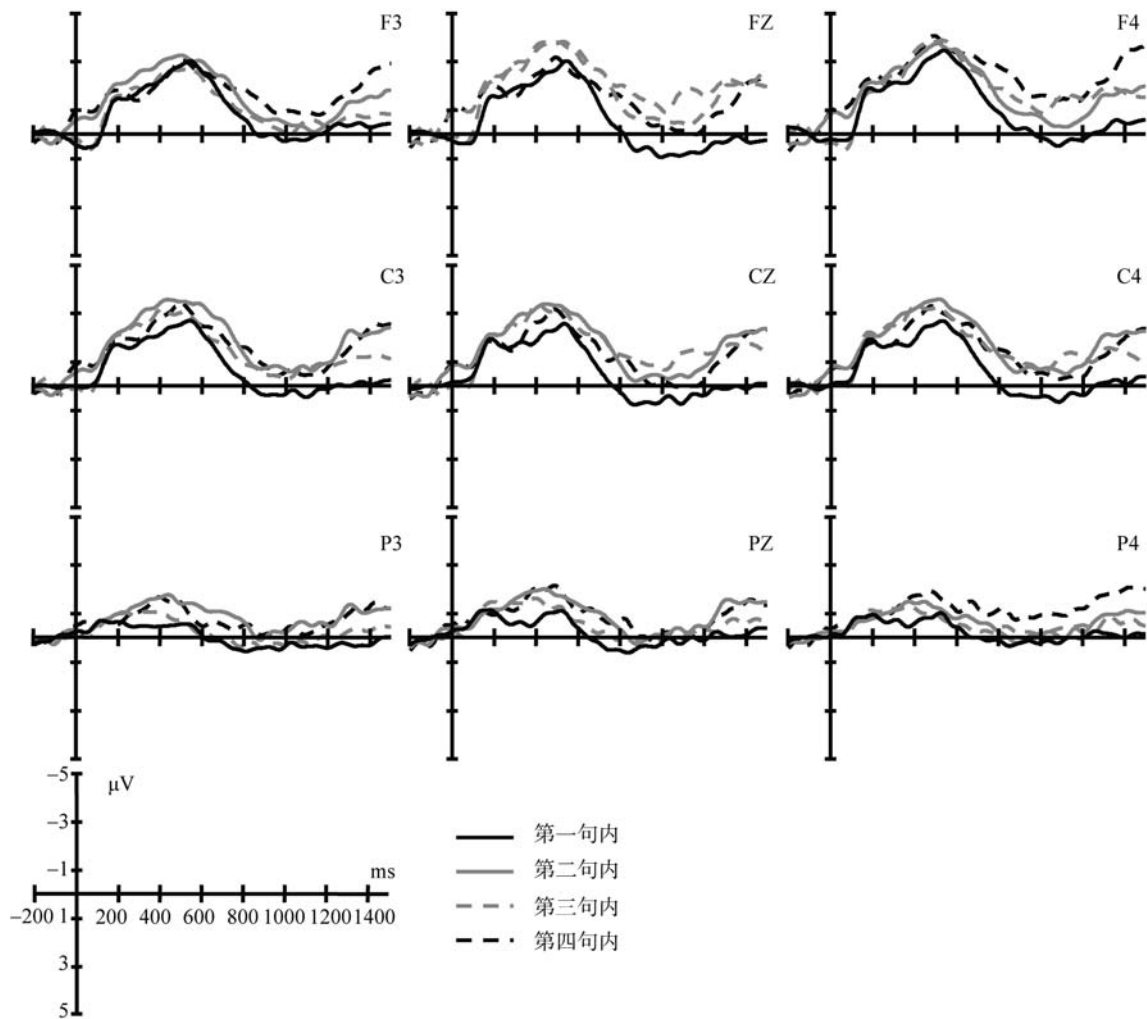


图2 被试(20个)加工五言绝句诱发的总体平均波形

注: 图为以五言绝句每句内第二个音节开始作为分析起点, 四个句内边界诱发的脑电效应。

波幅上明显大于其他各句。前三句句末边界诱发的正效应开始于大约 600ms, 持续 500ms 或者更长, 广泛分布在头皮区域; 第四句诱发的正成分大约开始于 550ms, 在 700~1200ms 最明显, 在中后部波幅最大*。

统计分析以边界前音节开始后 700~1200ms 时间窗的平均波幅作为测量指标, 进行条件(第一句内, 第一句末, 第二句末, 第三句末和第四句末), 半球和区域的三因素重复测量方差分析。选择该时间窗, 一方面参考了相关研究; 另一方面是因为从本研究的 ERP 总平均图中可以看到, 四个句末边

界与句内边界, 以及第四句末边界和其他各句末边界诱发脑电效应的差别主要表现在这一时间窗内。方差分析结果表明, 条件的主效应显著, $F(4,76) = 76.74, p < 0.001$ 。多重比较表明, 句内边界 ($M = 0.15 \mu V, SE = 0.33$) 分别和第一句句末边界 ($M = 1.67 \mu V, SE = 0.46$), 第二句句末边界 ($M = 1.63 \mu V, SE = 0.36$), 第三句句末边界 ($M = 1.71 \mu V, SE = 0.38$) 和第四句句末边界 ($M = 6.33 \mu V, SE = 0.39$) 差异显著, $ps < 0.05$ 。此外, 第四句句末边界诱发正效应的波幅显著大于其他三句句末边界, $ps < 0.001$, 其他成对比较差异不显著。条件和半球的交互作用显著,

* 从图3中可以看到各句末边界诱发的正波之前都有一个负波, 这与以往的研究一致(Kerkhofs, Vonk, Schriefers, & Chwilla, 2007; Bogels, Schriefers, Vonk, Chwilla, & Kerkhofs, 2010; Van & Kutas, 1991)。但是, 现在还不清楚这个负波到底反映了哪种加工过程。本研究中, 末尾句诱发的负波波幅明显大于前三句诱发的负效应, 但似乎并未影响随后的正波(末尾句诱发的正波相对于前三句更正), 因此本研究不分析此负效应。

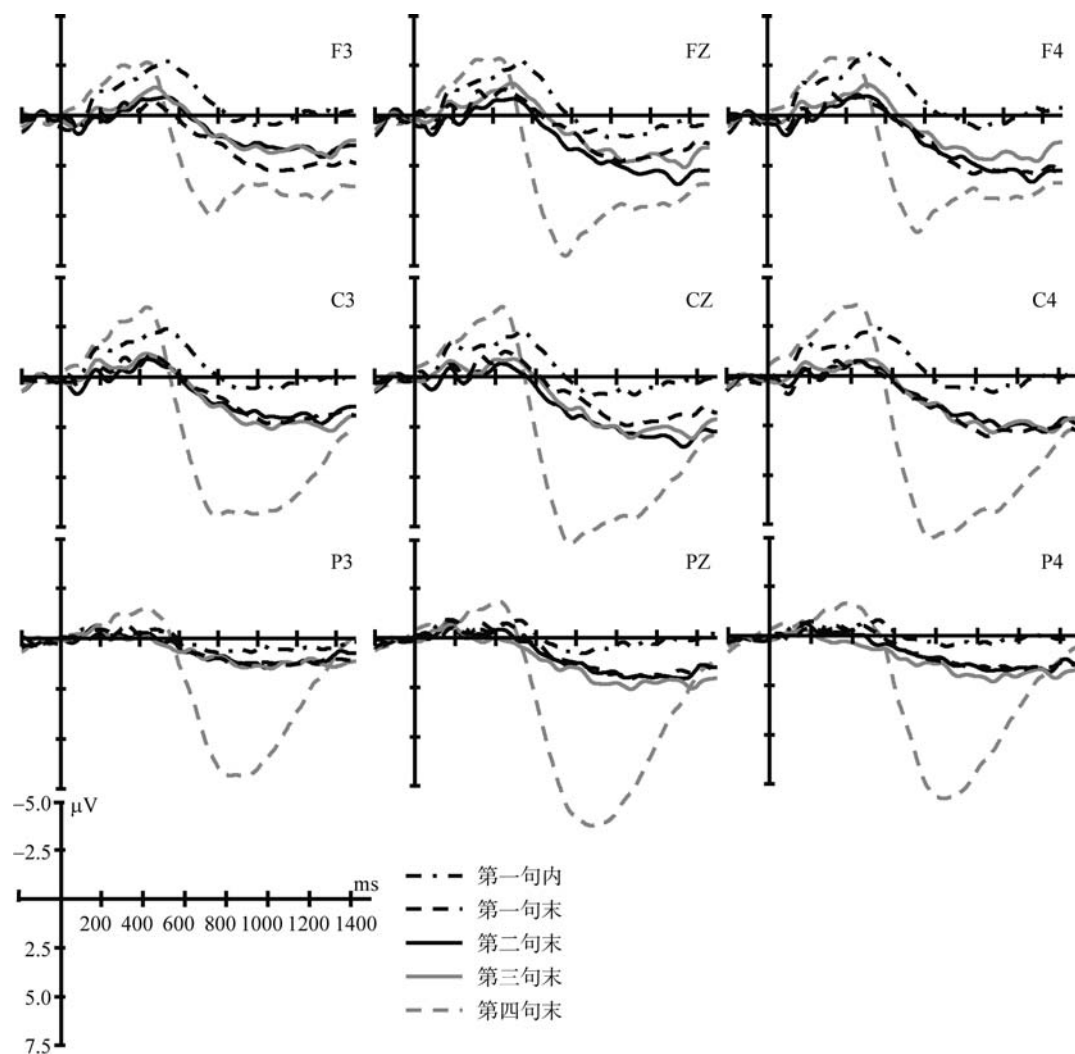


图3 被试(20个)加工五言绝句诱发的总体平均波形

注：图为以五言绝句第一句句内边界前音节和各句句末边界前音节开始作为分析起点，句内边界和四个句末边界诱发的脑电效应。

$F(8, 152)=4.33, p<0.001$ 。简单效应分析表明，在左半球， $F(4,76)=57.54, p<0.001$ ，中线， $F(4,76)=63.68, p<0.001$ 和右半球， $F(4,76)=68.40, p<0.001$ ，条件的主效应均显著。进一步的多重比较结果表明，条件效应广泛分布在头皮各个区域。此外，条件和区域的交互作用显著， $F(4,76)=4.61, p<0.05$ 。简单效应分析表明，在前部， $F(4,76)=20.16, p<0.001$ ，中部， $F(4,76)=62.09, p<0.001$ 和后部， $F(4,76)=48.57, p<0.001$ ，条件的主效应均显著。多重比较表明，在前部和中部，句内边界和所有句末边界差异显著， $ps<0.05$ ，并且第四句句末边界诱发的脑电波波幅显著大于其他各句末边界， $ps<0.001$ ；在后部，句内边界仅与第三句和第四句句末边界差异显著， $p<0.05$ ，同时第四句句末边界诱发脑电效应波幅显著大于其他各句末边界， $ps<0.001$ 。

通过视觉观察图3，并结合以上统计分析可知，五言绝句前三句句末边界和第四句句末边界诱发的脑电效应在形态、波幅上存在很大的不同。为进一步考察五言绝句前三句句末边界诱发正波的特性，进一步的统计分析以边界前音节开始后的700~1200ms时间窗的平均波幅作为测量指标，进行条件(第一句末，第二句末和第三句末)，半球和区域的三因素重复测量方差分析。结果表明，条件主效应不显著， $F(2,38)<1$ 。半球主效应显著， $F(2,38)=5.53, p<0.01$ 。成对比较表明，中线波幅显著大于左半球， $p<0.01$ ，其他成对比较差异不显著。区域主效应，条件和半球的交互作用以及条件和区域的交互作用均不显著， $F(2,38)=2.40, p>0.05$ ； $F(4,76)=1.90, p>0.05$ ； $F(4,76)=1.61, p>0.05$ 。

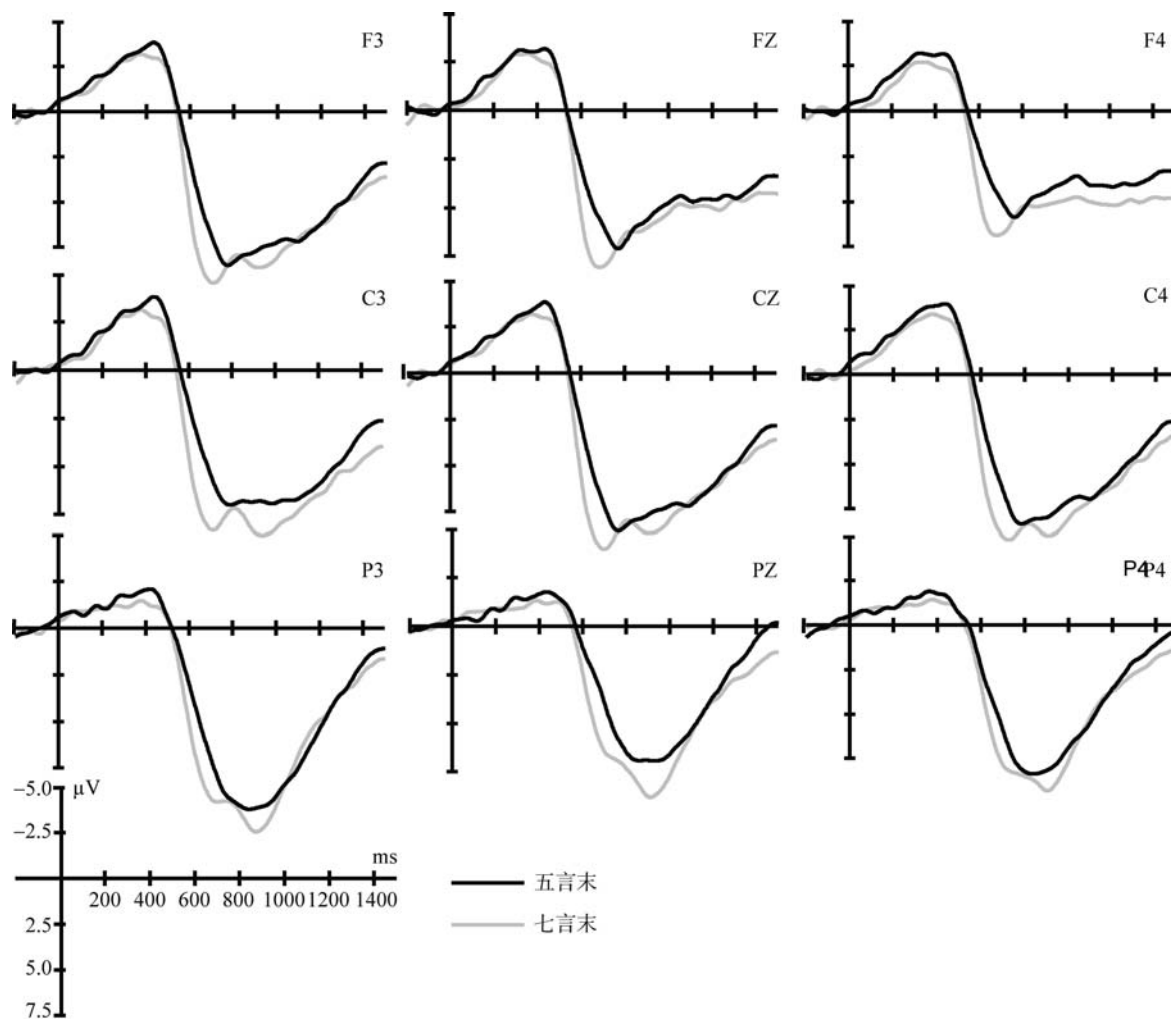


图4 被试(20个)加工五言绝句和七言绝句末的总体平均波形

注: 图为以两种绝句第四句最后一个音节开始, 选择9个点绘制的脑电波形图。

3.3 五言绝句和七言绝句末 ERP 波形结果

从图4可以看到, 五言绝句和七言绝句末分别诱发了一个正波, 两者开始时间基本相同, 地形图分布类似, 只是七言绝句与五言绝句相比, 其诱发的正效应波幅更大。为了探索五言绝句和七言绝句末诱发正效应在时间进程上的差异, 统计分析从末尾音节呈现开始, 以100ms为一时间窗口获得其平均波幅, 共完成15个方差分析。具体做法是以100ms时间窗口的平均波幅作为因变量, 以条件, 半球和区域作为自变量; 并将连续显著的时间窗口合并在一起进行第二个方差分析。统计分析中, 大量的分析会使得犯一类错误的可能性增加, 因此只有至少两个连续的时间窗口达到显著才视为显著。

以100ms为一时间窗口的探索性统计分析结果如表1所示。由表可见, 五言绝句末和七言绝句末诱发的正波在500~800ms这个时间窗口波幅存

在显著差异。方差分析以这一时间窗口的平均波幅作为因变量, 以条件, 半球和区域作为自变量进行统计表明, 条件主效应显著, $F(1,19)=21.73$, $p<0.001$, 七言绝句末诱发波幅 ($M=5.29\mu\text{v}$, $SE=0.63$) 显著大于五言绝句 ($M=3.72\mu\text{v}$, $SE=0.51$)。半球主效应显著, $F(2,38)=12.20$, $p<0.001$ 。多重比较表明, 左半球波幅 ($M=3.72$, $SE=0.50$) 显著小于中线 ($M=5.25\mu\text{v}$, $SE=0.68$) 和右半球 ($M=4.54\mu\text{v}$, $SE=0.53$)。区域主效应不显著, $F(2,38)<1$ 。条件和半球, $F(2,38)<1$, 条件和区域, $F(2,38)=1.05$, $p>0.05$ 的交互作用不显著。另外, 在一些时间窗口(如表1所示)还表现出半球和区域的主效应。对这些不同时间窗的半球和区域的主效应进行进一步的统计分析发现, 在这些时间窗口中, 一致表现出左半球波幅显著小于中线和右半球, 而前部波幅显著小于中部和后部区域的结果模式。

表 1 五言绝句和七言绝句末脑电效应重复测量方差分析结果.

时间窗口 (ms)	条件 (1, 19)	半球 (2, 38)	区域 (2, 38)
0~100	$F < 1$	$F = 4.82$ $p = 0.014$	$F = 5.93$ $p = 0.021$
100~200	$F < 1$	$F = 4.33$ $p = 0.031$	$F = 5.52$ $p = 0.019$
200~300	$F < 1$	$F = 1.28$	$F = 21.49$ $p = 0.000$
300~400	$F = 1.03$	$F = 3.04$	$F = 21.07$ $p = 0.000$
400~500	$F = 2.50$	$F < 1$	$F = 17.76$ $p = 0.000$
500~600	$F = 5.83$ $p = 0.026$	$F = 4.31$ $p = 0.021$	$F < 1$
600~700	$F = 40.03$ $p = 0.000$	$F = 13.22$ $p = 0.000$	$F = 1.47$
700~800	$F = 11.65$ $p = 0.003$	$F = 17.86$ $p = 0.000$	$F = 4.39$ $p = 0.039$
800~900	$F = 1.962$	$F = 20.33$ $p = 0.000$	$F = 14.79$ $p = 0.000$
900~1000	$F = 5.64$ $p = 0.028$	$F = 13.49$ $p = 0.000$	$F = 26.47$ $p = 0.000$
1000~1100	$F = 2.54$	$F = 6.84$ $p = 0.003$	$F = 14.47$ $p = 0.000$
1100~1200	$F < 1$	$F = 2.66$	$F = 6.24$ $p = 0.012$
1200~1300	$F = 1.85$	$F = 1.20$	$F = 5.63$ $p = 0.017$
1300~1400	$F = 3.04$	$F < 1$	$F = 8.19$ $p = 0.004$
1400~1500	$F = 9.75$ $p = 0.006$	$F < 1$	$F = 9.61$ $p = 0.002$

注：在分析的全部时间窗口中，均不存在条件和半球、区域的交互作用，因此都未报告。

4 讨论

本研究系统考察了五言绝句内部各句内、句末边界以及七言绝句末的认知加工过程及其诱发的脑电效应。结果发现，五言绝句各句末边界和七言绝句末分别诱发了一个正效应，并且五言绝句和七言绝句末诱发的正效应在波幅上显著大于五言绝句内部各句末边界诱发的正波。五言绝句内部各句末边界诱发的正效应，对应于语调短语边界，在极性和波幅上与句内韵律短语边界(Li & Yang, 2009; Steinhauer et al., 1999) 诱发的正效应非常类似，因此我们将其确定为 CPS。五言绝句和七言绝句末诱发的正波与以往文献(Friedman et al., 1975; Van & Kutas, 1991) 报道的句末诱发的 P3 在诱发条件、极性、波幅等方面相同，因此将其确定为 P3。此外，五言绝句内部各句末边界诱发的 CPS 不受其所处位置的影响，在头皮分布、时间特点和波幅方面均不存在差别，而七言绝句末诱发的 P3 在波幅上显著大于五言绝句相应位置诱发的 P3。

根据已有研究并结合本实验的结果可知，CPS 和 P3 都出现在边界位置，并且都是双侧中央顶叶分布的正波，在中线附近波幅最大。但是二者在性质和特点上存在本质的不同。首先，P3 与 CPS 相比，持续时间更长，波幅更大，并且开始潜伏期更早(如图 3 所示)，这使得我们很难将它们视为同一种脑电效应。另外，由逗号诱发的 CPS 与韵律短语边界诱发的 CPS 相比，开始潜伏期较晚，时程较短(Steinhauer & Friederici, 2001); 而不论是视觉还是听觉呈现材料诱发的 P3 都没有这样的差别(Fischler, 1985; McCallum et al., 1984)。其次，P3 总是出现在完整语言单元结束的位置，如单独呈现的句子末尾或者绝句末尾；CPS 则都由句子或者绝句内部的韵律边界诱发。因此，P3 反映句法终止操作和完整语言单元的结束，而 CPS 主要反映了韵律切分(prosodic phrasing)。最后，有研究发现(Friedman et al., 1975)，即使被试在正式实验前已经熟知实验材料，并且在实验过程中重复多遍，他们感知到句子结束时仍然会诱发 P3。而有关 CPS 的研究则表

明, 如果句子或者乐句在实验过程中呈现多次的话, 相应的边界将不再诱发 CPS (Knosche et al., 2005; Strelnikov, Vorobyev, Chernigovskaya, & Medvedev, 2006)。换句话说, 只有那些能够充分引起韵律切分感的材料才会诱发 CPS, 而听者或读者只要感知到一个完整的语言单元结束, 就会诱发 P3, 不受重复效应的影响。综上可见, P3 和 CPS 是两种不同性质的脑电成分, 存在本质的不同。下面我们将结合以往的研究, 分别讨论和分析 P3 和 CPS 这两种脑电效应。

4.1 P3

本研究一个有趣的发现是, 五言绝句和七言绝句末都诱发了 P3, 而处在绝句内部的句末则不会诱发这一脑电效应。这表明, P3 只有在读者或听者感知到完整语言单元完全结束时才会诱发, 而与是否为句子末无关。尽管绝句内部的各个句末也表明一个个完整语言单元的终止, 但其仅代表本句的结束, 听者知道随后还有内容出现, 因此在此情况下完成的是一种“不完全的”终止或整合, 不能诱发 P3。一些研究通过由背景句和目标句组成的问答句对发现, 除了目标句句末会诱发 P3 以外, 目标句中的焦点也会诱发这一脑电效应 (Bornkessel, Schlesewsky, & Friederici, 2003; Cowles, Kluender, Kutas, & Polinsky, 2007)。研究者认为这可能是由于焦点成分也引发了与句末类似的整合加工过程。

对于句末(绝句末)和焦点诱发 P3 的结果, Verleger (1988) 提出的背景终止(context closure)假说能够很好地予以解释。他认为被试在处理高度结构化的刺激时, 除了对感知到的每一个刺激进行反应以外, 还会将连续呈现的刺激整合成一个有意义的背景; 同时对将会终止这个背景的刺激进行预期, 一旦遇到那些能够终止(close)这些背景的刺激就会诱发 P3。因此, P3 是一种反映背景终止过程的电生理指标。语言是一种高度结构化的刺激。在语言理解过程中, 被试会即时加工读到或听到的每一个音节, 并将这些音节组织成一个整体, 同时预期下一个音节的出现, 而当一个句子或语篇的最后一个音节出现时, 被试将会终止这一信息单元并诱发 P3。同样, 对于由背景句引导的目标句中的焦点, 被试只要感知到此信息即会完成对话语篇的终止加工, 而不需要预期随后信息的出现, 从而由焦点诱发了 P3。

通过比较五言绝句和七言绝句末诱发的 P3 可知, 七言绝句末诱发的 P3 波幅显著大于五言绝句。

这可能是由于七言绝句相对于五言绝句来讲, 包含了较多的音节, 因此听者需要终止的信息量更大造成的, 即信息终止量越大, P3 波幅越高。这符合我们的预期。不过, 根据 Verleger 的背景终止假说, 则会有另外一种解释。他认为影响 P3 波幅的一个重要因素是被试加工刺激时需要付出的努力。在本研究中, 实验任务要求被试认真听诗歌, 并在听完诗歌后完成词汇辨别任务。由于七言绝句相对于五言绝句包含了更多的音节, 因此被试需要付出更多的认知资源用于记忆和加工七言绝句中的音节, 以完成实验任务, 这便导致七言绝句相对于五言绝句诱发了波幅更大的 P3。这两种解释都是基于五言绝句和七言绝句音节数量的差别, 因此本研究无法确定影响 P300 波幅的根本原因。进一步的研究可以通过比较字数相同, 但是记忆或加工难度不同的材料(如词频不同的实验材料)进一步考察此问题。另外, 五言绝句和七言绝句由于音节数量不同, 必然导致朗读(听)二者的时间存在差别, 由此, 时长也可能是一个潜在的影响 P3 波幅的因素。今后的研究可以让同一发音人以不同的速度朗读相同的实验材料来考察时长对 P3 的影响。最后, 过去有关句子末尾脑电效应的研究中, 对于 P3 的头皮分布是否存在偏侧化一直没有明确的结论, 本研究使用五言绝句和七言绝句一致表明, 此正波在右半球的波幅显著大于左半球。

4.2 CPS

本研究扩展了 CPS 的诱发条件。过去有关 CPS 的研究, 主要考察了句子内部的韵律短语边界和韵律层级上较低的次要韵律短语边界的加工(Li & Yang, 2009; Pannekamp et al., 2005; Steinhauer et al., 1999; Steinhauer & Friederici, 2001), 发现听者感知到这两类边界时能够诱发这一脑电成分。尽管一些研究使用语篇(Hruska, C., Alter, K., Steinhauer, K., & Steube, 2001; Kerkhofs et al., 2007; Toepel, Pannekamp, & Alter, 2007)考察了韵律边界加工的问题, 但这些研究中诱发 CPS 的韵律边界仍然是嵌于句子内部的韵律短语边界, 而非语篇水平上的句子或者段落边界。本研究通过采用五言绝句这类汉语特有的语篇发现, 不仅句子内部的韵律短语和次要韵律短语边界可以诱发 CPS, 而且句末的语调短语边界也能够诱发 CPS。尽管以前的研究(Isel, Alter, & Friederici, 2005; Pannekamp et al., 2005; Steinhauer et al., 1999)表明, CPS 反映韵律短语的终止, 由韵律短语边界诱发, 本研究则进一步表明,

CPS 的诱发与边界的类型无关,而与这个边界承载的功能有关。某一边界如果既完成对前面信息的终止,又准备对随后的内容进行加工就会诱发 CPS,即只要听者将连续的语流组织切分成相应的韵律单元就会诱发 CPS,而与韵律单元的大小无关。

此外,五言绝句内部各句末诱发的 CPS 不受其所处位置的影响,在时间特点和波幅上均没有差异。音乐中有关 CPS 的研究(Knosche et al., 2005; Nan, Knosche, Zysset, & Friederici, 2008)发现,听者对边界的加工是一个复杂的认知过程,不仅包括对边界声学线索的感知,还完成了与记忆和注意等有关的高级认知加工过程。作为反映边界加工的 ERP 指标 CPS 来讲,它应该是一种反映了多种认知加工过程的复杂 ERP 成分。尽管本研究无法确定 CPS 究竟反映了哪些认知过程,但可以肯定的是,边界加工不止反映了对边界声学线索的感知。因为绝句内部各边界在音高和时长方面都存在不同程度的差别(如图 1 所示),却诱发了几乎完全相同的 CPS。那么听者是如何加工绝句中不同的韵律边界呢?一种可能是,听者将绝句作为两联或者四个独立的句子,分别在句末或联末完成各种认知加工。但在这种情况下,绝句末也应该诱发一个 CPS,因为在每个句末或联末完成的加工是相同的。然而实验结果并非如此。另一种可能是,听者将每首绝句都视为一个由四个句子组成的有机整体,在感知到绝句内部每个句末边界时,他们都会将边界前信息暂时储存在短时记忆中,对其进行回顾式加工,同时做好准备加工即将出现的信息,以实现边界前后信息的整合。在绝句内部每一个边界处,被试都要完成这些加工,并且终止和整合的信息量相同,从而产生了相同的 CPS。

综上,本研究系统考察了听者加工绝句句末边界的认知加工过程及其诱发的脑电效应。研究发现,CPS 是听者对连续语流进行韵律切分的脑电指标,而 P3 则反映了听者对完整语言单元的终止。研究深化了我们对 CPS 和 P3 本质及其影响因素的认识。今后的研究可以通过 ICA, PCA 等技术,进一步分析 CPS 和 P3 包含了哪些亚成分,并分别对应了哪些认知加工过程,以进一步厘清二者的相同和不同之处以及它们之间的关系。

参 考 文 献

Bogels, S., Schriefers, H., Vonk, W., Chwilla, D. J., & Kerkhofs, R. (2010). The interplay between prosody and syntax in sentence processing: the case of subject-and

- object-control verbs. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(5), 1036–1053.
- Bornkessel, I., Schlesewsky, M., & Friederici, A. D. (2003). Contextual information modulates initial processes of syntactic integration: the role of inter-versus intrasentential predictions. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 29(5), 871–882.
- Christophe, A., Peperkamp, S., Pallier, C., Block, E., & Mehler, J. (2004). Phonological phrase boundaries constrain lexical access i. Adult data. *Journal of Memory and Language*, 51(4), 523–547.
- Cooper, W. E., & Paccia-Cooper, J. (1980). *Syntax and speech*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Cowles, H. W., Kluender, R., Kutas, M., & Polinsky, M. (2007). Violations of information structure: an electrophysiological study of answers to Wh-questions. *Brain and Language*, 102(3), 228–242.
- Fischler, D. G. (1985). Brain potentials during sentence verification: automatic aspects of comprehension. *Biological psychology*, 21(2), 83–105.
- Fischler, I., Bloom, P. A., Childers, D. G., Arroyo, A. A., & Perry, J. N. (1984). Brain potentials during sentence verification: late negativity and long-term memory strength. *Neuropsychologia*, 22(5), 559–568.
- Frazier, L., Carlson, K., & Clifton, C. J. (2006). Prosodic phrasing is central to language comprehension. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(6), 244–249.
- Friedman, D., Simson, R., Ritter, W., & Rapin, I. (1975). The late positive component (P300) and information processing in sentences. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 38(3), 255.
- Gout, A., Christophe, A., & Morgan, J. L. (2004). Phonological phrase boundaries constrain lexical access ii. Infant data. *Journal of Memory and Language*, 51(4), 548–567.
- Hruska, C., Alter, K., Steinhauer, K., & Steube, A. (2001). Misleading dialogues: human brain's reaction to prosodic information. *Paper presented at the Paper presented at the Oralite et Gestualite*, Aix en, France.
- Isel, F., Alter, K., & Friederici, A. D. (2005). Influence of prosodic information on the processing of split particles: ERP evidence from spoken German. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(1), 154–167.
- Kerkhofs, R., Vonk, W., Schriefers, H., & Chwilla, D. J. (2007). Discourse, syntax, and prosody: the brain reveals an immediate interaction. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(9), 1421–1434.
- Kjelgaard, M. M., & Speer, S. R. (1999). Prosodic facilitation and interference in the resolution of temporary syntactic closure ambiguity. *Journal of Memory and Language*, 40(2), 153–194.
- Knosche, T. R., Neuhaus, C., Haueisen, J., Alter, K., Maess, B., & Witte, O. W., & Friederici, A. D. (2005). Perception of phrase structure in music. *Human Brain Mapping*, 24(4), 259–273.
- Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980). Event-related potentials to semantically inappropriate and surprisingly large words. *Biological Psychology*, 11(19S0), 99–116.
- Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980). Reading senseless sentences: brain potentials reflect semantic incongruity. *Science*, 207(4427), 203–205.
- Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1982). The lateral distribution of event-related potentials during sentence processing.

- Neuropsychologia*, 20(5), 579–590.
- Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1983). Event-related brain potentials to grammatical errors and semantic anomalies. *Memory & Cognition*, 11(5), 539–550.
- Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1984). Brain potentials during reading reflect word expectancy and semantic association. *Nature*, 307(5947), 161–163.
- Li, W., & Yang, Y. (2009). Perception of prosodic hierarchical boundaries in mandarin Chinese sentences. *Neuroscience*, 158(4), 1416–1425.
- Li, W., & Yang, Y. (2010). Perception of Chinese poem and its electrophysiological effects. *Neuroscience*, 168(3), 757–768.
- Liu, B., Wang, Z., & Jin, Z. (2010). The effects of punctuations in Chinese sentence comprehension: an ERP study. *Journal of Neurolinguistics*, 23(1), 66–80.
- Marslen-Wilson, W. D., Tyler, L. K., Warren, P., Grenier, P., & Lee, C. S. (1992). Prosodic effects in minimal attachment. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 45(1), 73–87.
- McCallum, W. C., Farmer, S. F., & Pocock, P. V. (1984). The effects of physical and semantic incongruities on auditory event-related potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, 59(6), 477–488.
- Nan, Y., Knosche, T. R., & Friederici, A. D. (2006). The perception of musical phrase structure: a cross-cultural ERP study. *Brain Res*, 1094(1), 179–191.
- Nan, Y., Knosche, T. R., Zysset, S., & Friederici, A. D. (2008). Cross-cultural music phrase processing: an fMRI study. *Human Brain Mapping*, 29(3), 312–328.
- Neuhaus, C., Knosche, T. R., & Friederici, A. D. (2006). Effects of musical expertise and boundary markers on phrase perception in music. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(3), 472–493.
- Pannekamp, A., Toepel, U., Alter, K., Hahne, A., & Friederici, A. D. (2005). Prosody-driven sentence processing: an event-related brain potential study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(3), 407–421.
- Pannekamp, A., Weber, C., & Friederici, A. D. (2006). Prosodic processing at the sentence level in infants. *Neuroreport*, 17(6), 675–678.
- Price, P. J., Ostendorf, M., Shattuck-Hufnagel, S., & Fong, C. (1991). The use of prosody in syntactic disambiguation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 90(6), 2956–2970.
- Salverda, A. P., Dahan, D., & McQueen, J. M. (2003). The role of prosodic boundaries in the resolution of lexical embedding in speech comprehension. *Cognition*, 90(1), 51–89.
- Schepman, A., & Rodway, P. (2000). Prosody and parsing in coordination structures. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology A*, 53(2), 377–396.
- Speer, S. R., Kjelgaard, M. M., & Dobroth, K. M. (1996). The influence of prosodic structure on the resolution of temporary syntactic closure ambiguities. *Journal of Psycholinguistic Research*, 25(2), 249–271.
- Steinhauer, K., Alter, K., & Friederici, A. D. (1999). Brain potentials indicate immediate use of prosodic cues in natural speech processing. *Nature Neuroscience*, 2(2), 191–196.
- Steinhauer, K., & Friederici, A. D. (2001). Prosodic boundaries, comma rules, and brain responses: the closure positive shift in erps as a universal marker for prosodic phrasing in listeners and readers. *Journal of Psycholinguistic Research*, 30(3), 267–295.
- Strelnikov, K. N., Vorobyev, V. A., Chernigovskaya, T. V., & Medvedev, S. V. (2006). Prosodic clues to syntactic processing—a pet and ERP study. *Neuroimage*, 29(4), 1127–1134.
- Toepel, U., Pannekamp, A., & Alter, K. (2007). Catching the news: processing strategies in listening to dialogs as measured by erps. *Behavioral and Brain Functions*, 3(1), 1–13.
- Van, P. C., & Kutas, M. (1991). Influences of semantic and syntactic context on open-and closed-class words. *Memory & Cognition*, 19(1), 95–112.
- Verleger, R. (1988). Event-related potentials and cognition: a critique of the context updating hypothesis and an alternative interpretation of p3. *Behavioral and Brain Sciences*, 11, 343–427.
- Warren, P. (1995). Prosody, phonology, and parsing in closure ambiguities. *Language and Cognitive Processes*, 10(5), 457–486.
- Wightman, C. W., Shattuck, H. S., Ostendorf, M., & Price, P. J. (1992). Segmental durations in the vicinity of prosodic phrase boundaries. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 91, 1707–1717.
- Shen, J. (1985). *The pitch range and intonation of the tone in mandarin Chinese*. Beijing, China: Beijing University Press.
- [沈炯. (1985). *北京话声调的音域和语调*. 北京: 北京大学出版社.]
- Wang, L. (2005). *Chinese prosody*. 2nd ed. Shanghai: Shanghai Education Publishing Group.
- [王力. (2005). *汉语诗律学*. 上海: 上海教育出版社.]

The Cognitive Processing of Prosodic Boundary and Its Related Brain Effect in Quatrain

LI Wei-Jun; YANG Yu-Fang

(*Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

Abstract

Prosodic boundary, as an integral part of prosodic features in spoken language, is very important in sentence and discourse comprehension. Recently, researchers have shown increasing interest in the neural mechanism of prosodic boundary processing.

Numerous studies have found that CPS, a special ERP component reflecting the closure of phonological phrase, could be induced by phonological phrase boundary embedded in a sentence. Also, researches have demonstrated that intonational phrase boundary in the end of a sentence consistently elicited P3, which reflects the operation of "syntactic closure" as well as the completeness of language unit. The present study aims to investigate the cognitive processing of intonational phrase boundary embedded in discourse and its related brain effect using ERP.

To explore the processing of intonational phrase boundary in discourse, quatrain was used, which is composed of four sentences and five or seven characters in each sentence. Twenty (10 males) healthy undergraduates participated in the experiment. The participants were told to listen carefully to each poem, and complete a word discrimination task. Specifically, if the word "Space" was presented, they were asked to press the spacebar to continue. If other words were presented, they were required to press the "F" or "J" key to indicate whether the word appeared in the poem they had just heard. The EEG was recorded from 64 scalp channels using electrodes mounted in an elastic cap. Boundary-related ERPs were calculated for a 1500 ms epoch including a 200 ms pre-boundary syllable baseline.

It was found that the three intonational phrase boundaries embedded in the quatrain elicited CPS respectively, with no differences in time course, amplitude and scalp distribution, indicating that prosodic boundary processing was not influenced by its position in discourse. Moreover, the final sentence of both five-character-quatrain and seven-character-quatrain evoked the P3 effect, with the amplitude elicited by the former one lower than that of the later one, but no differences in scalp distribution and onset latency.

The present study suggests that boundaries conveying both the closure of preceding information and the prediction of upcoming information will induce CPS, while boundaries reflecting only the closure of preceding information will elicit P3. The nature and characteristics of these two components were also discussed in the present study.

Key words prosodic boundary; P3; closure positive shift