

语言类比推理的神经机制：来自 ERP 研究的证据*

赵 鸣^{1,2} 徐知媛³ 刘 涛⁴ 杜锋磊² 李永欣² 陈飞燕²

(¹ 浙江大学语言与认知研究中心, 杭州 310028) (² 浙江大学物理系交叉学科实验室, 杭州 310027)

(³ 浙江大学外国语言文化与国际交流学院, 杭州 310058) (⁴ 江苏省语言与神经认知科学重点实验室, 徐州 221009)

摘 要 实验通过“A:B::C:D”范式, 采用事件相关电位技术, 考察了语言类比推理的神经机制。实验结果显示: 图式生成阶段诱发出 N400 和 P300 成分, 反映了类比源域的词对概念通达和词对关系抽取的加工过程; 类比映射阶段诱发出 N400 和晚期负成分 LNC, 反映了类比目标域前项词汇概念意义的激活, 以及将已获取的图式关系类比映射于目标域, 并进行推理的加工过程。研究结果表明, 语言类比推理的神经机制复杂, 牵涉到一系列认知加工步骤; LNC 成分与类比映射阶段的加工关系密切, 其波幅和头皮分布的广泛性情况与类比映射关系的复杂程度成正比。

关键词 语言; 类比推理; 图式生成; 类比映射; ERP; LNC

分类号 B842.5

1 前言

类比推理(analogical reasoning) (以下简称“类推”)是指将一个已知场景中的概念映射到另一个场景中, 从而推理出新的结论或解释 (Green, Fugelsang, Kraemer, Shamosh, & Dunbar, 2006)。其中, 已知场景为类比源域, 所被映射的场景为类比目标域。类推能力是人类特有的创造性能力 (Penn, Holyoak, & Povinelli, 2008), 也是人类思维的核心 (Krawczyk, McClelland, Donovan, Tillman, & Maguire, 2010), 对于人类社会的发展至关重要, 因此, 类推机制的研究意义重大。

研究表明, 类推机制具有两个重要的加工步骤: (一)图式生成(schema induction), 指从作为类比源域的已知场景或事物间抽取共享的关系或特征; (二)类比映射(analogy mapping), 指将所获取的图式关系映射到类比目标域的场景或事物中, 并且在工作记忆中检索合适的选择项, 以使类比目标域具有与类比源域相同的抽象关系 (Green et al., 2006;

Krawczyk et al., 2010; Volle, Gilbert, Benoit, & Burgess, 2010)。为了精细地考察类推不同阶段的加工机制, 实验多采用“A:B::C:D”的范式。在该范式下, 首先需要抽取作为类比源域“A:B”之间的抽象关系, 然后将其类比映射于目标域“C”项, 并推理出使目标域和源域具有一致性关系的“D”项。因此, 类推过程的具体加工步骤在“A:B::C:D”范式中能够得到充分地反映。利用该范式, 研究者考察了图形 (Cho et al., 2010; Eslinger et al., 2009; Krawczyk et al., 2010)、数字 (Richland, Zur, & Holyoak, 2007)、字母 (Volle et al., 2010)等方面的类推机制, 但对于语言类推机制方面的研究较少。

语言类推是各种类推中非常重要并且普遍存在的形式, 最直接地反映在隐喻语言的表达和理解上。通过类推, 隐喻语言在两类不同的事物或概念间建立起相似性关系, 让我们能够以对熟悉事物的感知角度把握非熟悉事物的属性特点, 比如“细胞是化工厂”; 同时也让人能够以独特的视角看待熟悉事物的某一特征, 比如“困难是弹簧” (Bunge,

收稿日期: 2011-07-27

* 国家自然科学基金(030900389)、国家社科基金重大项目(11&ZD088)、浙江省自然科学基金(Y2080520, Y2100206)、浙江省哲社规划课题(08CGJY014YB)、江苏省社会科学基金项目(11YYC011)、江苏省高校哲学社会科学基金重点项目(09SJB740001)、徐州师范大学科研基金项目(11XLR47)、中央高校基本科研业务费专项资金资助。

通讯作者: 陈飞燕, E-mail: chenfy@zju.edu.cn, mmzhao1@163.com

Wendelken, Badre, & Wagner, 2005)。因而, 隐喻语言的理解从本质上可以视作类推加工的过程(Steinhart, 2001)。

最近, 研究者开始采用功能性磁共振成像技术(functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)探讨语言类推的神经机制(Green et al., 2006; Bunge et al., 2005; Green, Kraemer, Fugelsang, Gray, & Dunbar, 2010; Wendelken, Nakhnenko, Donohue, Carter, & Bunge, 2008; Luo et al., 2003)。实验大都采用“A:B::C:D”范式, 要求被试判断词对 1 (如: “鼓手: 乐队”)和词对 2 (如: “士兵: 军队”)是否具有相同的语义关系, 实验结果表明前额皮层(the prefrontal cortex, PFC)在类推中发挥重要作用。这一结论在相关的临床研究中也得到充分证明, PFC 是否损伤或发育成熟直接影响到类推能力的运用(Krawczyk et al., 2008; Crone et al., 2009; Morsanyi & Holyoak, 2010)。研究者认为 PFC 可能负责在类推中类比源域的关系整合以及类比映射的相关加工。然而, fMRI 技术虽然具有精确的脑区空间分辨率, 但是由于血流动力学的响应较慢, 激活区较多反映的是整体认知过程的累积效应, 并不能十分清晰地直接反映出类推机制不同子加工阶段的认知过程。

与 fMRI 相比, 事件相关电位技术(event-related potentials, ERP)具有毫秒级的高时间分辨率, 有利于实时动态地探测大脑认知加工进程。Qiu, Li, Chen 和 Zhang (2008)首次采用 ERP 技术对类推机制的不同加工阶段进行了研究。实验要求被试判断两对字母串刺激是否具有相同的顺序关系(如: abc:abd::ijk:ijl)。结果显示, 图式生成阶段诱发出与字母知识获取相关的 N400 成分, 以及与字母关系整合相关的 P300 成分; 类比映射阶段诱发出与类比目标域字母信息激活相关的 N400 成分, 以及与图式关系类比映射于目标域相关的晚期负成分(late negative component, LNC)。但是, 目前尚未开展采用 ERP 技术考察语言类推机制的实验研究。

综上所述, 类推机制的研究还有待于进一步深入。首先, 针对语言类推机制方面的研究仍有欠缺。这反映在相关问题的探讨主要集中于 fMRI 的实验研究, ERP 方面的实验研究仅有字母顺序类推一项。然而, 字母顺序抽象关系的类推机制并不能完全代表其他形式的类推加工, 尤其不能代表语言类推机制。例如相关的 fMRI 研究发现, 在图形抽象关系的类推加工中仅左半球激活(Wharton et al., 2000), 而在语言类推中却有双侧半球的共同参与

(Luo et al., 2003)。并且对多种类推形式进行广泛地研究, 将更有助于类推加工普遍机制的建立; 其次, 类比映射是类推加工中重要的操作步骤, 但对其机制的探讨还不够充分深入。这表现在对类比映射机制的研究主要集中于对类比项“C”的相关分析上, 例如“香蕉: 水果::老虎: ?”中“?(动物)”的推理, 需要将类比源域“香蕉: 水果”间的类属关系类比映射于“老虎”, 因而类比项“老虎”的加工过程反映了类比源域“A:B”的抽象关系向“C”项的类比迁移, 这一过程属于较高层次上的类比映射加工。然而, 在日常生活中更多存在的是 A、B 事物/概念间的类比映射, 例如“老师: 园丁”, 这是“A:B”事物间相似性特征和概念结构更为直接地类比迁移和映射, 但是目前研究尚未对于这两种不同的类比映射机制进行比较分析。

因此, 本研究将利用“A:B::C:D”实验范式采用 ERP 技术来探测语言类推机制, 对类推过程中的图式生成和类比映射阶段的加工进行分析, 以期更为细致地了解语言类推机制不同阶段的加工特点; 同时, 本研究将比较分析上述两种类推映射机制的异同, 从而更加深入地探讨其加工机制。因此, 实验将选用具有隐喻关系的词对类推, 例如“老师: 园丁::学生: 花朵”。这是基于两方面的考虑: 一方面, 如前文所述, 隐喻语言理解在本质上可以视为类推, 因而这类语言现象为我们提供了探测语言类推机制的有利窗口; 另一方面, 与其他语义关系类推相比(如类属关系), 隐喻关系词对类推过程包含了两种类型类比映射加工, 即, “老师: 园丁”的图式生成需要在“老师”和“园丁”两类概念域间建立一种类比映射; 同时, 对于类比项“D (花朵)”的推理又需要将“老师: 园丁”之间的抽象关系类比映射于“学生”, 因而, 这为实验比较两种类推映射加工提供了条件。

根据相关的 ERP 研究, 我们预期本实验可能得到的结果是: (1)由于在语言类推中, 其首要条件是对词语概念的通达以及词对间语义关系的加工。研究发现, N400 成分是反映语义加工的可信赖指标(Kutas & Federmeier, 2011), 因而, 在语言类推的图式生成和类比映射阶段将很可能首先诱发出 N400 成分; (2)在图式生成阶段, 需要抽取出类比项之间的抽象关系, 这是完成类推任务重要的类推线索。这一加工步骤可能诱发出 P300 成分, 该成分在 Qiu 等(2008)字母顺序类推的图式生成阶段中也有诱发, 并且, 其他方面的研究表明, P300 能够

反映对刺激评估/分类的操作加工过程(Polich, 2007); (3)LNC 成分是与类比映射加工最为密切的脑电成分(Qiu et al., 2008), 因此隐喻词对 A、B 事物概念间的类比映射加工, 以及将图式生成阶段所获取的抽象关系类比映射于类比项“C”的加工, 都将很可能诱发出 LNC 成分。Qiu 等(2008)研究表明 LNC 成分的波幅与加工难度成正比, 同时相关的 fMRI 研究也发现推理难度系数越大, 所参与的脑区则越多(Krawczyk, McClelland, & Donovan, 2011), 因此, 两种类比映射加工很可能在 LNC 的波幅和头皮分布方面存在差异。

2 方法

2.1 被试

共有 14 名母语为汉语的高校大学生参加本实验(男女比例为 1:1, 年龄范围为 19~26 岁)。所有被试均为右利手, 视力正常或矫正后正常, 无任何精神和神经疾病史, 自愿参与本实验, 实验前签署知情同意书和实验协议, 实验结束后适当付酬。

2.2 刺激材料

从《现代汉语词典(第 5 版)》(中国社会科学院语言研究所词典编辑室编, 北京:商务印书馆, 2006 年版)中筛选出双音节名词作为实验刺激材料。每个 trial 包含 4 个名词, 共计 150 个 trial。类推词对关系分 3 种, 每种各包含 50 个 trial: (1)隐喻关系(如:“胸怀:大海::时间:金钱”)。通过隐喻词对类推可以探测语言类推机制, 比较不同类型类比映射机制的异同; (2)类属关系(如:“面包:食品::冰箱:家电”)。类属词对类推在图式生成阶段不存在 A、B 概念间的类比映射加工, 只存在将“A:B”的抽象关系类比映射于“C”的加工, 因而其加工过程可以与隐喻词对类推相比较, 以对比不同类型类比映射机制的差异, 并且有助于归纳出语言类推机制的一般特点; (3)同形关系(如:“铅笔:铅笔::台灯:台灯”)。同形词对类推可视为推理成分和关系具有最高的相似性(Holyoak & Thagard, 1995), 相比其他类推关系最为简单, 同时又包含有类推的基本加工阶段, 在本实验中作为基线任务。此外, 为了使正误判断

数量对等, 另加入 150 个类推错误的 trial, 其中“A:B”仍为上述三种词对关系, “C:D”为其他较为常见的词对关系, 例如反义关系(如:“起点:终点”)、整体—部分关系(如:“车子:车轮”)或脚本关系(如:“宾馆:旅客”)等, 从而造成类比源域与目标域间推理关系错误。

不参与 ERP 实验母语为汉语的 20 名被试(男女比例为 1:1, 年龄范围为 20~28 岁)完成词对关系可接受度的 7 度量表问卷调查(1=不可接受; 7=非常接受), 可接受度 ≥ 5.0 的词对入选为实验材料, 最终进入正式实验刺激材料共计 600 个双音节名词, 且三种类推条件选用词语的平均词频不存在显著性差异($p>0.05$) (《现代汉语频率词典》, 北京语言学院语言教学研究所编, 北京:北京语言学院出版社, 1986 版)。

2.3 实验程序和任务

实验在隔音、亮度适中的电磁屏蔽室内进行, 被试双手拿按键盒, 双眼水平注视计算机屏幕中央, 视距为 100 cm。被试在正式实验前进行简短练习, 以熟悉实验任务; 为了减少记录时的伪迹, 要求被试在实验过程中尽量少眨眼, 放松、少动。

实验采用“A:B::C:D”范式进行。所有的 trial 被随机编排后分为 5 个 Block, 均在计算机屏幕中央呈现, 字体颜色为银色, 背景色为灰色, Block 之间有短暂休息。实验流程如图 1 所示。每个 trial 首先呈现提示符“+”, 呈现时间为 500 ms; 随后依次呈现:作为类比源域的词对(水平视角 9.3°, 垂直视角 1.9°, 呈现时间 3000 ms)、作为类比目标域词对的前项词语(水平视角 4.0°, 垂直视角 1.9°, 呈现时间 3000 ms)、作为类比目标域词对的后项词语(水平视角 4.0°, 垂直视角 1.9°, 呈现时间 2500 ms); trial 内刺激之间的时间间隔为 300~500 ms 随机。要求被试在第二个词对的后项词语呈现后, 对两个词对是否具有一致的语义关系进行尽快地按键反应, 反应手在被试间交叉平衡。

2.4 脑电数据记录

采用 Neuroscan Synamps 2 记录脑电, 被试佩戴 Quick-Cap 64 导联电极帽, 电极以国际 10~20 系统为基础放置。在线记录脑电时, 以左侧耳后乳突

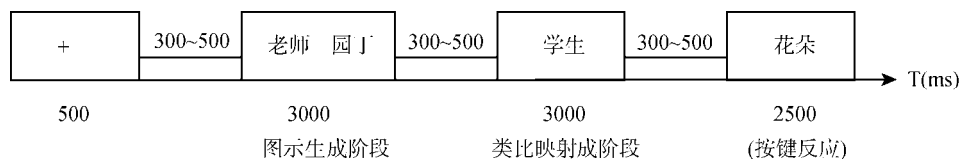


图 1 刺激流程图

为参考, 离线分析时重新转换成双侧乳突连线为参考。同时在双眼外侧安置电极记录水平眼电, 在左眼上下眶安置电极记录垂直眼电, 接地点在 FPz 和 Fz 的中点, 头皮电阻在 5 k Ω 以下, 采样率为 1000 Hz, 模拟滤波带通为 DC-100 Hz。

2.5 脑电数据处理与分析

使用 Neuroscan 4.3.3 对采集的脑电进行离线分析处理。利用回归的方法去除眼电干扰, 分析时段为刺激呈现前 200 ms (作为基线) 至呈现后 3000 ms, 其中波幅大于 $\pm 100 \mu V$ 的脑电分段被剔除, 并对判断正确的 trial 进行类型叠加平均, 最终分别得到对应于图式归纳阶段和类比映射阶段的 3 类刺激 ERP 曲线: 隐喻词对类推、类属词对类推、同形词对类推。

从 ERP 总平均图可以看出, 图式生成阶段 3 种条件所诱发的 ERP 成分差异主要表现在(图 2): 400 ms 左右达到最大峰值且具有左半球偏侧化的负成分(N400); 550 ms 左右诱发的脑区分布广泛的正成分(P300); 以及隐喻词对从 1300 ms 左右诱发的晚期负成分(LNC), 其波形在左前脑区最为明显。类比映射阶段 3 种条件所诱发的 ERP 成分差异主要表现在(图 3): 400 ms 左右达到最大峰值的 N400 成分和 550 ms 左右诱发的 LNC 成分上。根据相关文献和对总平均图的观察, 选择 3 个时窗对图式生成阶段存在差异的 ERP 成分的平均幅值进行统计分析: 300~550 ms (N400)、550~1300 ms (P300)、1300~3000 ms (LNC); 选择 2 个时窗对类比映射阶段存在差异的 ERP 成分的平均幅值进行统计分析: 300~550 ms (N400)、550~3000 ms (LNC)。为了考察不同 ERP 成分在前、后脑区和左、右半球分布上的差异, 将大脑皮层划分成 4 个兴趣区(regions of interest, ROIs): 左前(F7, F5, F3, FT7, FC5, FC3)、右前(F8, F6, F4, FT8, FC6, FC4)、左后(P7, P5, P3, PO7, PO5, PO3)、右后(P8, P6, P4, PO8, PO6, PO4), 运用 SPSS 17.0 统计软件包将各 ROI 电极点的幅值平均后再进行类型(隐喻词对类推、类属词对类推、同形词对类推) $\times$ 脑区(前、后) $\times$ 半球(左、右)的三因素重复测量的方差分析。采用 Greenhouse-Geiss 法对 p 值校正。本文只报告具有统计学意义的显著性差异结果。

3 结果

3.1 行为数据

行为数据结果如表 1 所示。在反应时方面, 同

形词对类推判断反应时最短, 隐喻词对类推用时最长。重复测量方差分析表明反应时类型主效应显著, $F(2,26)=112.07$, $p<0.001$, 事后比较显示隐喻词对类推反应时显著慢于其他两种类推条件($p<0.001$)。在正确率方面, 同形词对类推正确率最高, 隐喻词对类推正确率最低。重复测量方差分析表明正确率类型主效应显著, $F(2,26)=30.61$, $p<0.001$, 事后比较显示隐喻词对类推正确率显著低于其他两种条件($p<0.001$)。行为数据统计分析结果说明三种类推条件相比, 同形词对类推判断最为简单, 适宜作为基线任务; 隐喻词对类推难度最大。

表 1 三种类推条件的反应时和正确率($M \pm SD$)

	隐喻词对类推	类属词对类推	同形词对类推
反应时(ms)	1124 $\pm$ 187	841 $\pm$ 115	587 $\pm$ 76
正确率(%)	88 $\pm$ 4	96 $\pm$ 2	97 $\pm$ 3

3.2 ERP 数据

3.2.1 图式生成阶段 ERP 结果 (1) N400 整体统计分析显示, 类型主效应显著, $F(2,26)=4.89$, $p=0.02$; 类型 $\times$ 脑区 $\times$ 半球交互作用边缘性显著, $F(2,26)=3.55$, $p=0.07$ 。分别对各 ROI 进行分析, 发现左前($F(2,26)=4.68$, $p=0.02$)和左后脑区($F(2,26)=4.20$, $p=0.04$)类型主效应显著。事后比较显示在这两个脑区中, 隐喻词对类推诱发的 N400 成分幅值显著大于类属词对类推(左前: $F(1,13)=10.59$, $p=0.01$; 左后: $F(1,13)=13.67$, $p<0.01$)。

(2) P300 整体统计分析显示, 类型主效应显著, $F(2,26)=4.39$, $p=0.02$, 无类型和其他因素交互作用。事后比较显示, 与隐喻词对类推相比, 类属词对类推($F(1,13)=7.02$, $p=0.02$)和同形词对类推($F(1,13)=5.41$, $p=0.04$)诱发的 P300 波幅显著更正。

(3) LNC 为了更细致地对 1300~3000 ms 内的 LNC 成分进行分析, 分为 1300~1800 ms, 1800~2300 ms 和 2300~3000 ms 三个时窗, 进行时窗 $\times$ 类型 $\times$ 脑区 $\times$ 半球的重复测量方差分析。结果显示, 时窗主效应显著, $F(2,26)=5.23$, $p=0.04$; 时窗 $\times$ 类型 $\times$ 脑区交互作用显著, $F(4,52)=3.07$, $p=0.05$ 。进一步对三个时窗内 LNC 的幅值进行类型 $\times$ 脑区 $\times$ 半球的重复测量方差分析。

在 1300~1800 ms 时窗内, 类型主效应显著, $F(2,26)=4.06$, $p=0.04$; 类型 $\times$ 脑区 $\times$ 半球交互作用显著, $F(2,26)=4.04$, $p=0.04$ 。对各 ROI 分析显示, 左前脑区类型主效应显著, $F(2,26)=6.56$, $p=0.01$ 。事后比

较显示, 隐喻词对类推诱发的 LNC 成分波幅显著大于类属词对类推($F(1,13)=8.46, p=0.01$)和同形词对类推($F(1,13)=8.35, p=0.01$)。

在 1800~2300 ms 时窗内, 类型主效应显著, $F(2,26)=4.99, p=0.03$; 类型×脑区×半球交互作用显著, $F(2,26)=6.95, p=0.01$ 。对各 ROI 分析显示, 左前 ($F(2,26)=6.11, p=0.01$) 和右前脑区 ($F(2,26)=3.61, p=0.05$) 类型主效应显著。事后比较显示, 隐喻词对类推诱发的 LNC 成分幅值显著大于类属词对类推(左前: $F(1,13)=6.73, p=0.02$; 右前: $F(1,13)=5.36, p=0.04$)

和同形词对类推(左前: $F(1,13)=8.48, p=0.01$)。

在 2300~3000 ms 时窗内, 类型主效应显著, $F(2,26)=6.49, p=0.01$; 类型×半球 ($F(2,26)=3.70, p=0.04$) 和类型×脑区×半球 ($F(2,26)=4.37, p=0.03$) 交互作用显著。对各 ROI 分析发现, 左前 ($F(2,26)=8.59, p<0.01$) 和右前脑区 ($F(2,26)=7.21, p<0.01$) 类型主效应显著。事后比较显示, 隐喻词对类推诱发的 LNC 成分波幅显著大于类属词对类推(左前: $F(1,13)=9.51, p=0.01$; 右前: $F(1,13)=11.21, p=0.01$) 和同形词对类推(左前: $F(1,13)=13.94, p<0.01$)。

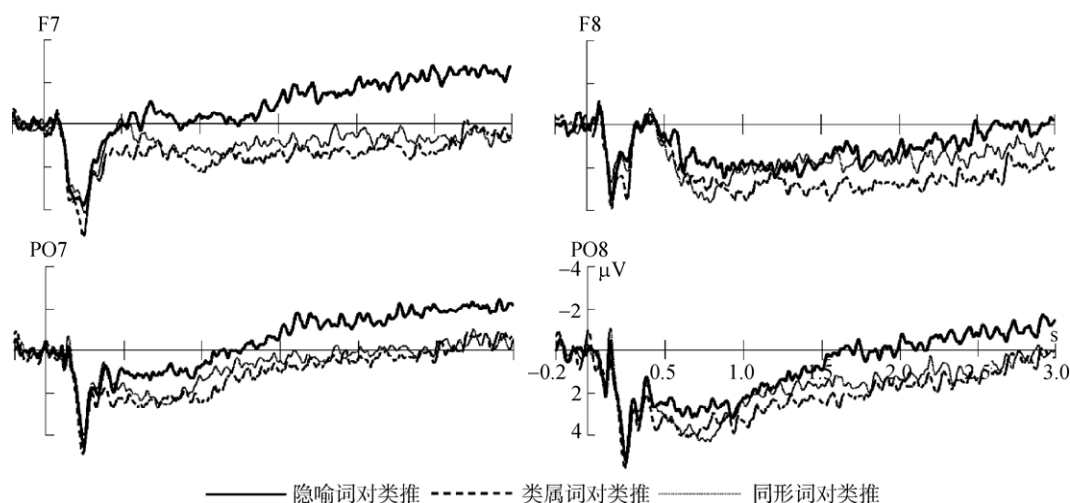


图2 图式生成阶段刺激诱发的 ERP 波形图

3.2.2 类比映射阶段 ERP 结果 (1) N400 整体统计分析显示, 类型主效应显著, $F(2,26)=6.33, p=0.01$, 无类型与其他因素的交互作用。事后比较显示, 与同形词对类推相比, 隐喻词对类推($F(1,13)=6.90, p=0.02$)和类属词对类推($F(1,13)=9.07, p=0.01$)诱发的 N400 成分显著更负。

(2) LNC 为了更细致地对 550~3000 ms 内 LNC 成分进行分析, 分为 550~800 ms, 800~1800 ms 和 1800~3000 ms 三个时窗, 进行时窗×类型×脑区×半球的重复测量方差分析, 结果显示, 时窗主效应显著, $F(2,26)=41.70, p<0.001$; 时窗×类型交互作用显著, $F(4,52)=4.20, p=0.03$; 时窗×脑区×半球交互作用 ($F(2,26)=3.25, p=0.09$) 和时窗×类型×脑区×半球交互作用 ($F(4,52)=2.35, p=0.09$) 边缘性显著。进一步对三个时窗内 LNC 的幅值进行类型×脑区×半球的重复测量方差分析:

在 550~800 ms 时窗内, 类型主效应显著, $F(2,26)=5.40, p=0.01$, 无类型与其他因素的交互作用。事后比较显示, 与同形词对类推相比, 隐喻词对类推诱发的 LNC 成分波幅显著更负, $F(1,13)=12.98, p<0.01$ 。

在 800~1800 ms 时窗内, 类型主效应显著, $F(2,26)=10.78, p<0.01$; 类型×脑区×半球交互作用显著, $F(2,26)=5.47, p=0.02$ 。分别对各 ROI 进行分析, 发现各脑区类型主效应显著 ($p<0.05$), 且与左后和右后脑区相比, 左前和右前脑区类型主效应更大(左前: $F(2,26)=9.29$; 右前: $F(2,26)=7.07$; 左后: $F(2,26)=6.91$; 右后: $F(2,26)=6.93$)。事后比较显示, 与同形词对类推相比, 隐喻词对类推($F(1,13)=14.96, p<0.01$) 和类属词对类推 ($F(1,13)=12.81, p<0.01$) 诱发的 LNC 成分波幅显著更负。

在 1800~3000 ms 时窗内, 类型主效应显著, $F(2,26)=9.27, p<0.01$; 类型×脑区×半球交互作用显著, $F(2,26)=5.10, p=0.01$ 。对各 ROI 进行分析显示, 各脑区类型主效应显著 ($p<0.05$), 且前部脑区比后部脑区类型主效应更大(左前: $F(2,26)=11.56$; 右前: $F(2,26)=9.97$; 左后: $F(2,26)=5.71$; 右后: $F(2,26)=6.81$)。事后比较显示, 与同形词对类推相比, 隐喻词对类推($F(1,13)=13.18, p<0.01$) 和类属词对类推 ($F(1,13)=11.77, p<0.01$) 诱发的 LNC 成分波幅显著更负。

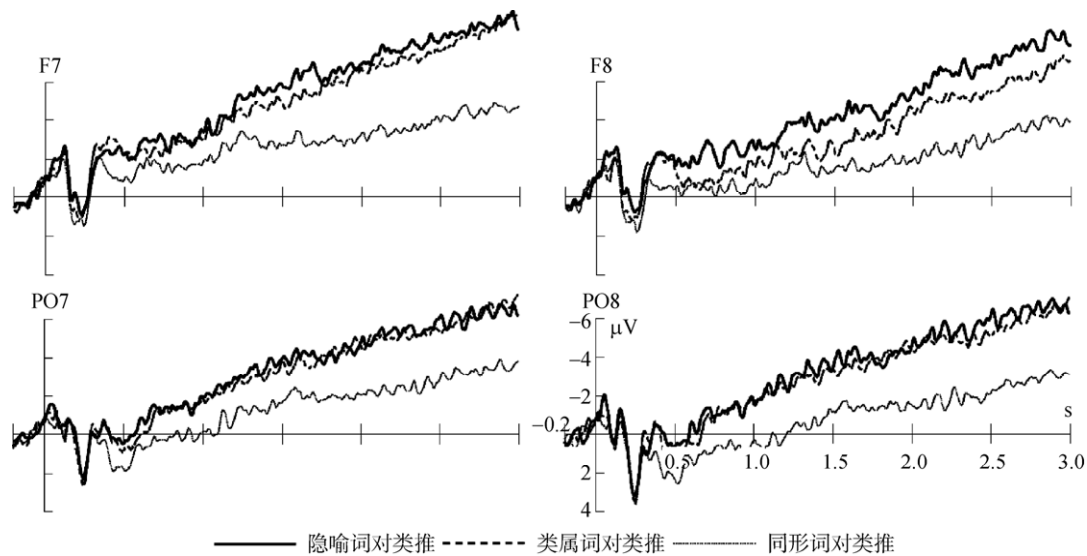


图3 类比映射阶段刺激诱发的ERP波形图

4 讨论

本研究考察了语言类推机制,详细分析了图式生成和类比映射两个重要推理阶段的机制特点。结果显示,在图式生成阶段,不同类推条件均诱发出N400和P300成分,另外,与类属、同形词对类推相比,隐喻词对类推诱发出LNC成分;在类比映射阶段,各类推条件均诱发出N400和LNC成分。下文对不同加工阶段进行详细讨论。

4.1 图式生成阶段讨论

(1) N400 结合波形总平均图(图2)和统计分析,在图式生成阶段的300~550 ms时窗内不同类推条件词对均诱发出N400成分。针对语言理解加工的大量研究表明,N400成分与语义加工密切相关,其幅值与语义加工难度成正比,反映词语间语义关联的疏密程度(Kutas & Federmeier, 2011)。例如与远距离语义关系相比,词语概念间语义距离越近,关联度越高,所诱发的N400波幅越小(Niedeggen, Rösler, & Jost, 1999)。在本实验中,被试需要首先对“A:B”词对意义进行通达和编码,因而,在图式生成阶段所诱发的N400成分较大程度上反映了类比源域的词对意义理解过程。平均幅值的统计分析显示,与类属词对条件相比,隐喻词对在左半球诱发出的N400成分波幅显著更负,这说明隐喻词对间语义距离较远,语义关联度不及类属词对强,因而隐喻关系词对意义加工难度较大,在加工过程中会投入更多的加工资源。

(2) P300 在N400成分后,三种类推条件均诱

发出P300成分,其幅值比较显示,同形词对所诱发的P300波幅最大,隐喻词对诱发的P300波幅最小。Polich (2007)根据大量相关研究指出,P300成分能够反映对于刺激的评估、分类加工过程。在图式生成阶段,被试在获取类比词对意义的基础上,需要进一步抽取出词对间的关系,这一关系将作为其后加工的推理线索(Glucksborg, McClone, & Manfredi, 1997),因而,P300成分的诱发很可能与这一加工过程相关。同时,P300成分的波幅也是反映加工负荷水平的可信赖指标,其波幅与任务认知难度成反比。任务难度越大,越需要投入更多的注意资源用以维持任务的完成,从而致使P300成分波幅减小。例如,Palmer, Nasman 和 Wilson (1994)使用判断字母对是否相同的分类任务,比较了在不同难度水平下所诱发的P300成分波幅变化。实验发现,与不完全匹配的字母对相比,物理属性完全等同的字母对所诱发的P300波幅最大。这与本研究中P300成分的结果相一致,作为基线任务难度较小的同形词对诱发出最大波幅的P300,而隐喻词对诱发的P300波幅最小。这说明隐喻词对的关系抽取最为复杂,其加工过程需要占用较多的注意资源,引起P300成分波幅减小。

(3) LNC 实验结果显示,与其他两种条件相比,仅隐喻词对在图式生成阶段的1300~3000 ms时窗内诱发出较大波幅的LNC成分。相关研究表明,LNC成分在错误信念推理(Wang et al., 2008)、三段论推理(Qiu, Li, Luo, Zhang, & Tu, 2009)、条件推理(Qiu et al., 2007)等不同形式推理过程中均有

诱发, 并且当需要在工作记忆中进行一定操作任务(如再认、信息维持)时, 也均有类似幅值较大、漂移时间长于 200 ms 头皮慢负电位的诱发(McEvoy, Smith, & Gevins, 1998; Mecklinger & Meinshausen, 1998)。可见, LNC 成分与在工作记忆中进行信息认知加工密切相关。Qiu 等(2008)认为在类推实验中诱发的 LNC 成分与在工作记忆中进行类比映射加工有直接关系。在本实验中, 与类属词对和同形词对相比, 隐喻词对图式生成需要建立 A、B 事物或概念之间的类比映射。例如对于“知识: 财富”隐喻词对的理解, 就需要将“财富”所具有的“有价值、资本性、可积累、可创造出其他”等特点类比映射于“知识”的概念域中, 从而凸显“知识”与“财富”概念中相重叠的属性特征, 使我们可以从对“财富”概念感知的角度理解“知识”, 因而隐喻词对的图式生成是建立在不同概念域类比映射的基础之上(Steinhart, 2001)。所以, 隐喻词对在图式生成阶段诱发的 LNC 成分应该与概念间的类比映射加工相关, 反映了隐喻词对类推需要在工作记忆中对概念间关系进行比较、平行联接以及结构对齐等与类比映射相关的加工进程(Morrison et al., 2004)。

另外, 从统计分析结果来看, 隐喻词对诱发的 LNC 成分主要分布于前部脑区。这可能和 PFC 在类推思维中发挥重要作用相关: 来自临床研究报告显示, PFC 损伤病人具有推理能力缺陷, 而无法获取正确的类推关系(Krawczyk et al., 2008); 发展研究也表明 PFC 是否发育成熟(Eslinger et al., 2009; Crone et al., 2009; Wright, Matlen, Baym, Ferrer, & Bunge, 2007)或是功能退化(Morrison et al., 2004)直接影响到类推能力的运用; 同时, 来自视-空间图形关系类推和字母特征类推的 fMRI 实验中, 同样发现 PFC 显著性激活(Volle et al., 2010; Cho et al., 2010; Morsanyi & Holyoak, 2010)。PFC 在类推中所具有的重要作用可能与高级的认知控制能力相关, 负责对工作记忆中的处理项目进行监控、关系整合以及对无关信息进行抑制(Krawczyk et al., 2008; Aron, 2007)。

4.2 类比映射阶段讨论

(1) N400 结合波形总平均图(图 3)和统计分析结果可知, 在类比映射阶段的 300~550 ms 间三种类推条件均诱发出 N400 成分, 并且与同形词对相比, 隐喻词对和类属词对诱发的 N400 波幅更大。如 3.1 所述, N400 成分与语义加工关系密切, 语义加工的难易度可影响其波幅的变化(Kutas &

Federmeier, 2011)。在类比映射阶段, 被试首先必须通达类比目标域前项“C”的概念意义, 并根据在图式生成阶段已获取的“A:B”之间的抽象关系, 对“C”项的概念表征进行选择, 因而该阶段诱发的 N400 成分很大程度上是这一加工过程的脑电表现。N400 波幅的比较结果说明了, 在这一加工过程中隐喻关系和类属关系类推加工难度相对较大, 所耗用的心理资源较多。

(2) LNC 波形总平均图(图 3)和统计分析显示, 在 550~3000 ms 时窗内各类推条件都诱发了幅值较大的 LNC 成分, 并且与同形关系词对相比, 隐喻关系词对和类属关系词对诱发的 LNC 成分波幅显著更负。如 3.1 所述, 相关的研究发现 LNC 成分与类比映射加工有关, 在本实验中, 被试要获取正确的类推结果, 就必须将“A:B”词对关系类比映射于“C”, 以推理出符合类推语义线索的词语概念。所以该阶段诱发的 LNC 成分应该反映了类比源域的图式关系类比映射于目标域“C”项的加工过程。与同形词对相比, 隐喻词对和类属词对所诱发的 LNC 成分幅值显著更负, 表明这两种类推条件在工作记忆中所需处理的类比映射关系信息更为复杂, 加工难度更大。

另外, 与 3.1 图式生成阶段所讨论的隐喻词对诱发的 LNC 成分相比, 该阶段诱发的 LNC 成分波幅更大、漂移时间更长, 并且在各脑区均有广泛分布。相关的 fMRI 研究中同样发现, 与简单类推任务相比, 复杂类推任务除激活 PFC 外, 也会选择性激活更多其他脑区, 如顶区、枕区等(Krawczyk et al., 2011)。在本实验中, 该阶段诱发的 LNC 所具有的波形特征很可能是因为, 两种类比映射相比, 图式生成阶段的隐喻词对类比映射是两类事物/概念属性特征的类比迁移, 与之相比, 类比目标域“C”项的类比映射则是在更高层次上对“A:B”抽象关系的类比迁移, 这种类比映射加工更为复杂, 因而需要调用更多资源进行支持。

5 结论

本实验采用词语类推四项式“A:B::C:D”的范式考察了语言类比推理的加工过程, 主要探讨了图式生成阶段和类比映射阶段两个子加工步骤的神经机制。根据实验结果, 本实验所得的主要结论有以下两个方面:

(1) 语言类比推理的过程十分复杂, 具体来说, 图式生成阶段可以细分为类比源域的词对概念通

达,词对关系抽取的加工过程,这一过程在脑电上主要表现为 N400 和 P300 成分,该阶段的加工是类推线索形成的基础;类推映射阶段又包括类推目标域前项词语概念意义的激活,以及将已获取的图式关系类推映射于类推目标域,并进行推理的加工过程,这一过程在脑电上的主要表现是 N400 和 LNC 成分;

(2) 类推映射的加工与 LNC 成分关系密切,当类推映射关系较为简单时,LNC 成分主要分布于前部脑区,当类推映射关系较为复杂时,LNC 成分在全脑均有分布,且波幅更负,持续漂移时间更长。

参 考 文 献

- Aron, A. R. (2007). The neural basis of inhibition in cognitive control. *Neuroscientist*, 13, 214–228.
- Bunge, S. A., Wendelken, C., Badre, D., & Wagner, A. D. (2005). Analogical reasoning and prefrontal cortex: Evidence for separable retrieval and integration mechanisms. *Cerebral Cortex*, 15, 239–249.
- Cho, S., Moody, T. D., Fernandino, L., Mumford, J. A., Poldrack, R. A., Cannon, T. D., et al. (2010). Common and dissociable prefrontal Loci associated with component mechanisms of analogical reasoning. *Cerebral Cortex*, 20, 524–533.
- Crone, E. A., Wendelken, C., van Leijenhorst, L., Honomichl, R. D., Christoff, K., & Bunge, S. A. (2009). Neurocognitive development of relational reasoning. *Developmental Science*, 12, 55–66.
- Eslinger, P. J., Blair, C., Wang, J. L., Lipovsky, B., Realmuto, J., Baker, D., et al. (2009). Developmental shifts in fMRI activations during visuospatial relational reasoning. *Brain and Cognition*, 69, 1–10.
- Glucksberg, S., McClone, M. S., & Manfredi, D. (1997). Property attribution in metaphor comprehension. *Journal of Memory and Language*, 36, 50–67.
- Green, A. E., Fugelsang, J. A., Kraemer, D. J. M., Shamos, N. A., & Dunbar, K. N. (2006). Frontopolar cortex mediates abstract integration in analogy. *Brain Research*, 1096, 125–137.
- Green, A. E., Kraemer, D. J. M., Fugelsang, J. A., Gray, J. R., & Dunbar, K. N. (2010). Connecting Long Distance: Semantic Distance in Analogical Reasoning Modulates Frontopolar Cortex Activity. *Cerebral Cortex*, 20, 70–76.
- Holyoak, K. J., & Thagard, P. (Eds.). (1995). *Mental leaps: Analogy in creative thought*. Cambridge: MIT Press.
- Krawczyk, D. C., Hanten, G., Wilde, E. A., Li, X. Q., Schnelle, K. P., Merkley, T. L., et al. (2010). Deficits in analogical reasoning in adolescents with traumatic brain injury. *Frontiers in Human Neuroscience*, 62, 1–13.
- Krawczyk, D. C., McClelland, M. M., & Donovan, C. M. (2011). A hierarchy for relational reasoning in the prefrontal cortex. *Cortex*, 47, 588–597.
- Krawczyk, D. C., McClelland, M. M., Donovan, C. M., Tillman, G. D., & Maguire, M. J. (2010). An fMRI investigation of cognitive stages in reasoning by analogy. *Brain Research*, 1342, 63–73.
- Krawczyk, D. C., Morrison, R. G., Viskontas, I., Holyoak, K. J., Chow, T. W., Mendez, M. F., et al. (2008). Distraction during relational reasoning: The role of prefrontal cortex in interference control. *Neuropsychologia*, 46, 2020–2032.
- Kutas, M., & Federmeier, K. D. (2011). Thirty years and counting: Finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP). *Annual Review of Psychology*, 62, 621–647.
- Luo, Q., Perry, C., Peng, D. L., Jin, Z., Xu, D., Ding, G. S., et al. (2003). The neural substrate of analogical reasoning: An fMRI study. *Brain Research*, 17, 527–534.
- McEvoy, L. K., Smith, M. E., & Gevins, A. (1998). Dynamic cortical networks of verbal and spatial working memory: Effects of memory load and task practice. *Cerebral Cortex*, 8, 563–574.
- Mecklinger, A., & Meinshausen, R. -M. (1998). Recognition memory for object form and object location: An event-related potential study. *Memory and Cognition*, 26, 1068–1088.
- Morrison, R. G., Krawczyk, D. C., Holyoak, K. J., Hummel, J. E., Chow, T. W., Miller, B. L., et al. (2004). A neurocomputational model of analogical reasoning and its breakdown in frontotemporal lobar degeneration. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16, 260–271.
- Morsanyi, K., & Holyoak, K. J. (2010). Analogical reasoning ability in autistic and typically developing children. *Developmental Science*, 13, 578–587.
- Niedeggen, M., Rösler, F., & Jost, K. (1999). Processing of incongruous mental calculation problems: Evidence for an arithmetic N400 effect. *Psychophysiology*, 36, 307–324.
- Palmer, B., Nasman, V. T., & Wilson, G. F. (1994). Task decision difficulty: Effects on ERPs in a same-different letter classification task. *Biological Psychology*, 38, 199–214.
- Penn, D. C., Holyoak, K. J., & Povinelli, D. J. (2008). Darwin's mistake: Explaining the discontinuity between human and nonhuman minds. *Behavioral and Brain Sciences*, 31, 109–117.
- Polich, J. (2007). Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, 118, 2128–2148.
- Qiu, J., Li, H., Chen, A. T., & Zhang, Q. L. (2008). The neural basis of analogical reasoning: An event-related potential study. *Neuropsychologia*, 46, 3006–3013.
- Qiu, J., Li, H., Huang, X. T., Zhang, F. H., Chen, A. T., Luo, Y. J., et al. (2007). The neural basis of conditional reasoning: An event-related potential study. *Neuropsychologia*, 45, 1533–1539.
- Qiu, J., Li, H., Luo, Y. J., Zhang, Q. L., & Tu, S. (2009). The neural basis of syllogistic reasoning: An event-related potential study. *Brain Research*, 1273, 106–113.
- Richland, L. E., Zur, O., & Holyoak, K. J. (2007). Cognitive supports for analogies in the mathematics classroom. *Science*, 316, 1128–1129.
- Steinhart, E. C. (Ed.). (2001). *The logic of metaphor: Analogous parts of possible worlds*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Volle, E., Gilbert, S. J., Benoit, R. G., & Burgess, P. W. (2010). Specialization of the rostral prefrontal cortex for distinct analogy processes. *Cerebral Cortex*, 20, 2647–2659.
- Wang, Y. W., Liu, Y., Gao, Y. X., Chen, J., Zhang, W. X., & Lin, C. D. (2008). False belief reasoning in the brain: An ERP study. *Science in China Series*, 51, 72–79.
- Wendelken, C., Nakhachenko, D., Donohue, S. E., Carter, C. S., & Bunge, S. A. (2008). “Brain is to thought as stomach is to?”: Investigating the role of rostralateral prefrontal cortex in relational reasoning. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20, 682–693.

Wharton, C. M., Grafman, J., Flitman, S. S., Hansen, E. K., Brauner, J., Marks, A., et al. (2000). Toward neuroanatomical models of analogy: A positron emission tomography study of analogical mapping. *Cognitive*

Psychology, 40, 173–197.

Wright, S. B., Matlen, B. J., Baym, C. L., Ferrer, E., & Bunge, S. A. (2007). Neural correlates of fluid reasoning in children and adults. *Frontiers in Human Neuroscience*, 1, 8.

The Neuromechanism Underlying Language Analogical Reasoning: Evidence from An ERP Study

ZHAO Ming^{1,2}; XU Zhi-Yuan³; LIU Tao⁴; DU Feng-Lei²; LI Yong-Xin²; CHEN Fei-Yan²

(¹Center for the Study of Language and Cognition, Zhejiang University, Hangzhou, 310028, China)

(²Bio-X Laboratory, Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China)

(³School of International Studies, Zhejiang University, Hangzhou, 310058, China)

(⁴Jiangsu Key Laboratory of Language and Cognitive Neuroscience, Xuzhou, 221009, China)

Abstract

Analogical reasoning as the mechanism of acquisition of new information by inspection of specific instances, is clearly at the heart of advanced human cognitive capabilities and creativity. Especially, language analogical reasoning, as an important part of everyday discourse, is the most common one. Only a few brain imaging studies have used verbal analogies to explore the neural substrates of analogical thinking. Nevertheless, hemodynamic techniques have excellent spatial resolution but poor temporal resolution; hence, these results could not clearly reflect different substeps of analogical processes. Compared with hemodynamic techniques, event-related potentials (ERPs), as an electromagnetic technique, are sensitive to the time course of cognitive processes. However, there has no ERP study on this matter so far.

Using the “A:B::C:D” paradigm, this study investigated the neuromechanism underlying language analogical reasoning by ERPs. Six hundred two-character Chinese noun words were chosen from the Contemporary Chinese Dictionary (the fifth edition) to serve as experimental stimuli. One hundred fifty trials consisting of four noun words were used in three analogy tasks with three semantic relations: metaphor, category and isomorphism, each analogy task had 50 trials. Fourteen undergraduate students participated in the study. Subjects were asked to judge whether one word pair was semantically analogous to another word pair. The EEG was recorded from 64 scalp channels using electrodes mounted in an elastic cap. ERPs were calculated for a 3200 ms epoch including a 200 ms pre-stimulus baseline.

Results showed that the schema induction stage elicited N400 and P300 components, which possibly attributable to semantic processing of word pairs and the formation of a relational category. The analogy mapping stage elicited a N400, which might indicate the semantic retrieval of the antecedent word of target domain. The N400 was then followed by a late negative component (LNC), which might indicate the processing of analogical transfer the schema from the source domain to the target domain and reasoning the suitable answer. The study also compared processing of the analogy mapping under different conditions. The results showed that the amplitude of LNC component was smaller and distributed over anterior scalp sites when the relations of analogy mapping were simpler, while the amplitude of LNC component was larger and widely distributed when the relations of analogy mapping were complex.

The results suggest that the substages of analogical reasoning, schema induction, analogy mapping, are complex processes. The processing of the analogy mapping stage is close with the LNC component. The amplitude and scalp distribution of the LNC are modulated by the complexity degree of the relations of analogy mapping.

Key words language; analogical reasoning; schema induction; analogy mapping; ERP; LNC