

人脑如何学习新的语言规则

耿立波^{1,2}, 方娇艳^{1,2}, 杨丽^{1,2}, 杨亦鸣^{1,2}

(1. 江苏师范大学 语言科学与艺术学院 江苏 徐州 221000

2. 江苏师范大学 语言能力协同创新中心 江苏 徐州 221000)

摘要: 人脑究竟能否掌握新的语言规则,这是语言学习研究领域一直争议的问题。习得年龄、输入量和相似性,哪个才是影响语言规则学习的重要因素?学界始终没有统一的结论。本研究以成年汉语母语者为研究对象,基于小数据的人工语法学习(Artificial Grammar Learning, AGL)范式设计实验,采用跟踪调查和事件相关电位技术,探讨在高/低输入量条件下,人脑加工与汉语相似程度不等的三种句法结构时的神经机制。结果发现,成人可以在小数据学习范式下,运用无监督学习方法掌握新的语言规则;人脑可以基于少量的规则输入习得多种人工语法,并表现出趋近于母语加工的自动加工模式;人脑通过竞争的方式习得新的语言规则。本研究丰富了AGL范式下的语言学习理论,并可以对自然语言处理相关研究提供一些启示。

关键词: 人工语法; 小数据; 无监督学习; 输入量; 事件相关电位技术

How does the Brain Acquire New Language Rules

GENG Libo^{1,2}, FANG Jiaoyan^{1,2}, YANG Li^{1,2}, YANG Yiming^{1,2}

(1. School of Linguistic Sciences and Arts, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221000, China

2. Collaborative Innovation Center for Language Ability, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221000, China)

Abstract: Whether and how human brains can master new grammar rules has been hotly debated in linguistic research. No consensus has been reached with regard to what the most important factors are in grammar rule learning, for example, the age of acquisition and the amount of input. This leads to the current study, which utilized Artificial Grammar Learning (AGL) paradigm combined with Event Related Potentials (ERPs) to investigate, longitudinally, the neural mechanism of processing artificial grammar among adult Mandarin native speakers. We manipulated the amount of the input, and we also created three artificial grammars with different degrees of similarity to Mandarin grammar. The results showed that (a). within a small data learning paradigm, adults can use unsupervised learning to master new grammar rules; (b). different grammar rules can be acquired with a relatively small amount of input and be processed in a native-like way; and (c). grammar rules are acquired through a competitive brain mechanism. The current study contributes to learning theories using AGL paradigm and hopefully informs research on Natural Language Processing.

Key words: AGL; Small data; Unsupervised learning; Input; ERP

0. 引言

Science 杂志在庆祝其创刊 125 周年时,刊登了一篇文章:《125 个问题: 我们所不知道的》(125 questions: what don't we know? Kennedy and Norman, 2005)。其中一个关于语言学习的生物基础或年龄效应问题: 为什么第二语言的学习非常困难? [1]

我们一般认为,在学习新的语言规则时,成人比儿童更加困难[2][3][4]; Lenneberg (1967) 针对新语言学习年龄的问题,首先提出了语言学习“关键期”的假说(the Critical Period Hypothesis) [5],认为过了关键期之后,人脑就难以掌握新的语言规则,但学界也有许多研究得出了挑战“关键期”假说的证据[6][7],因此学习年龄是否决定学习者的最终成就还需要更多证据的支持。除了年龄,输入量对语言学习具有重要影响作用的观点也得到了越来越多研究者的支持[7][8]。陈述性-程序性模型认为输入量对学习语言规则具有重要影响[7][8],认为在语言规则输入量不同的情况下,学习者句法习得方式也存在阶

段性差异。White (2003)、MacWhinney (2005) 还认为过去已掌握的语言知识与新学习的语言规则之间的特征差异会产生一些相互作用[9][10],从而影响新语言规则的学习,例如功能特征假说认为人们不太可能习得或应用母语中缺失的语言特征,全迁移全通达模型认为新语言规则的学习不受旧语言知识特征参数的影响[6]。

年龄、输入量和相似性,哪个才是造成困难的因素?研究表明,只有当学习者达到高水平的熟练程度时,才能观察到母语和非母语大脑反应的融合[7],自然语言语法是自然生长而成的,学习者在学习新的自然语言规则时,大脑加工机制不断地从非母语的大脑活动模式向母语的自动加工模式融合[7][8],这一过程复杂且漫长,难以实现跟踪调查。因此对于影响语言规则学习的因素,学界始终未能有一致的结论。要使学习者在短时间内达到一门新语言的高熟练度,学习一种高度可控的“迷你”自然语言型人工语言便有其特有优势。

1967 年,美国心理学家 Reber 发表《人工语法学习

范式下的隐性学习》一文，正式开始关于人工语法学习（Artificial Grammar Learning, AGL）的研究^[11]，这种迷你的小数据语言学习范式具有高度的可控性、较强的时效性，还可以很好地调节语言之间的相似度和异同点^[12]^[13]。Reber 利用 Noam Chomsky 的有限状态语法，首次设计并使用了 AGL 范式，其中包含简单的字母序列、图片、几何小图标或颜色等的变化，对于探究内隐学习问题有很大的说服力。但自然语言有其特有的词汇语音系统，仅仅与序列问题相关的学习材料并不能有效还原语言学习过程，于是本世纪初，研究者突破传统字母序列的方式，创设出无语义型 AGL。它采用更接近自然语言造词法的规则和方式来创造假词、短语，并为假词匹配意义场景，再根据有限状态语法的环路规则，从某一起始点到环路结束所记下的一系列符号串就是这种语言的一个句子^[14]。被试学习这些句子，达到高熟练水平后，进行语法判断任务。由假词组成的新句子可以在一个有意义的语境中出现，也可供学习者阅读和理解^[15]，更有利于语言习得研究的展开。

应用较早较广泛的是 Friederici et al. (2002) 使用的一种有限的非递归人工语言 BROCANTO，这种人工语言根据 Reber 在 1967 年使用的有限状态语法 (finite-state grammar) 规则，组合排列 14 个有限的、被试知道的语言（德语）中的非单词。训练阶段中，被试会在明确的指导和提示下，通过玩一款电脑桌面游戏来习得 BROCANTO 中潜在的语法规则；游戏中进行词语和规则分类任务时，被试会收到相应的绩效反馈。测试阶段中，被试判断 BROCANTO 违反句时，出现了类似于自然语言母语者的 ELAN (Early Left Anterior Negativity) -P600 双相 ERP 模式，因此得出了挑战“关键期”假说的有力证据，表明了如果是在小规模的语法系统中，成人学习者也可以和母语者一样拥有非常相似的句法加工模式^[6]。Opitz et al. (2015) 利用 BROCANTO 探讨了基于规则的或基于相似性的二语学习问题，提出了这两个学习过程之间存在的交互作用，并希望在未来的研究中能继续探讨它们之间的直接关系^[16]。但是两种学习系统在学习期间到底如何相互作用，目前还不清楚。也有研究者使用 BROCANTO 探讨了新语法学习过程中大脑神经区域的相应活动和变化^[17]，强调了在语言学习的初始阶段右半球的参与作用，且随着时间的推移，学习者大脑中的布洛卡区、右侧后扣带皮层和右侧颞顶叶区域的功能连接作用会不断增强。

类似的调控语义型 AGL 研究还有 Tabullo (2013)，该研究中假词的拼读规则（元音-辅音-元音-辅音）符合被试母语西班牙语的规则，但并不存在于被试的母语中，这样设置语音可以不妨碍被试学习句法规则，方便直接比较被试在加工人工语法和母语（西班牙语）时神经系统的相关性，二者都出现了 N400 和 P600 效应，表明被试在加工自然语言和人工语法时至少部分共享了大脑的神经机制^[13]。

此外，前人还在 AGL 范式下考察了句法违反，包括句法形态违反（性、数、人称、时态标志）和词组结构违反（词类违反、词语省略、词序违反）^{[2][6]}。研究表明，学习者在加工这两种句法违反类型时会诱发不同的 ERP 成分，表现出与母语加工类似的 ERP 成分^[18]。

AGL 是为了某个特定目的而人为设计出来的^[19]，可以让学习者在短时间内到达一个高熟练度的水平，通过观察学习者在习得过程中的大脑机制变化，就可以为真正习得一门自然语言做出有力的参考，这无疑为语言学习的跟踪研究提供了崭新的视角。经过半个多世纪的演变发展，现在的 AGL 逐渐成为了模拟和测试自然语言语法及结构的常用模型^[20]。

前人关于语言学习的研究大多未做到严格的变量控制，输入量和语言间特征差异究竟如何影响语言规则的学习和加工也还有待进一步考察。本研究借鉴前人研究经验，合理参考 Friederici et al. (2002) 的 AGL 范式，以成年汉语母语者为研究对象，要求其在人为设计的小数据学习范式下进行新语言规则的学习。学习过程中，严格控制新规则的输入量，采用 ERP 技术手段追踪考察成年学习者对新规则的加工，从而探究人脑在输入量不同的情况下习得和加工句法违反类型的情况。

1. 实验设计

1.1. 实验被试

本研究共招募被试 30 名，男女比例均衡，均为自愿参加实验的全日制在校大学生。无脑外伤、神经病史或其他相关病症。母语为汉语，有英语学习经历，无其他相关语言学习背景。视力、听力或矫正视力、听力正常，右利手。所有被试在实验前阅读知情同意书并签字，实验后获得一定报酬。

1.2. 学习软件

本研究借鉴 Friederici et al. (2002) 开发的电脑棋盘游戏理念，使用一款在线学习软件为学习者提供内隐学习环境，该软件完全独立于 AGL 规则，学习过程中不

进行与语言规则相关的任何交流，保证被试在无监督情况下内隐习得语言规则。

游戏中使用的四个棋子对应 AGL 中的四个名词，棋子的形状（方形或圆形）对应于 AGL 中的形容词，运动状态对应动词，动词限制限定词，组合关系对应量词。

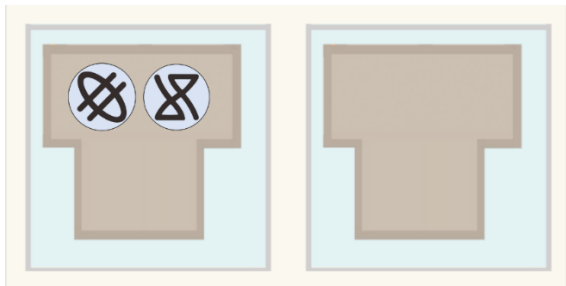


图 1 人工语法在线学习软件中使用的游戏板

为控制新语言规则的输入量和类型，游戏场景中每一种词类及其组合规则都按照数量比例以相同的频率出现，输入和产出都有固定数量和类型。学习者面对电脑上的游戏板（图 1）完成学习和测试任务，电脑仅给出正误反馈，在进行最终的 ERP 实验前学习者不会再接收到任何额外的语言信息，保证所有学习者输入量恒定。

1.3. 学习材料

本研究中的 AGL 范式参考 Friederici et al.（2002）中使用的人造语言 BROCANTO，它具有类似自然语言的普遍合理性特征。为配合被试的母语结构特征，本实验保留其语法的能产性特征，但在词类设置中做出调整，设置 15 与汉语语音相近的单词（名词、动词各 4 个，形容词、量词、限定词各 2 个，数词 1 个）。如表 1 所示。

表 1 AGL 词语分类		
词类	词语	游戏中相关内容
名词 (N)	bou _m	⬇
	miang _m	⬇
	nui _f	⬇
	tuai _f	⬇
动词 (V)	piong	移动
	jai	弹跳
	tiu	进入
	len	出去
形容词 (A)	dia _m (dio _f)	圆的
	rua _m (ruo _f)	方的
数词 (Num)	fao	一
量词 (CL)	jo	个
	qo	套、副
限定词 (D)	cei/xüa	表限定

其中 m 代表阴性词，f 代表阳性词；量词（jo）“个”用于非成组出现的名词之后。量词（qo）“套、副”用于搭成组的名词之后；限定词限定动词的运动方式，即限定词 cei 可以修饰动作发生曲折变化的动词，也可以修饰动作未发生屈折变化的动词；xüa 只能修饰动作路径未发生屈折变化（piong、tiu 和 len）一类的动词。

15 个单词涉及 17 个语音，经《现代汉语词典（第 6 版）》和互联网百度搜索引擎证实，均符合汉语拼音拼读规则但基本未投入正式使用。试点实验（6 人）表明该 AGL 确实可以被学习，不会给汉语母语者造成听力理解或口语产出上的困难。研究中只出现语音序列，没有正字法系统。将 17 个声音按规则组合生成听觉刺激句，由播音主持专业女性在不知单词意义和类别的情况下进行朗读录音，使用 Adobe Audition CS6 软件对录音进行剪辑和排列处理，每个句子中词与词之间停顿为 50 毫秒，保证词语边界上不会产生协同发音以使各类句子在听感上相对自然。

表 2 AGL 语法规则

名词短语 (NP)	N(A) CL Num	bou jo fao
	N(A) N(A) CL Num	miang bou qo fao
动词短语 (VP)	DV	cei piong
句子 (S)	NP VP	miang bou qo fao cei tiu

本研究中 AGL 学习材料包含了约 1500 个 AGL 的声音序列，包括词语、短语和句子。在名词短语中，名词本身具有阴阳性属性特征，形容词相应地也具有阴阳性形态变化，形容词出现在名词之后且与所修饰的名词在语法性范畴上保持一致；量词、数词在名词之后，当句子中出现形容词时，它们在形容词之后。动词短语有固定顺序（限定词-动词），无形态特征变化。句子都是主语-谓语结构，是由 6-8 个词语组成的比较简单的主句。本研究的基本语言规则基于自然语言的普遍要求编写而成，具有较高的能产性。如表 2 所示。

核心语言规则的设置既有与汉语相似的规则、也有和汉语相似度很低（模拟法语等印欧语言的语法阴阳性范畴特征）的规则，以及 AGL 特有的规则（见表 3）。

条件一根据学习者母语特点设定，与母语相似性高，为防止母语规则的直接转移，设定语言规则为名词+量词+数词。语法性范畴系统因其独特性，被广泛用于检测新语言学习者是否可以达到和母语者类似的句法加工水平^[21]，研究发现母语者（如：法语、意大利语等）在加工性一致违反时出现了 LAN 效应或 P600 效应^[22]。

表 3 AGL 核心句法规则

条件	句法相似性	例句	特点
条件一	与汉语相似度高	nui jo fao cei piong 游戏场景：一个棋子移动。	模拟汉语中的数量结构。
条件二	与汉语相似度低	tuai ruo bou dia qo fao cei jai 游戏场景：一组（阴性）方棋子（阳性）圆棋子跳动。	汉语缺少形态标记和形态变化，模拟法语中语法性范畴。
条件三	AGL 特有	miang tuai qo fao x iia tiu 游戏场景：一组棋子（屈折）进入。	根据普遍语法推导出，本研究中 AGL 特有的。

条件二根据学习者母语中缺失的语法性范畴特征设计^[23]，与母语相似度高，即名词+形容词（形容词词形有阴阳性变化）。当代句法理论把限定词看作“限定词短语”（DP）的核心，用来指定、识别或量化名词短语的^[24]，动词词类是无法进入 DP 结构中限定词后位置的。

条件三根据这一普遍语法推导出，与绝大多数语言基本不相似，是本研究中 AGL 特有的规则，即限定词+动词。

1.4. 学习过程

学习者通过 AGL 在线学习软件进行内隐学习，游戏本身不以 AGL 语言规则作为游戏规则。最终利用 17 个 AGL 词语，准确判断和描述各种游戏场景，即理解并产出 AGL 句子。

学习共包括四个阶段，游戏共设置五关，成功通关即可。不限制学习者的学习总时长，但每次学习时间不超过三小时，每天学习不超过一次。学习和测试的复杂性呈阶梯状逐渐增加。

阶段一为游戏符号及规则的学习，即词语习得。学习者被告知即将学习一门外星语言，并会在稍后的闯关游戏中使用。点击电脑鼠标后，新语言规则的学习在阅读游戏规则中正式开始。第一关学习者需要记住 4 种游戏动作，共 8 种情况。学习者确认记忆即可进入第二关。第二关需完成 4 个符号及其对应声音的记忆，并完成记忆后的 20 个听声音选符号测试，为防止偶然性，每个棋子出现五次，回答时间超过 10 秒或回答错误将自动重置本关，直至完全正确，进入第三关。

阶段二为第一次语言内隐学习，即短语、句子习得。为了保证学习效率，开始前将告知学习者，学习结束后会测试他们在学习看到了哪些游戏场景。第三关学习者将会在相应的游戏场景中听到短语或句子，语音与场景同时呈现，共计 143 个（每类短语或句子均按照 AGL 中 6 类词的数量比例以相同频率出现，保证学习者对各类词的接触量基本相当）。学习结束自动进入下一关。第

四关为测试关，屏幕上呈现游戏场景并提问被试是否在上关看到过该图像，共设 10 题，至少答对 9 题则通关，为保证第一次学习句法规则的接触量，测试中不设置语言的再次学习，若无法闯过则只复习阶段一的游戏符号名称及游戏规则，合格后直接进行第一次 ERP 实验。即本次新语言规则学习的输入量固定为 143 个短语或句子。

阶段三为第一次 ERP 结束后的再次语言内隐学习，即进行新语言规则的理解和产出。第五关开始前，学习者被告知将使用学到的新语言和游戏规则继续进行闯关。本关一共包括 40 个游戏版块，其中理解和产出版块各 20 个，每个版块包含 20 个游戏场景及相应的 AGL 句子语音。理解版块中，学习者在游戏场景中听句子判断场景正确性；产出版块中，学习者观看游戏画面，并使用 AGL 句子描述游戏场景。游戏过程中，学习者会得到正确与否的反馈。取得 95%及以上正确率则成功闯关，否则自动重置本关。

阶段四为语法评估阶段，对参与者是否在游戏中通过无监督的内隐学习方式掌握了 AGL 语言规则进行简单评估。实验研究员与 AGL 学习者使用 AGL 句子在 40 个特定的游戏场景中进行简单的交流后，进行本研究的第二次 ERP 实验。

1.5. ERP 实验语料

实验通过 ERP 技术手段考察学习者对三种语言规则违反句的加工情况，探究学习者随着输入量的增加，对新语言规则的学习和加工情况。违反句主要包括量词违法、名词阴阳性违反、限定词违反。如表 4。

17 个单词根据一定的规则可以生成 1200 句左右合法句语音序列和更多的违反句序列。本实验选取 300 个句子，每种条件包含 100 个句子，其中合理句、违反句各有 40 句、填充句 20 句，所有目标句伪随机排列，正确句和相应违反句之间的距离总是最大的。排除机械记忆因素的影响，保证实验刺激材料在前期学习中未使用过，正确句和违反句在语音上基本相同。

表 4 实验语料示例

条件	句法相似性	违反例句	正确例句
条件一	与母语相似度高	miang rua <i>piong</i> *fao cei tiu. 一移动*（阳性）方形棋子进入。	miang rua jo fao cei tiu. 一个（阳性）方形棋子进入。
条件二	与母语相似度低	bou dia nui <i>rua</i> * qo fao xūa len. 一组（阳性）圆棋子（阳性*）方棋子出去。	bou dia nui ruo qo fao cei len. 一组（阳性）圆棋子（阴性）方棋子出去。
条件三	AGL 特有	miang dia tuai qo fao <i>xūa</i> * jai. 一组（阳性）圆形棋子非屈折*跳动。	miang dia tuai qo fao cei jai. 一组（阳性）圆形棋子屈折跳动。

1.6. 实验程序

本实验参照 Friederici et al. (2002), 实验材料听觉呈现, 任务是句子正误判断。采用 2 (阶段: 第一次学习后、第二次学习后) × 2 (句子类型: 违反句、正确句) 混合实验设计。第一次和第二次 ERP 实验刺激材料选句不重复, 其余完全一样。



图 2 实验流程图

实验在电磁屏蔽室进行, 隔音效果良好。实验过程中被试佩戴专业耳机, 要求尽量保持头部不动, 双眼与计算机屏幕中央视距大约为 80 厘米, 双手拿按键盒。计算机屏幕底色为灰色, 视觉材料始终在计算机屏幕中央呈现, 为 48 号银灰色宋体。实验开始时, 要求被试注视屏幕, 屏幕中间呈现“+”后, 耳机开始播放句子, 句子播放结束后屏幕上“+”变成“???", 被试需在接下来的 2000ms 内做出判断反应, 300ms 空屏后进入下一组任务, 实验流程如图 2 所示。

1.7. 数据采集与处理

本实验脑电记录采用美国 Neuroscan 公司生产的 ESI-256 脑电记录系统和 64 导 Ag/AgCl 的电极帽。被试佩戴的导联电极帽为 Quick-Cap64, 按照国际 10-20 系统放置各电极点, 以双耳乳突连线中点为参考电极点, 接地点在 FPZ 和 FZ 之间, 实验中在被试的右眼眶额上记录垂直眼电, 同时在其双眼外侧记录水平眼电。带宽为 0.05 到 100Hz, 在线采样频率 1000HZ, 实验过程中电极与头皮接触电阻始终小于 5kΩ。

使用 Scan4.3 软件对 ERP 数据进行离线分析处理, 分析时程为刺激呈现后 1200ms, 基线为刺激前 200ms。离线处理后首先处理每个有效被试的脑电, 将实验中需要考察的六事件类型的脑电数据叠加和平均, 并对总平均的脑电波形进行 30Hz/24dB 低通滤波, 再进行组平均

叠加处理, 得到六种类型有效的脑电波形图。使用 SPSS 22.0 软件对后期数据进行重复测量方差分析, 对统计后所得到的 p 值使用 Greenhouse-Geisse 法进行校正。

2. 结果

本实验共招募被试 30 名, 其中 6 名因实验过程中眨眼头动过多造成脑电不理想、3 名因个人原因中途退出学习、1 名因第二次 ERP 实验时行为数据过低 (小于百分之八十) 而在后期的实验数据分析中被剔除, 最终收集实验数据 20 套。

2.1. 行为结果

实验要求被试在听完每个句子后, 对该句子是否符合先前所学的句法规则进行判断, 填充语料不在考察的范围之内, 被试的正确率和反应时被自动记录。被试在三种规则的语法判断任务中正确率和反应时如表 5 所示。

表 5 被试行为数据

学习阶段	条件	正确率 (%)		反应时 (ms)	
		均值	标准差	均值	标准差
第一次学习后	条件一	52.30	5.25	447.07	140.51
	条件二	50.10	6.40	372.57	132.93
	条件三	60.00	14.11	425.97	145.35
第二次学习后	条件一	91.90	6.57	449.06	148.16
	条件二	89.25	9.31	374.52	162.35
	条件三	97.23	2.63	392.78	145.99

经过重复测量方差分析发现, 正确率方面, 学习阶段主效应显著 ($F(1,19)=540.940, p<0.000$), 第二次学习后被试的正确率明显高于第一次; 但反应时方面, 学习阶段主效应不显著 ($F(1,19)=0.111, p=0.742$), 说明在第一次学习后和第二次学习后, 被试的反应时没有显著性差异。两次学习中, 被试对 AGL 特有结构的反应最准确, 对与其母语相似度高结构的反应最快。

2.2. ERP 结果

根据前人文献及 ERP 数据处理结果, 本研究主要对 ELAN 成分 (100-150ms 时间窗)、LAN 成分 (300-400ms、

400-550ms 时间窗)、P600 成分(550-750ms、750-900ms、900-1200ms 时间窗)进行集中分析。实验结果中只对效应显著的条件进行汇报。

2.2.1. 条件一 ERP 数据

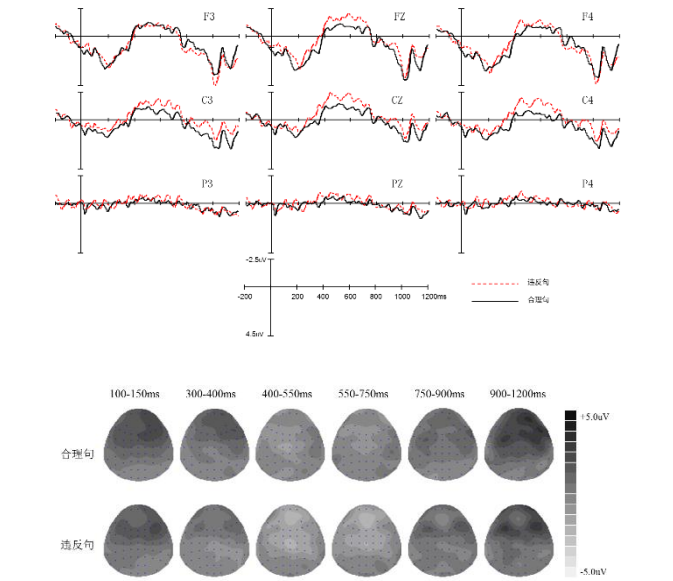


图 3 条件一第一次 ERP 总平均图及地形图

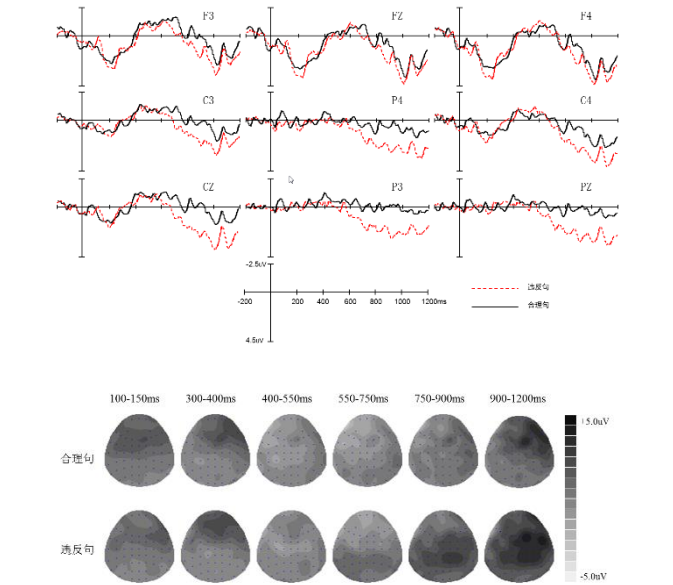


图 4 条件一第二次 ERP 总平均图及地形图

结合 ERP 波形图、地形图(图 3、图 4)及 SPSS 统计分析结果发现: 100-150ms 时间窗内, 两个学习阶段句子类型、半球、脑区之间都没有产生交互作用。300-400ms 和 400-550ms 时间窗内, 两个学习阶段句子类型、半球、脑区之间没有产生交互作用。550-750ms、750-900ms 和 900-1200ms 时间窗内, 第一次学习后句子类型、半球、脑区之间都没有产生交互作用。第二学习后句子类型在中线电极位置效应显著, 在左中和右中区域电极位置效应也显著。

2.2.2. 条件二 ERP 数据

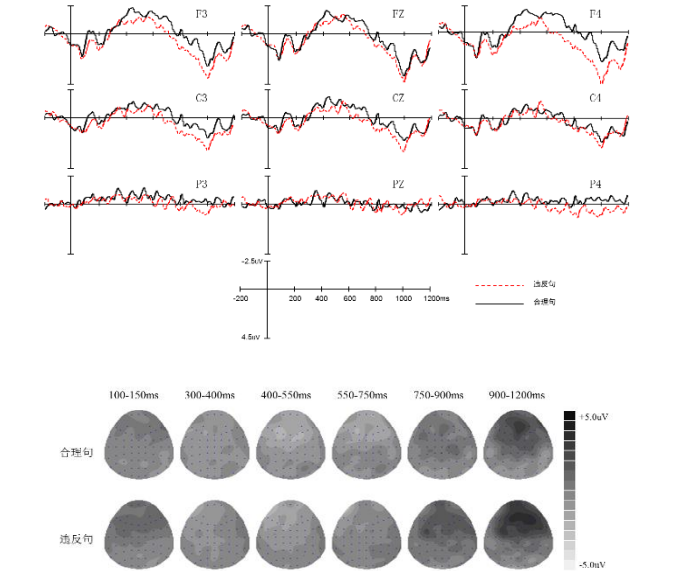


图 5 条件二第一次 ERP 总平均图及地形图

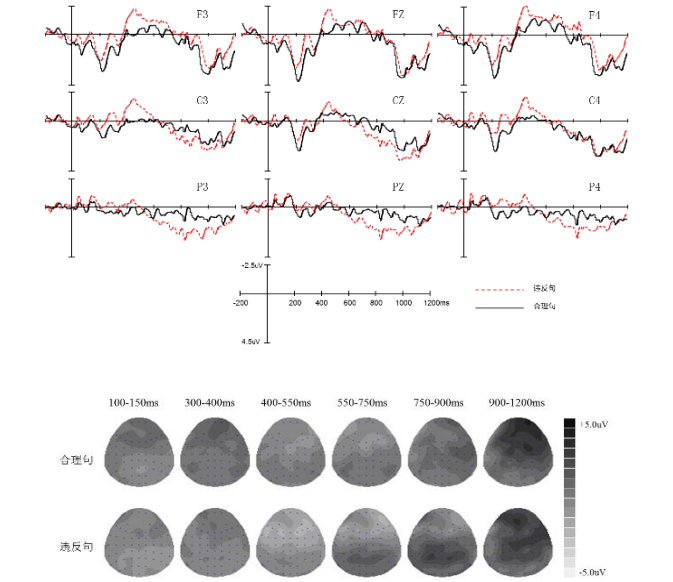


图 6 条件二第二次 ERP 总平均图及地形图

结合 ERP 波形图、地形图(图 5、图 6)及 SPSS 统计分析结果发现: 100-150ms 时间窗内, 两个学习阶段句子类型、半球、脑区之间没有产生交互作用。300-400ms 和 400-550ms 时间窗内, 第一次学习后句子类型、半球、脑区之间没有产生交互作用, 但在第二次学习后句子类型主效应显著, 脑区在大脑前部主效应显著, 句子类型在大脑前部交互作用显著, 因此在该时间窗内句法违反诱发了 LAN 成分。550-750ms、750-900ms 和 900-1200ms 时间窗内, 第一学习后句子类型、半球、脑区之间没有产生交互作用, 第二次学习后句子类型在中线电极位置效应显著, 在左中和右中区域电极位置效应也显著。

2.2.3. 条件三 ERP 数据

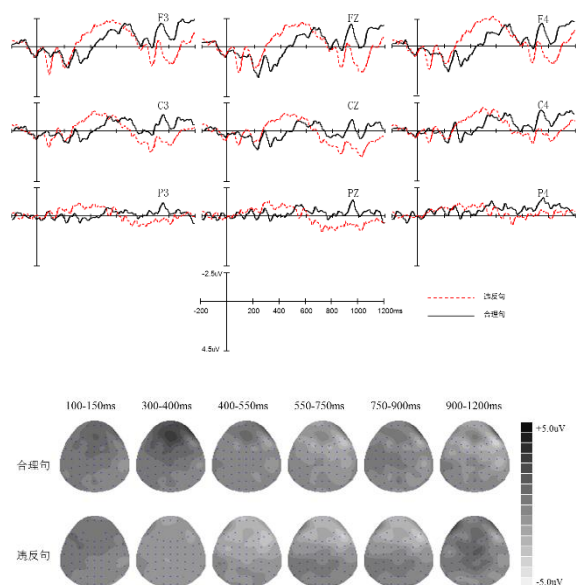


图7 条件三第一次 ERP 总平均图及地形图

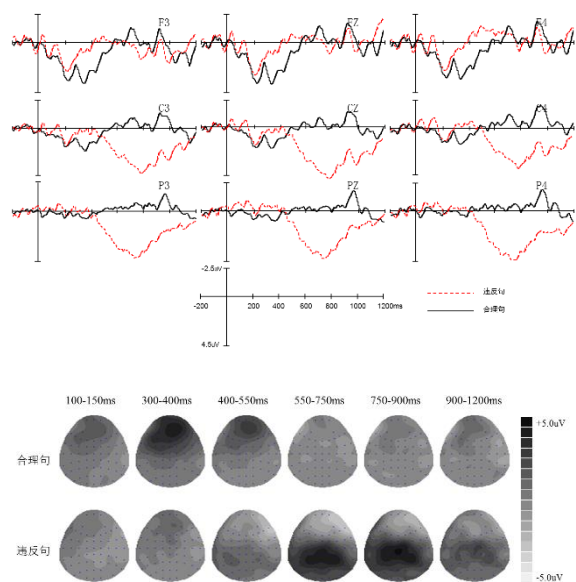


图8 条件三第二次 ERP 总平均图及地形图

结合 ERP 波形图、地形图(图7、图8)及 SPSS 统计分析结果发现:100-150ms 时间窗内,两个学习阶段句子类型、半球、脑区之间没有产生交互作用。300-400ms 和 400-550ms 两个时间窗内,两个学习阶段句子类型、半球、脑区之间没有产生交互作用。550-750ms、750-900ms 两个时间窗内,第一次学习后头皮中线位置句子类型主效应显著,半球主效应也显著,句子类型在大脑中部和后部交互作用显著,第一次学习后学习者头皮中线位置诱发了波幅较小的 P600 成分。第二次学习后,550-750ms、750-900ms 和 900-1200ms 三个时间窗内,两个学习阶段句子类型在中线电极位置效应显著,在左中和右中区域电极位置效应也显著。

3. 讨论

关于年龄、输入量及句法相似性如何影响句法学习与加工,前人研究大多孤立探讨其中某一因素的作用,三者何为主要因素尚存争议^{[25][26][27]}。本研究控制学习者初始学习年龄,设计与汉语的相似性高低不等三种句法规则,并对学习者持续输入新语言规则,在输入过程中进行两次 ERP 实验,考察这两个学习阶段里,语言输入量和语言间相似性对新语言规则习得和加工的作用。

结果显示,大脑可塑性退化的成年学习者在接收少量的新语言输入后,可以表现出类母语者的脑神经机制加工模式^{[7][12]}。并且随着输入量的增加,语言加工模式更加趋近母语者神经认知机制。

3.1. 输入量对新语言规则学习的影响

学习过程中,通过限制规则句接触的数量来控制语言规则的输入量(143 句),总学习时长不做严格要求,但学习结束后对学习时长做统计分析发现,80%的学习者在 7 小时内完成学习,其中最少用时为 4 小时;最多用时也仅 8.5 小时。由此可知,本实验中无论是输入量还是接触时长,都是小数据的,人脑学习新语言规则是高效而优质的。

学习者加工与其母语相似度较高但有差异的 AGL 语言规则两次,第一次 ERP 实验中没有发现和母语加工相同的 ERP 成分,仅在 300-550ms 时间窗内,诱发了比加工正确句更负的波幅,但未达到显著,这与 Carrasco-Ortiz et al. (2017)、Bowden et al. (2013) 结果相似^{[28][29]};我们认为此时过少的输入量使得学习者尚不能快速识别句法违反结构,更多地依赖母语对其进行加工,从而未能被完全加工违反句^[10],第二次实验中,与 Lelekov-Boissard & Dominey (2002)、Christiansen et al. (2012)、Tabullo et al. (2013) 研究结果一致^{[18][20][30]},违反句的关键词位置上检测到 P600 成分,表明学习者实现了对 AGL 句法规则的完全加工,并与母语加工共享部分神经机制^{[18][20]}。

学习者在第一次 ERP 实验中加工与 L1 相似性低的 AGL 违反句时,仅完成词汇学习,输入量极少。关键词处诱发了一个中央前部的晚期正波效应, Molinaro et al.

(2011) 认为该正波反映了学习者在句法加工早期对名词性范畴信息进行初步整合和修复^[31], Kaan et al. (2000) 则认为这是学习者对句法结构中句法信息合成加工难度的指示^[32]。我们认为,学习时间不足会使得无法快速识别句法违反结构,也无法对句法结构进行复杂充分的

加工^[19]。随着熟练程度提高,加工过程诱发了 LAN-P600 效应,LAN 成分是学习者句法加工过程中遇到违反项时出现在大脑前部或左前的显著负波^[33],自然语言学习过程中,高熟练水平的学习者在加工句法违反时会出现 LAN 成分^{[3][7]},Friederici & Hahne (1993)、Friederici et al. (2002)、耿立波 (2012) 认为这一成分反映了学习者句法自动分析加工的过程,随后出现的 P600 成分则反映再分析过程^{[6][34][35]}。我们支持前人的观点,认为高熟练水平学习者经过两次学习后已经获得与母语者相似的句法加工能力^{[6][36]},学习者在迷你学习范式中接收到的输入量可以实现对新句法规则的高熟练水平掌握,并获得与母语者相似的句法加工能力^[6]。

学习者在初步接触后加工 AGL 特有句法结构时,大脑中央顶区和后部出现了波幅较小的 P600 成分,与 Kotz et al. (2008) 结果相似,我们认为过少的输入量虽然对句法违反表现出敏感,但无法对句法结构完成复杂充分的加工^[25]。加大语言输入量后再加工,关键词位置除诱发了显著的 P600 效应外,还出现了前部负波 (Anterior Negativity, AN) 效应,与 Hahne & Friederici (2001) 结果相似,我们认为这种负波类似于成人学习者在加工自然语言句法违反时出现的效应,反映了学习者句法自动加工的趋势^[3]。学习者句法加工模式随着句法输入量的增加趋近于母语者自动加工模式。

纵向比较三种句型的两次 ERP 实验数据,发现加大输入量后,学习者在三种条件下均诱发出 P600 成分,可见输入量不断变化使得学习者在线句法加工任务的神经认知模式发生了质的变化,不仅句法得到充分加工,加工模式上也实现了类母语或部分类母语机制。实验证明,基于有限的小数据 AGL 范式,脑机制可塑性较差的成人可以达到类母语的加工机制,说明年龄并不是语言学习的关键影响因素,人脑在一定量小数据的新语言规则输入后,就能高熟练掌握一种甚至多种与新的语言规则。

3.2. 相似性对新语言规则学习的影响

MacWhinney (2005)、White (2003) 认为,在学习过程中,学习者是否可以获得类似母语的语言能力受到语言间句法相似性的影响^{[9][10]}。

第一次 ERP 实验中,学习者加工与母语相似性高的句法违反时,仅出现了一个不显著的负波成分;而在加工与母语相似性低的句法违反时,出现了前部正波效应,Molinaro et al. (2011)、Kaan et al. (2000) 认为学习者

此时未完全加工,但可能已经可以对名词-形容词语法性不一致敏感^{[31][32]};加工 AGL 特有的句法违反时,大脑中央顶区和后部出现了波幅较小的 P600 成分,该成分与句法整合修复相关,波幅较小表示尚未实现完全加工。

随着输入量的增加,学习者进行第二次 ERP 实验时,学习者再加工相似度较高的语言规则违反句时,出现 P600 成分,未出现 ELAN 或者 LAN 成分,实现了母语者的加工模式的部分还原。学习者在加工与母语相似性较高的句法规则时,即使加大输入量,与母语加工的神经机制仍存在差异,未诱发与母语类似的双相 ERP 模式。学习者在加工与母语相似性低的 AGL 违反句时正波效应逐渐转变为 LAN-P600 效应,与具有该句法特征的母语者加工机制一致。一些研究认为学习者在语言“关键期”之后便无法习得母语中缺失的语法特征^[21]。也有研究认为,不管习得年龄如何,学习者都具有对普遍语法“充分利用”的能力,可以习得母语中缺失的新语法特征^[9]。本实验结果证明,学习者可以在一定量的语言输入后最终可以习得母语中缺失的语法范畴特征,并获得和本族语者类似的神经机制。学习者在加工 AGL 特有句法违反时,人脑对新语言规则表现出敏感,关键词位置上诱发了前部负波效应和波幅较大的 P600 效应,与母语者加工机制一致。证明学习者可以在接受一定量的语言输入后完全习得 AGL 特有的句法规则,并表现出类母语者的加工机制。

横向比较两次 ERP 实验中的三种句型加工数据,我们支持 Tokowicz & MacWhinney (2005) 的研究结果,认为竞争机制存在于相关的新语言规则习得和加工过程中^[37]。统一竞争模型认为学习者母语和 L2 句法结构不同时,L1 中缺失规则习得速度快于 L1 和 L2 产生矛盾的句法规则。学习者加工句法相似性较高的新句法规则时,只表现出和母语者部分相似的 ERP 模式——只诱发了 P600 效应,没有出现和母语者类似的 (E) LAN 效应或前部负波效应,因为条件一尽管与汉语母语者的母语规则高度相似,但设计时为了避免母语的直接迁移设置了语序的差异,正是这一差异导致母语知识在条件一语言加工时与之产生冲突,条件一语言规则的加工需建立在旧语言规则之上进行。学习者加工 AGL 特有句法结构和句法相似性极低的句法结构时,大脑神经机制由单相晚期正波效应和波幅较小的 P600 效应逐渐转变为双相的 AN-P600 效应和 LAN-P600 效应,加工 AGL 特有句法结构违反句时出现的 P600 波幅最大,P600 波幅

越大学习者句法加工越充分^{[37][26]},最终能够获得与母语者相似的神经机制,是由于学习者从未接触过条件二、尤其是条件三的语言规则,加工时宛若一张白纸,重新构建。可见新语言知识和旧的语言知识的加工不是相互独立进行的,而是构建在就语言规则上的,说明句法相似性在一定程度上影响新语言规则的习得,而习得和加工过程中存在竞争机制。

4. 结论

为探讨人脑在习得新的语言规则时对习得年龄、输入量和句法相似性三大因素的依赖程度,本研究基于AGL范式,采用ERP技术手段,考察AGL学习者在不同输入量的情况下加工与母语具有不同相似性的三种句法结构。

实验结果证明,年龄不是语言学习的主要影响因素,输入量和句法相似性的影响也有一定的限制。成人可以通过隐性学习法,在特设的迷你语言学习范式中习得新的语言机制,并表现出趋近于母语者的自动加工模式。人脑在新的语言规则学习过程中十分高效且自动化,可以通过少量的语言规则知识输入,无监督情境下,掌握一种乃至多种语言规则,并达到高熟练水平,加工模式类似母语。新语言规则学习和加工过程存在竞争机制,相似度低的新语言规则比相似度较高的新语言规则习得效果更好,表现出旧语言规则对新语言规则学习的冲突处理,新语言规则的学习需要架构在旧语言规则之上。

本研究丰富了AGL范式下的句法学习理论,并可以为人工智能时代机器学习和人类与机器人互动(Human-Robot Interaction, HRI)等研究提供一些启示。机器学习根据数据处理是否存在人为标注而分为监督学习和无监督学习两大类:监督学习目标是带有标签的数据,通常学习效果好,但代价是昂贵的;无监督学习相当于自助式学习,即计算机可以独立自主地吸收和理解数据,不必告知明确数据含义。无监督学习和人类学习方式更类似,被Andrew Ng誉为“人工智能最有价值的地方”,Facebook人工智能负责人Yann LeCun也在访谈中公开表示,无监督学习是未来,在无监督学习方面,大脑远好于我们的模型,这意味着我们的人工智能学习系统缺失了许多生物机理学习的基本原则。在无监督学习条件下,目前的机器学习往往是基于大数据的,我们的研究表明,人脑在无监督学习条件下,通过小数据就可以获得规则的高熟练水平掌握;学习者可以在短时间内习得基本没有语义内容的语音串,并类推到新句法规

则,今后的研究以人脑实验结果为出发点,尝试在小数据模式下进行机器学习的新探索,或许会是实现高效HRI研究的一个契机。

参考文献

- [1] Kennedy, & D. (2005). What don't we know?. *Science*, 309(5731), 75-75.
- [2] Caffarra, S., Molinaro, N., Davidson, D., et al. Second language syntactic processing revealed through event-related potentials: An empirical review[J]. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 2015: 31-47.
- [3] Hahne, A., & Friederici, A. D. Processing a second language: late learners' comprehension mechanisms as revealed by event-related brain potentials[J]. *Bilingualism: Language and Cognition*, 2001, 4.
- [4] Steinhauer, K., White, E. J., & Drury, J. E. Temporal dynamics of late second language acquisition: Evidence from event-related brain potentials[J]. *Second Language Research*, 2009, 25 (1): 13-41.
- [5] Lenneberg, E. H., Chomsky, N., & Marx, O. Biological foundations of language[J]. *Hospital Practice*, 1967, 2(12): 59-67.
- [6] Friederici, A. D., Steinhauer, K., & Pfeifer, E. Brain signatures of artificial language processing: evidence challenging the critical period hypothesis[J]. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 2002, 99: 529-534.
- [7] Rossi, S., Gugler, M. F., Friederici, A. D., et al. The impact of proficiency on syntactic second-language processing of German and Italian: evidence from event-related potentials[J]. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2006, 18(12): 2030-2048.
- [8] Hahne, A. What's different in second-language processing? Evidence from event-related brain potentials[J]. *Journal of Psycholinguistic Research*, 2001, 30: 251.
- [9] White, L. *Second Language Acquisition and Universal Grammar*[M]. Cambridge University Press, Cambridge, 2003.
- [10] MacWhinney, B. *A unified model of language acquisition*[M]. Oxford University Press, 2005.
- [11] Reber, A. S. Implicit learning of artificial grammars[J]. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 1967, 6: 855-863.
- [12] Petersson, K. M., Folia, V., & Hagoort, P. What artificial grammar learning reveals about the neurobiology of syntax[J]. *Brain and Language*, 2012, 120(2): 83-95.
- [13] Tabullo, A., Sevilla, Y., Segura, E., et al. An ERP study of structural anomalies in native and semantic free artificial grammar: evidence for shared processing mechanisms[J]. *Brain Research*, 2013, 1527: 149-160.
- [14] 袁毓林. 基于统计的语言处理模型的局限性[J]. 语言文字应, 2004, 2: 99-108.
- [15] Morgan-Short, K., Deng, Zh. Z., Brill, S., et al. A view of the neural representation of second language syntax through artificial

- language learning under implicit contexts of exposure[J]. *Studies in Second Language Acquisition*, 2015, 37(2): 383-419
- [16] Opitz, B., & Hofmann, J. Concurrence of rule- and similarity-based mechanisms in artificial grammar learning[J]. *Cognitive Psychology*, 2015, 77: 77-99.
- [17] Kepinska, O., Rover, Caspers, et al. Connectivity of the hippocampus and Broca's area during acquisition of a novel grammar[J]. *NeuroImage*, 2018: 1-10.
- [18] Friederici, A. D., Pfeifer, E., & Hahne, A. Event-related brain potentials during natural speech processing: Effects of semantic, morphological and syntactic violations[J]. *Cognitive Brain Research*, 1993, 1: 83-192.
- [19] 陈嘉映. 简论人工语言和逻辑语言[J]. 云南大学学报(社会科学版), 2008, 7(2): 17-19.
- [20] Christiansen, M. H., Conway, C. M., & Onnis, L. Similar neural correlates for language and sequential learning: Evidence from event-related brain potentials[J]. *Language and Cognitive Processes*, 2012, 27 (2): 231-256.
- [21] Hawkins, R. The theoretical significance of Universal Grammar in second language acquisition[J]. *Second Language Research*, 2001, 17(4): 345-367.
- [22] Barber, H., & Carreiras, M. Grammatical Gender and Number Agreement in Spanish: An ERP Comparison[J]. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2005, 17 (1): 137-153.
- [23] 陆俭明. 汉语句子的特点[J]. 汉语学习, 1993, 1: 1-6.
- [24] 张伯江. 汉语限定成分的语用属性[J]. 中国语文, 2010, 3: 195-207.
- [25] Kotz, S. A., Holcomb, P. J., & Osterhout, L. ERPs reveal comparable syntactic sentence processing in native and non-native readers of English[J]. *Acta psychologica*, 2008, 128(3): 514-527.
- [26] Sabourin, L., & Stowe, L. A. Second language processing: when are first and second languages processed similarly[J]. *Second Language Research*, 2008, 24 (3): 397-430.
- [27] Ojima, S., Nakata, H., & Kakigi, R. An ERP study of second language learning after childhood: Effects of proficiency[J]. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2005, 17(8): 1212-1228.
- [28] Carrasco-Ortiz, H., Herrera, A. V. Jackson-Maldonado, D., et al. The role of language similarity in processing second language morphosyntax: Evidence from ERPs[J]. *International Journal of Psychophysiology*, 2017: 91-110.
- [29] Bowden, H. W., Steinhauer, K., Sanz, C., et al. Native-like brain processing of syntax can be attained by university foreign language learners[J]. *Neuropsychologia*, 2013, 51(13): 2492-2511.
- [30] Lelekov-Boissard, & Dominey, P. Human brain potentials reveal similar processing of non-linguistic abstract structure and linguistic syntactic structure[J]. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 2002, 32(1): 72-84.
- [31] Molinaro, N., Barber, H., A., & Carreiras, M. Grammatical agreement processing in reading: ERP findings and future directions[J]. *Cortex*, 2011, 47(8): 908-930.
- [32] Kaan, E., Harris, A., Gibson, E., et al. The P600 as an index of syntactic integration difficulty[J]. *Language and Cognitive Processes*, 2000, 15(2): 159-201.
- [33] Friederici, A. D. Towards a neural basis of auditory sentence processing[J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2002, 6(2): 78-84.
- [34] Friederici, A. D., Pfeifer, E., & Hahne, A. Event-related brain potentials during natural speech processing: Effects of semantic, morphological and syntactic violations[J]. *Cognitive Brain Research*, 1993, 1: 83-192.
- [35] 耿立波. 汉语母语者英语形态加工、形式加工的分离——来自 ERP 的证据[J]. 语言科学, 2012, 11(6): 572-585.
- [36] Carpenter, H. S. A behavioral and electrophysiological investigation of different aptitudes for L2 grammar in learners equated for proficiency level[D]. Georgetown University, 2008.
- [37] Tokowicz, N. B., & MacWhinney. Implicit and explicit measures of sensitivity to violations in second language grammar[J]. *Studies in Second Language Acquisition*, 2005, 27(2): 173-204.