

# 序列学习习得行为与事件相关电位相关性的实验研究

张悦<sup>1</sup> 付秋芳<sup>2</sup> 傅小兰<sup>2</sup> 高小榕<sup>1</sup>

**摘要** 研究序列学习行为学习表现的脑电特征。实验中,被试对一 12 元素长的二阶序列进行反应任务,同时记录其脑电信号,序列中随机出现不符合序列规则的异常刺激。实验结果表明,标准刺激的反应时相对异常刺激逐渐减小,这一反应时受益即为被试学习到序列知识的行为表现。根据反应时受益程度将序列组块分类为习得组块与未习得组块后,对习得组块,异常刺激在学习前、后半段均引起了更大的 N200 成分,未习得组块则无此效应。实验结果说明:序列学习的习得行为表现存在一定组块效应。ERP 波形能够体现出与习得行为表现相关的神经活动。对习得组块,有可能学习早期即进行了一定特异的加工处理。

**关键词** 序列学习;事件相关电位;N200

**中图分类号** R318.04

**文献标识码** A

**文章编号** 1002-3208(2008)03-0244-05

**An experimental study on the correlation between the behavioral evidences of sequence learning and ERP effects**

ZHANG Yue<sup>1</sup>, FU Qiufang<sup>2</sup>, FU Xiaolan<sup>2</sup>, GAO Xiaorong<sup>1</sup> 1 Department of Biomedical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084; 2 Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

**【Abstract】** The experiment studies EEG evidences of behavioral effects of sequence learning. Event related potentials (ERPs) were recorded in a serial reaction time task (SRTT). The standard event sequence was interrupted by deviant stimuli. Reaction times (RTs) of standard stimuli decreases compared to deviant stimuli. Such behavioral performances confirm that subjects acquired some sequence knowledge. Sequence chunks were separated into learned chunks and unlearned chunks according to RT performances. The ERPs showed different effects for different type of chunks. For learned chunks, deviant stimuli evoked enlarged N200 component in both the first and second half of the experiment. For unlearned chunks, no such effects were observed. These results suggest that behavioral evidences of sequence learning show chunking effect. neural activities underlying behavioral learning effects are reflected by ERP correlates. Specific neural processing in the early phase of learning might be required for behaviorally learned chunks.

**【Key words】** sequence learning; ERP; N200

## 1 研究背景

意识到环境的序列规则并依此有序地组织行为是人类的一项重要心理机能。针对序列学习, Nissen 与 Bullmer (1987) 提出了一种序列学习的实验范式: 屏幕上依次呈现一系列不同的刺激物, 被试根据出现的刺激物做出相应的按键反应; 刺激物的出现符合一定序列规则, 而这一规则并不告知被试; 记录每次刺激出现后被试按键所需的反

应时。这一实验方法被称为序列反应时任务 (serial reaction time task, SRTT)<sup>[1]</sup>。序列反应时任务的行为学实验表明, 经过一段时间的训练, 被试对合乎序列规则刺激 (标准刺激) 的反应时将明显小于不合序列规则刺激 (异常刺激) 的反应时。这一反应时受益的行为说明被试学习到了一定序列规则知识<sup>[2-4]</sup>。

序列学习能力与人的正常学习记忆能力有紧密联系。正常老年人、阅读障碍 (dyslexia) 患者以及帕金森症 (Parkinson's disease, PD) 患者等人群均有序列学习能力出现损失的报道<sup>[5-7]</sup>。研究序列学习能力及其神经机制, 对揭示人脑的学习记忆机理、研究相关疾病以及学习障碍的诊断治疗方法等有重要意义。

**基金项目:** 国家自然科学基金 (60433030)、中国科学院心理研究所青年科学基金资助

**作者单位:** 1 清华大学生物医学工程系 (北京 100084)

2 中国科学院心理研究所 (北京 100101)

**作者简介:** 张悦, 硕士研究生

然而,目前序列学习脑机制的研究还比较薄弱。利用脑电事件相关电位(ERP)对序列学习进行过研究的有 Eimer (1996)<sup>[8]</sup>、R üseler (2001, 2003)<sup>[9-10]</sup> 以及 Schlaghecken (2000)<sup>[11]</sup>。在这些实验中,被试均在反应任务结束后进行了序列规则再现报告测试,以判断其是否得到了序列规则知识。Eimer及 R üseler将被试分为外显学习者(能够正确报告出一部分序列规则)以及内隐学习者(不能报告出序列规则)。Schlaghecken则将每个被试能正确再现的序列组块(序列的部分片断)提取出来,与未被正确再现的组块进行比较。尽管实验方法及具体结果略有差别,这些实验在这一点取得一致:对外显学习(能有意识再现序列规则)的被试序列组块,学习阶段异常刺激(不合序列规则)相比标准刺激(合乎序列规则)引起了更大的 N200 成分,且这一效应在学习阶段后半程比前半程更加显著。

上述实验均通过学习后的再现测试判断被试是否得到了序列规则的外显知识。然而,学习后的再现测试是否能正确评价被试获得的外显知识存在争议<sup>[11]</sup>。此外,大量实验表明,序列学习的习得行为表现可以独立于外显知识的获得,即:即使被试并未意识到序列规则的存在,也不能对其正确再现,其行为仍可体现出学习效应(反应时的获益)<sup>[12]</sup>。然而,此前的 ERP 实验均没有分析行为习得表现与脑电特征的关系,是否存在与行为习得表现相关脑电的表现尚待实验研究。与先前实验不同,本实验并不区分被试获得的知识是外显还是内隐的,而是以学习中反应时受益与否作为依据,对被试是否产生行为习得表现进行分类,并寻找是否存在与行为习得效应相关的脑电成分。

## 2 方法

### 2.1 被试

清华大学 16 名本科生自愿参加实验,其中,男生 10 名,女生 6 名。年龄从 20 至 23 岁,平均年龄 21.8 (SD = 0.9)。所有被试均为右利手,视力正常或矫正至正常,此前未参加过类似实验。

### 2.2 刺激材料与环境

刺激物为屏幕上不同水平位置上的 4 个圆点。相邻圆点圆心相距 2cm,由分辨率为 1280 × 1024 电

脑屏幕呈现,屏幕距被试双眼距离 80cm。被试坐在舒适的座椅中,并避免除按键反应外的身体动作。

### 2.3 实验程序

实验阶段,被试根据屏幕上刺激出现的位置按键盘上的相应键,从左到右四个圆点分别对应于键盘上的 D、F、J、K 键(图 1)。刺激物按以下顺序呈现(1-4 代表从左到右的四个圆点): SOC1 = 3 - 4 - 2 - 3 - 1 - 2 - 1 - 4 - 3 - 2 - 4 - 1 - 3 - 4 - (2)。该序列为二阶序列(second-order conditional sequences, SOC)。二阶序列中,连续两个刺激位置决定下一个刺激的位置,如在此 SOC1 序列中,前两个刺激出现在 3 - 4 位置,则下一个刺激一定出现在 2,以此类推。SOC 序列可以从任何一个位置开始,循环进行,其中每个位置出现的概率均等。实验中,87.5% 的刺激为标准刺激,标准刺激出现符合 SOC1 的序列规则。另有 12.5% 的刺激为异常刺激,异常刺激来自以下序列: SOC2 = 3 - 4 - 1 - 2 - 4 - 3 - 1 - 4 - 2 - 1 - 3 - 2 - 3 - 4 - (1)。异常刺激出现的位置是随机的。连续三个位置构成的子序列称为序列组块(chunk)(如 3 - 4 - 2 为一个序列组块,4 - 2 - 3 为另一个序列组块),SOC 序列中有 12 个不同的组块。对每个组块(如前两个刺激为 3 - 4),都有 87.5% 的刺激为标准刺激(3 - 4 - 2),12.5% 为异常刺激(3 - 4 - 1)。

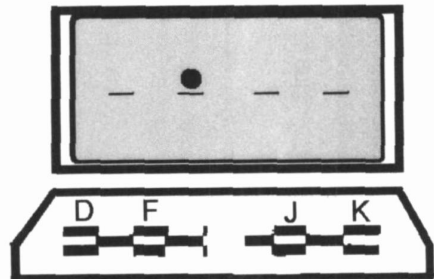


图 1 刺激物示意图

Fig 1 Stimulating screen

实验中,被试者并不知道刺激遵循一定规律,而仅被要求尽量既快又准地按键。反应任务包括 15 个组段(block),每个组段有 98 个刺激(trial),其中第一、二个刺激的位置是随机的,随后将按 SOC1 序列规律(12.5% 为异常)进行。反应刺激间隔为 500ms,每个组段之间休息 30s。

刺激物出现在屏幕四个位置上,从左到右四个

位置分别对应键盘上的 D、F、J、K 键 (如图中圆点出现在从左数第二个位置,应按 F 键进行反应)。

### 2.4 EEG 记录

采用 BioSemi 公司 EEG 记录系统,记录 60 导脑电,其中 Fz、Cz、Pz 等电极的位置与 10-20 系统一致。在双眼外侧安置电极记录水平眼电 (HEOG),左眼上下安置电极记录垂直眼电 (VEOG)。每个电极处的头皮电阻保持在 5 k 以下。采样频率为 256Hz。数据经离线处理后以所有导联的平均电位作为参考,并通过 0.05 ~ 35Hz 离线滤波。

### 2.5 行为数据分析

对每个被试,分别计算 12 个组块在学习前半段 (1-7 组段) 以及后半段 (8-15 组段) 的平均反应时 (标准、异常刺激分别计算)。设学习前半段标准、异常反应时差  $D^1 = T_{devi}^1 - T_{std}^1$ ,后半段反应时差  $D^2 = T_{devi}^2 - T_{std}^2$ 。当  $D^2$  远大于  $D^1$ ,说明异常与标准刺激的反应时差异随反应任务的进行逐渐增大,即出现了行为学习效应,设  $D = D^2 - D^1$ 。按以下标准对序列组块进行分类:当组块的  $D > 30ms$ ,该组块判定为习得序列知识的组块,否则判定为未习得序列知识组块。分析中,反应时小于等于 150ms 或大于 550ms,以及按键反应错误的刺激均被排除。

### 2.6 ERP 数据分析

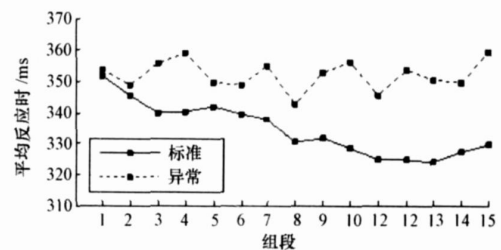
刺激出现前 100ms 到刺激出现后 700ms 为一个时程 (epoc)。以刺激前 100ms 到刺激出现的平均幅度作为基线。将全部 60 导连数据的平均值作为参考,每导连的响应由该导连的原始信号减去参考得到。将所有被试习得/未习得组块的标准、异常刺激的脑电响应分别进行总平均,得到习得/未习得组块标准与异常刺激的 ERP 波形。垂直或水平眼点幅度超过  $80\mu V$  的刺激、反应时小于等于 150ms 或大于 550ms 的刺激,以及按键反应错误的刺激均被剔除。被剔除的刺激数量小于 10%。比较习得、未习得组块的 ERP 波形,对 N200 幅度 (150 ~ 250ms 时间窗内的平均电位) 以及 P300 幅度 (300 ~ 600ms 时间窗内的平均电位) 进行 2 (学习类型:习得/未习得)  $\times$  2 (刺激类型:标准/异常)  $\times$  2 (学习阶段:1-7/8-15 组段)  $\times$  3 (导联:Fz/Cz/Pz) 方差分析。

## 3 结果与分析

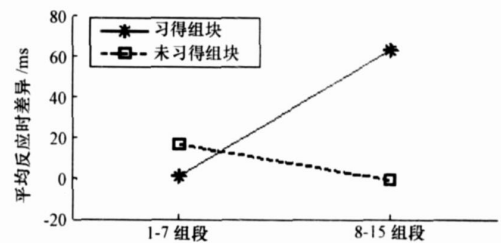
### 3.1 反应时与组块分类

图 2 上为全体被试在 15 组段的平均反应时。对反应时进行 2 (刺激类型:标准/异常)  $\times$  15 (学习组段:组段 1-15) 方差分析,刺激类型主效应 [ $F(1, 15) = 33.67, p < 0.001$ ],学习组段主效应 [ $F(15, 210) = 2.18, p = 0.01$ ],以及刺激类型  $\times$  组段交互作用 [ $F(14, 210) = 2.41, p = 0.004$ ] 均达到显著。数据说明,在整体水平上,异常刺激与标准刺激反应时之差随学习进行逐渐增大。即被试的行为表现出对序列知识存在学习效应。

计算每个组块  $D$ 。按方法中所述标准,16 个被试均获得了习得,以及未习得组块。习得组块占全部组块总数量的 39%。两类组块学习前、后半段的平均标准、异常反应时差 ( $RT_{devi} - RT_{std}$ ) 见图 2 (b)。



(a) 每个组段的总平均反应时



(b) 1-7 组段及 8-15 组段平均反应时差异 ( $RT_{devi} - RT_{std}$ )

图 2 标准、异常刺激平均反应时及其差异

Fig 2 Reaction time of standard and deviant stimuli

### 3.2 ERP 波形

对习得组块,异常刺激相比标准 N200 幅度更大 (图 3),而未习得组块则无此效应。对 N200 幅度进行 2 (学习类型:习得/未习得)  $\times$  2 (刺激类型:标准/异常)  $\times$  2 (学习阶段:1-7/8-15 组段)  $\times$  3 (导联:Fz/Cz/Pz) 方差分析。学习类型  $\times$  刺激类型  $\times$  导联交互作用显著 [ $F(2, 30) = 3.98, p = 0.029$ ]。

而学习类型  $\times$  刺激类型  $\times$  学习阶段  $\times$  导联交互效应未达到显著 [ $F(2, 30) = 0.92, p = 0.408$ ]。进一步地, 分别对习得组块、未习得组块的 N200 幅度进行 2 (刺激类型: 标准/异常)  $\times$  2 (学习阶段: 1-7/8-15 组段)  $\times$  3 (导联: Fz/Cz/Pz) 方差分析。对习得组块, 刺激类型 (标准/异常) 主效应显著 [ $F(1, 15) = 0.8078, p = 0.010$ ], 刺激类型  $\times$  导联交互作用显著 [ $F(2, 30) = 3.73, p = 0.036$ ], 刺激类型  $\times$  学习阶段  $\times$  导联交互效应则未达到显著 [ $F(2, 30) = 0.81, p = 0.453$ ]。对未习得组块, 刺激类型 (标准/异常) 主效应, 刺激类型  $\times$  导联交互作用, 以及刺激类型  $\times$  学习阶段  $\times$  导联交互效应则未达到显著 ( $p = 0.367, p = 0.798, p = 0.110$ )。统计分析及波形 (图 3) 说明, 对习得组块, 异常刺激相比标准 N200 幅度更大, 且这一效应从学习前半程 (1-7 组段) 即开始体现, 前、后半程之间没有明显差异。未习得组块标准与异常刺激 N200 幅度则始终没有显著差异。

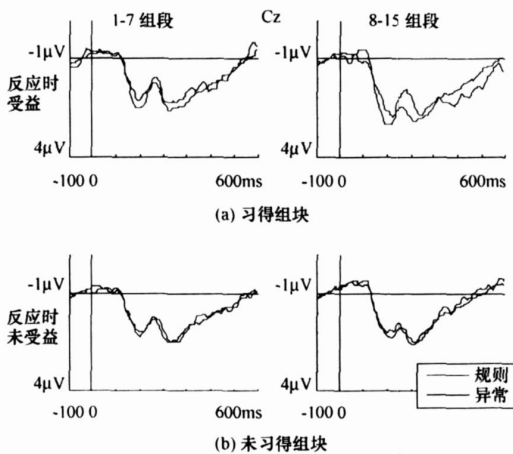


图 3 Cz 导联平均 ERP 波形  
Fig 3 Average ERP wave of Cz

对 P300 幅度进行类似方差分析。刺激类型主效应以及全部交互作用均未达到显著。分别对习得组块、未习得组块进行方差分析。习得组块刺激类型主效应以及全部交互作用均未达到显著, 未习得组块刺激类型主效应以及全部交互作用均未达到显著。统计分析及波形显示, 习得组块与未习得组块, 异常刺激均未引起显著 P300 效应。

### 4 讨论

总体水平上, 标准刺激反应时相对异常刺激逐渐下降, 这一行为表现说明被试学到一定序列知识。对每个组块的反应时进行单独分析发现, 39% 的序列组块出现学习效应 ( $D > 30ms$ ), 而其他序列组块并没有表现出反应时获益倾向 [图 2 (b)], 称这种在部分序列材料上表现出学习效果的现象为组块效应。Schlaghecken 实验发现, 学习后再现测验存在组块效应。本实验则表明, 反应时受益同样存在组块效应。综合本实验以及先前实验结论, 作者认为, 序列学习有可能是以首先获得部分序列材料知识的方式组织的, 而不是在全部序列知识上获得均等的学习效果。

本实验首次尝试以反应时为依据, 对是否出现序列知识习得行为表现进行分类, 并研究习得行为与脑电特征的相关性。实验结果表明, ERP 特征在习得/未习得序列材料确实出现分离, 这说明: 出现序列规则行为为习得现象, 需要神经系统对序列知识进行一定特异加工。ERP 波形能够体现出与习得行为表现相关的神经活动。习得行为的 ERP 效应表现为异常刺激引起更大的 N200 成分, 这一现象与 Eimer, Rüssler 及 Schlaghecken 等人实验的报道相一致。然而, 在此前实验中 (以学习后再现测验为依据对学习状态进行分类), 学习后半程差异刺激 N200 增强效应比前半程更加显著。而本实验中 (以学习中反应时为依据对学习状态进行分类), 脑电波形在学习前半程即出现与习得行为相对应的特征, 且前、后半段脑电波形的差异不显著。本实验结果表明, 序列学习是否最终会取得行为习得效应, 在学习早期的 ERP 特征即能得到体现。

习得组块学习前半段标准、异常刺激反应时之差很小 [图 2 (b)], 但仍然出现了 N200 幅度差异, 说明习得组块标准、异常刺激的 ERP 波形差异不应归因为反应时差异造成的结果。因此, 异常刺激造成的 N200 成分, 应该反映神经系统对序列知识进行了一定编码、存储活动。实验结果支持这一推测: 在序列学习中, 可能只有在学习早期即进行了这种特异处理的序列知识, 才会最终取得习得效应。当然, 本实验不能说明, 随着学习继续进行, 被试是否会获得更多的序列知识, 这一推论

还需要进一步实验的支持。

实验没有找到与习得行为对应的 P300 幅度差异。先前实验中, Eimer 的实验一同样没有发现 P300 效应, 而将异常刺激出现的概率增大后, 发现了轻微的 P300 效应。序列学习实验中异常刺激是否引起 P300 可能与序列长度, 异常刺激出现的概率等参数有关, 也可能与被试对序列知识的学习程度有关。经典 P300 实验中, 被试只需对异常刺激进行特定任务反应, 而在序列学习实验中, 被试对标准、异常刺激均需做出反应, 这可能是序列学习实验范式没有出现显著 P300 效应的原

因。实验结果表明, 脑电可以作为一种序列学习行为习得效果的生理检测指标, 并为利用脑电进行序列学习能力检测、相关脑机能障碍诊断等应用性研究提供了有力支持。

参考文献

[ 1 ] Nissen MJ, Bullemer P. Attentional requirements of learning: Evidence from performance measures *Cognitive Psychology*, 1987, 19: 1 - 32

[ 2 ] Hoffman J, Sebold A, Stöcker C. Irrelevant response effects improve serial learning in serial reaction time tasks *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 2001, 27(2): 470 - 482

[ 3 ] Jiménez L. Intention, attention, and consciousness in probabilistic sequence learning. In: Jiménez L. *Attention and implicit learning*. Amsterdam: John Benjamins Publishing Company, 2003: 43 - 68

[ 4 ] Willingham DB, Wells LA, Farrell JM. Implicit motor sequence

learning is represented in response locations *Memory & Cognition*, 2000, 28: 366 - 375.

[ 5 ] Howard JH, Howard DV. Age differences in implicit learning of higher order dependencies in serial patterns *Psychology and Aging*, 1997, 12(4): 634 - 656

[ 6 ] Howard JH, Howard DV, Japikse KC, et al. Dyslexics are impaired on implicit higher-order sequence learning, but not on implicit spatial context learning *Neuropsychologia*, 2006, 44(7): 1131 - 1144.

[ 7 ] Helmuth, LL, Mayr U, Daum I. Sequence learning in Parkinson's disease: a comparison of spatial-attention and number-response sequences *Neuropsychologia*, 2000, 38(11): 1443 - 1451.

[ 8 ] Eimer M, Goschke T, Schlaghecken F, et al. Explicit and implicit learning of event sequences: evidence from event-related brain potentials *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 1996, 22: 970 - 987.

[ 9 ] Rüsseler J, Rösler F. Implicit and explicit learning of event sequences: evidence for distinct coding of perceptual and motor representations *Acta Psychologica*, 2000, 104: 45 - 67.

[ 10 ] Rüsseler J, Hennighausen E, Münte TF, et al. Differences in incidental learning of sensorimotor sequences as revealed by event-related brain potentials *Cognitive Brain Research*, 2003, 15: 116 - 120.

[ 11 ] Schlaghecken F, Stümer B, Eimer M. Chunking processes in the learning of event sequences: Electrophysiological indicators *Memory & Cognition*, 2000, 28(5): 821 - 831.

[ 12 ] Cleeremans A, Jiménez L. Implicit sequence learning: The truth in the details. In: Stadler MA, Frensch PA, Eds. *Handbook of implicit learning*. Thousand Oaks, CA: Sage, 1998: 323 - 364.

(2007 - 04 - 13, 2008 - 01 - 14 修回)

(上接第 243 页)

眼剥夺情况下与正常情况下短时记忆的比较, 应用不同的评价方法, 在一定程度上揭示了睡眠不足对大脑的损害, 拟为进一步的基础研究提供帮助, 也期待更多科学研究深入揭示睡眠与大脑的奥秘。

参考文献

[ 1 ] 张述祖, 沈德立. 基础心理学 [M]. 北京: 教育科学出版, 1987: 391 - 393.

[ 2 ] 徐健. 睡眠剥夺降低学习记忆能力的研究进展. 国外医学儿科学分册, 2003, 30(4): 196 - 199.

[ 3 ] 施壮华, 沈模卫. 心理学中脑电研究方法探讨. 心理科学,

2002, 25(1): 88 - 90.

[ 4 ] Hogan MJ, Swanwick GRJ, Kaiser J, et al. Memory-related EEG power and coherence reduction in mild Alzheimer's disease [J]. *Psychophysiology*, 2003, 49(2): 147 - 163.

[ 5 ] 吴馥梅. 关于兴奋与抑制的生理学概念 [J]. 现代特殊教育, 2001, (8): 41 - 42

[ 6 ] Kalashnikova LA, Gulevskaya TS, Kashina EM, et al. Disorders or higher mental function manifesting as dementia due to ischemic in bilateral thalamic [J]. *Neurosci Behav Physiol*, 1999, 29(4): 397.

(2007 - 05 - 11 收稿)

