

# 听觉处理的大脑编码机制及其与二语习得的相互作用

罗芳恋

362226198708\*\*\*\*\*

**摘要:** 听觉处理是语言输入的“第一道门户”，决定了学习的“起点质量”，还是连接“输入”与“输出”的桥梁，影响着能力的“转化效率”，更是长期语感形成的“隐形基石”，决定了学习的“最终高度”。听觉处理的重要性在二语习得中的作用不言而喻，那么对于在无注意或有注意参与的情况下，大脑对听到的信息是如何加工的，听觉信息在大脑中能否形成长期的记忆表征？听觉处理如何促进二语句法的自动加工？以及双语经验如何促进听觉系统的神经可塑性？就是本篇文章将要探讨的问题，本文前两个部分先梳理了听觉注意的选择理论和听觉感知的相关神经理论，接着进一步深入分析大脑对听觉信息的编码及存储机制，为后续剖析听觉处理在二语句法自动加工的作用上进行理论铺垫，之后讨论了二语学习对听觉神经可塑性的影响，揭示了听觉神经系统和二语学习之间是一个相互促进的过程。

**关键词:** 交互模型；注意晚期选择；语音感知；失配负波（MMN）；自动加工；语音痕迹；神经可塑性

**DOI:** 10.69979/3029-2735.26.01.082

## 1 听觉处理中注意力的选择假说

听觉处理指用于从声音中提取有意义信息的广泛感官和感知技能。在无注意参与的情况下，大脑会对听到的信息进行处理吗？这是我们接下来要讨论的问题。交互模型（Kraus&Banai, 2007）提出听觉处理是一组感知、认知和运动能力——对声学细节的感知（敏锐度），相关和不相关维度的选择（注意力），以及将音频输入转换为运动动作（整合）。注意力在听觉处理中起着承上启下的作用，注意的神经机制也受到学者们的广泛关注，自从对选择性听力进行开创性研究（Cherry, 1953）以来，注意力选择是否基于以下因素而发生，一直存在争议：被关注声音的简单物理特征（例如，位置或音调）或它是否反映了更高层次（例如语义）的处理——即注意的早期选择观和晚期选择观。早期的心理物理学研究表明，在意识选择语音时，会影响低级听觉特征（Broadbent, 1954）。后来的研究表明，由于无人关注的单词和被关注词在语义上具有相关性，当被关注词出现时，无人关注的单词可能会减缓对重合出现的被关注词的处理，支持后期选择模型（Deutsch 和 Deutsch, 1963; Lewis, 1970）。根据（Nätänen, 1990）的研究发现，在选择性听力中是听觉皮层中所谓的“注意力轨迹”的逐渐积累。该轨迹表示物理特征（例如位置或音调）区分相关声音和无关声音，以及所有将传入的声音与此轨迹进行比较，仅匹配选择一个用于进一步处理。因此，语义不影响早期语音处理的假设仍然存在，并且

已经得到了电生理学研究的一些支持。然而，最近的一些研究表明，语义特征本身可能调节听觉皮层的处理：一项脑电图研究，利用连续自然语音和语音幅度包络解码分析表明，大脑皮层活动在响应语音信号时，不仅与语音的振幅包络同步，而且这种同步活动还受到单词词和它所在句子上下文间的语义关联强度的调制（Broderick et al., 2019）。重要的是，这种语义调制早在单词出现后 50-100ms 就很明显，这表明了语义对早期皮层处理的调节。因此，越来越多的证据表明，语音和语义等高阶信息干预了低级听觉处理（see also, Rutten et al., 2019）。Wikman 及其同事（Wikman et al., 2021）采用功能磁共振成像（fMRI）结合多变量模式分析（MVPA）和心理生理交互作用（PPI）等方法，探究注意如何动态调节大脑对视听语音的处理，研究结果表明：1. 注意调节涉及广泛的脑网络，包括感觉区和前额控制区，注意选择基于高级语义信息而非低级声学特征；2. 语义连贯性影响了初级听觉皮层的注意相关活动。这也是语义影响早期听觉处理的一个强有力的证明，挑战了严格的早期选择观。这也弥补了人类在嘈杂环境中听语音的能力远超 AI 的原因的神经机制理论的空白。基于以上研究，本篇文章倾向于支持注意晚期选择观假说。

## 2 听觉处理中语音感知的神经基础

Nätänen（Nätänen, 2001）通过 Mismatch negativity (MMN) 揭示了语音感知的神经基础。研究发现语音感知依赖左半球后部听觉皮层的语言特异性痕

迹, 这些痕迹在婴儿期(6-12个月)形成, 研究表明 MMN 可客观追踪语音痕迹的神经形成, 并能追踪外语学习中的神经可塑性, 还证实成人通过训练可建立新的语音表征。

尽管多数证据支持 MMN 是前注意自动加工(昏迷、睡眠中仍存在)(Näätänen, R, 1990), 但部分研究(如 Woldorff et al. 1991)发现注意可调制 MMN 振幅, 引发其是否完全“自动”的争议。傅世敏, 魏景汉(傅世敏, 魏景汉, 1996)通过改进实验模式, 严格控制非注意听觉条件, 研究了听觉 MMN 与自动加工的关系。实验结果发现, 在 140-180ms 时程内, 注意和非注意条件下的 MMN 无显著差异, 而在 180-220ms 时程, 注意听觉条件比非注意条件下的听觉偏离相关负波波幅更大, 为“听觉 MMN 反映自动加工”的观点提供了新证据, 同时也提示听觉信息的早期加工是完全自动的, 而晚期加工是部分自动的, 注意机制在晚期起作用。而语音感知属于听觉处理过程的早期加工, 所以基于以上研究, 本篇文章支持 MMN 能够反映听觉语音感知的自动加工的假说。

### 3 大脑对听觉信息的编码机制

基于以上论述, 本篇文章倾向于支持以下两种假说: 第一是注意的晚期选择观: 认为所有输入的信息都得到完全(包括语义)加工, 注意选择发生在后期反应阶段, 并支持未被注意的语义信息也能被加工并干扰注意信息; 第二是 MMN 反映大脑语音感知的自动加工理论, 即 MMN 反映前注意阶段的语音加工能力: MMN 振幅越大, 表明大脑对语音差异的自动检测能力越强, 即学习者对该语音对比的感知越敏感; MMN 潜伏期越短, 反映大脑加工语音差异的速度越快, 提示学习者对该语音的自动化识别更熟练, 若潜伏期较长, 可能意味着对语音差异的感知仍处于低效的有意识加工阶段。基于上述两种假说, 我们认为在无注意参与下, 大脑能够自动加工听觉信息: 不仅是语音信息, 还包括高级语义信息, 并且 MMN 能够反映大脑的自动加工机制。那么对于在无注意参与下, 大脑自动加工的信息, 能否形成长期的记忆表征? 有研究给出了否定观点: Wood 等人(Wood, N. L., Stadler, M. A., & Cowan, N., 1997)的研究结果证明内隐记忆需要最低限度的注意, 这与在这项任务中对无人值守的听觉信息进行广泛语义处理的说法相矛盾。而 Huttmacher, F., & Kuhbandner, C. (Huttmacher, F., & Kuhbandner, C., 2020)进行的一项研究则给出了肯定观点, 其研究结果表明, 对于无人关注和无关的信息, 大脑能够形成详细而持久的长期记忆表征, 这些信

息是以与有人关注的信息不同的感官形态编码的。最近的一项研究(Fuhrer, J. et al., 2025)通过颅内脑电图(iEEG)技术揭示了大脑在无注意参与(被动状态)下, 自动编码随机听觉系列中统计结构的神经机制, 挑战了传统认为随机序列缺乏结构的观点, 证明了大脑能从中提取统计规律(如: 过度概率(TPs)), 支持“大脑是主动预测器官”的理论框架(如预测编码理论); 还揭示了TPs的编码是自动、持续的(即使无注意参与), 且依赖分布式网络(包括海马、前额叶等非听觉区), 而非局限于听觉皮层, 这也揭示了语言习得机制: TPs是语言分割(如婴儿从语音流中识别单词)的关键线索, 结果可揭示语言发展的神经基础。

因此, 无论是有注意参与的听觉加工, 还是无注意参与的听觉加工, 都能在大脑中进行编码及记忆存储, 为听觉输入在二语句法自动加工中的作用提供了理论基础。

### 4 听觉处理在二语习得中的作用

传统观点认为听觉处理主要影响二语语音习得(Sun, H., Saito, K., & Tierney, A., 2021)、(Saito et al., 2022), 对形态句法等高级技能影响微弱。基于大脑是否能对二语句法进行自动加工, 普遍存在着两个解释二语句法加工的理论模型: 统一竞争模型(MacWhinney, 2008)和浅层结构假说(Clahsen & Felsner, 2006 a, 2006 b)。基于以上两种不同的句法加工模型, 有研究利用 ERP 技术, 在无注意条件下对二语句法中的主谓一致违反情况进行研究, 发现大脑在加工二语时, 产生了反映句法自动加工的脑电成分 MMN, 这表明即使二语在关键期之后获得, 大脑仍然能够对二语的句法进行自动加工(耿立波, & 杨亦鸣., 2013)。

基于以上研究, 本篇文章更倾向于支持句法加工的统一竞争模型, 即大脑能够对二语的句法进行自动加工, 而对于听觉处理对形态句法等高级技能的影响, Saito, K. 等人(Saito, K. et al., 2024)研究发现听觉处理交互模型(Kraus & Banai, 2007)的三个核心成分: 感知敏锐度、注意控制和听觉-运动整合, 对语音和形态句法均有显著预测力, 且效应量相当, 也就是说, 听觉处理对形态句法习得的影响与语音习得相当。那么听觉处理如何促进二语句法的自动加工呢?

Kachlicka, M. 等人(Kachlicka, M., Saito, K., & Tierney, A., 2019)通过研究听觉处理的行为和神经测量之间的相关性, 来调查声音神经编码的不同方面是否反映了不同的可分离听觉处理因素, 特别是研究

预测低频锁相(即基频)与时间处理相关,而高频锁相(语音共振峰)与频谱处理相关,因此可判断精确的听觉处理有助于第二语言学习,研究发现心理声学阈值与元音感知和语法判断相关,更成功的语言学习者有更一致的频率跟随反应。此外, Fernandez, L. 等人(Fernandez, L., Höhle, B., Brock, J., & Nickels, L., 2018)的研究也部分地调和了上述观点, Fernandez, L. 等人通过瞳孔测量法考察了英语母语者和熟练的晚期二语学习者对句法移动的处理,发现晚期二语英语学习者在处理口语中的中间空缺结构时能够构建丰富的句法表征,且声学分析揭示了可能促进这些结构处理的声学线索。除了进行对听觉处理行为和神经表征之间的相关研究,还有研究分析了课堂环境中,听觉处理在二语学习中的作用(Saito, K., Suzukida, Y., Tran, M., & Tierney, A., 2021), 研究分析了39名越南的以英语作为外语的学习者的自发语音样本,发现参与者对词汇语法的准确使用与音频-运动序列整合分数之间存在中等到强的相关性。

以上研究表明听觉处理在二语习得中有着及其关键的作用,几乎贯穿包括语音、词汇、句法、语义等语言学习的各个方面,因此我们有理由相信,通过制定合理有效的听力训练策略,能够有效提高学习者的二语水平,并且听力训练不应该只出现在二语学习的初级阶段,而应该伴随二语学习的始终。

## 5 二语学习对听觉神经可塑性的影响

双语对大脑有着深远的影响,语言的处理和执行功能会致使大脑产生功能和语言皮层区域的结构变化(Crinion J, et al., 2006)、(Kim KHS, et al., 1997)。在生理水平上,说普通话的人在其听觉系统的皮层和皮层下水平上对普通话声音的音调内容表现出更稳健的编码,这表明语言体验从根本上改变了听觉通路的神经回路(Krishnan, Xu, Gandour, & Cariani, 2005)。

传统观点认为,听觉处理是一个被动的,自下而上的过程(Helmholtz, H. L., 2009),后来的很多研究挑战了这一观点,认为听觉系统并非静态,而是具有高度可塑性,能够根据经验和环境进行调整:有研究表明(Krizman, J., Marian, V., Shook, A., Skoe, E., & Kraus, N., 2012),双语者表现出对基频(一种用于强调音调感知和听觉对分组的基础特征)的编码增强,且在噪声环境中,优势更显著,这种增强与双语者

的持续选择性注意能力正相关。研究揭示双语经验对皮层下听觉通路(脑干)的可塑性重塑,揭示了双语经验不仅重塑皮层语言网络,还优化了皮层下听觉通路的编码效率,提出“双语经验——增强注意控制——优化听觉编码”的闭环机制,为“感觉处理与高阶认知的交互”提供生物证据,呼应了注意力驱动皮层下可塑性(OPERA)假说,并且将双语与音乐训练(已知能增强听觉编码)类比,强调不同经验均可塑造共享神经通路。由此可以看出听觉神经系统与二语学习之间是相互影响相互促进的,精确的听觉处理有助于二语学习,而二语经验又能够重塑皮层语言网络,优化皮层下听觉通路的编码效率,优化听觉神经的可塑性。

## 6 问题与展望

本篇文章综述了大脑对听觉信息的编码机制、听觉处理在二语习得中的作用以及二语学习对听觉神经可塑性的影响,重点探讨了听觉处理对二语学习的句法加工的影响,虽然研究结果众多,但现有研究还是存在一些局限性:首先是现有研究分歧较大,且对于现有研究的分歧,难以形成统一的结论,比如二语句法加工的统一竞争模型和浅层结构假说;其次是现有研究大多都存在着研究样本量小的问题,使研究结果的准确性受到限制;再次是对影响二语预测的个体差异的研究还不够深入,例如不同学习风格、学习策略及情感因素等个体差异,如何与听觉表征相互作用,影响句法加工,还需要更多的研究。对于以上问题,未来这方面的研究需要更进一步设计更精细的实验、并且扩大研究样本,来探究听觉系统对二语加工的影响并增加研究结果的准确性。

## 参考文献

- [1]Bakkouche, L., & Saito, K. (2025). Effects of auditory processing, memory, and experience on early and later stages of second language speech learning. *Second Language Research*, 02676583251317909.
- [2]Krishnan, A., Xu, Y., Gandour, J., & Cariani, P. (2005). Encoding of pitch in the human brainstem is sensitive to language experience. *Brain Research: Cognitive Brain Research*, 25, 161-168.
- [3]耿立波, & 杨亦鸣. (2013). 第二语言句法的自动加工:来自脑电的证据. *外语教学与研究*, 45(3), 374-384.