

神经电生理及脑成像技术在汉语二语声调习得领域的应用

——对汉语教学的启示

陆灵犀 晋杨平

北京语言大学心理与认知科学学院（生命健康研究院），北京

摘要 | 声调习得是汉语二语习得的重要难点之一，也是汉语教学研究的核心议题。近年来，随着神经电生理和脑成像技术的发展，汉语二语声调习得的神经机制研究不断推进。行为与脑科学证据均表明，汉语学习者可通过短期声调训练或课堂学习在行为层面形成类似母语者的声调范畴感知模式，但在神经层面形成稳定的音位表征仍存在挑战。此外，学习者在词汇识别中使用声调线索的能力较弱，知觉训练和手势教学有助于提升其声调感知效果。更为重要的是，相关神经影像研究显示成人汉语学习者在学习过程中仍表现出一定的脑神经结构与功能可塑性。本文系统梳理了行为测量、脑电图（EEG）、脑磁图（MEG）及功能磁共振成像（fMRI）等技术在汉语二语声调习得研究中的实证成果，讨论当前研究中尚待解决的关键问题，并指出未来研究方向。

关键词 | 汉语二语习得；声调感知；脑电/磁图；功能磁共振成像；神经可塑性

Copyright © 2025 by author (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



1 引言

声调是区别汉语与多数语言的核心特征，也是汉语作为第二语言习得的突出难点（Shen, 1989；林焘，1996）。汉语四声以音高轮廓为主要线索，具有显著的词汇辨义作用。例如，同一音节“shu”因声调不同而分别对应“书、熟、属、树”等意义。大量研究指出，无论母语为非声调语言（如英语、韩语）还是声调语言（如泰语、越南语），学习者在汉语声调习得上均存在

不同程度的困难（韩明，2005；高玉娟等，2006）。

既有研究主要集中于母语背景对学习者的声调感知与产出的影响（Peng, 2010；陈默，2011；易斌等，2021）以及声调范畴化的发展（Hallé et al., 2004；张林军，2010a；王韞佳等，2011）。相比之下，利用神经技术探讨声调习得机制的研究仍相对有限。随着脑电图（Electroencephalography, EEG）、脑磁图（Magnetoencephalography, MEG）、功能磁共振成像（Functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI）的广泛

基金项目：北京市社会科学基金项目（21YJC010）。

通讯作者：陆灵犀，北京语言大学心理与认知科学学院研究员，研究方向：语言认知神经科学。

文章引用：陆灵犀，晋杨平。（2025）。神经电生理及脑成像技术在汉语二语声调习得领域的应用——对汉语教学的启示。《中国心理学前沿》，7(11), 1431-1437.

<https://doi.org/10.35534/pc.0711233>

应用,研究者得以从神经加工层面追踪学习者如何感知声调、形成音位表征,并在学习过程中展现神经可塑性(Wu et al., 2018; Gandour et al., 2003; Bidelman & Lee, 2015)。本文从声调范畴感知发展、学习者声调感知困难与训练方法、神经可塑性三方面出发,系统评述相关研究,并提出对汉语教学的启示。

2 汉语学习者的声调范畴感知模式的发展及神经表征

2.1 母语者声调范畴感知的早期发展

范畴感知(Categorical Perception)指个体能够将原本连续变化的语音信号划分并感知为若干离散的类别(如音位),表现为跨类别差异更易区分,而同一类别内部的细微物理差异则难以分辨。例如,汉语母语者能够稳定地区分阴平、阳平、上声和去声四个调类,而不太关注同一调类内部的绝对音高差异(Liberman et al., 1957; Studdert-Kennedy & Shankweiler, 1970; Kuhl, 2004; 张林军, 2010a)。因此,考察声调的范畴感知过程不仅有助于揭示母语者在声调加工中的知觉特点,同时也为探索汉语学习者在声调习得过程中面临的困难提供了重要切入点(Shen & Froud, 2016)。

在生命早期,婴儿的语音知觉经历从“普遍性知觉”向“母语特异性知觉”的重构。关于声调加工的知觉重构普遍发生在6~9个月之间(Mattock, 2006),其范畴化能力也随声调知觉的发展而逐渐成熟(Mattock, 2008)。研究表明,约6岁的汉语母语儿童在行为层面已经表现出与成人相似的声调范畴感知特征(Chen, 2016; Ma et al., 2021; Feng & Peng, 2022)。同时,10岁左右的儿童在神经层面也能在声调范畴间与范畴内刺激之间产生显著的脑电失匹配负波(Mismatch Negativity, MMN),显示其已形成早期的、自动化的声调音位表征(Zhang et al., 2012)。这些发现表明,声调范畴感知能力在生命早期依赖丰富的母语输入迅速发展,并在儿童期逐渐趋于成熟。

2.2 成人汉语学习者的声调范畴感知

与汉语母语者相比,没有声调语言经验的成人在建立声调范畴知觉方面通常面临更大的挑战。现有研究普遍认为,成人汉语学习者主要依赖两种途径提升声调感知能力:一是专门的声调知觉训练,二是系统的课堂学习(Wang, 1999; Wang & Kuhl, 2003; Wong & Perrachione, 2007; 张林军, 2010a, 2010b; Zhao & Kuhl, 2015; Shen, 2016; Yu et al., 2019)。

首先,大量实验均证实短期声调训练能够显著提升学习者的声调辨别水平(Wang, 1999; Wang & Kuhl, 2003; Wong & Perrachione, 2007; Zhao & Kuhl, 2015)。例如,美国学习者在接受为期两周的声调知觉训练后,其声调识别正确率可提升约21%(Wang et al., 1999),

而且这一训练效果并不受限于严格的年龄关键期(Wang & Kuhl, 2003)。此外,学习者的音乐背景也是影响声调习得的潜在因素。有音乐经验的英语母语者对音高变化更为敏感,表现出更好的声调差异感知能力(Zhao & Kuhl, 2015),并更容易把握汉语声调的音高轮廓(Wong & Perrachione, 2007)。不过,音乐经验虽然有助于音高线索的知觉,却似乎不足以促进真正的词汇声调范畴形成(Chan & Leung, 2020),两者并不具有直接对应关系。

其次,课堂学习同样能够促进成人学习者建立更接近母语者的声调范畴感知模式(张林军, 2010a, 2010b; Shen, 2016; Yu et al., 2019)。张林军(2010a)的研究表明,日本学习者在接受课堂学习后,其范畴化知觉明显提升;中级学习者虽然表现出类似母语者的分类模式,但对范畴内部的细微物理差异仍较为敏感,说明其精细化加工能力尚未完全成熟。这一发展趋势在韩国学习者的研究中也得到了印证(王韞佳等, 2011)。

母语背景是影响课堂学习效果的重要因素之一。Yu等人(2019)发现,具有声调语言经验(如越南语、泰语)的学习者在声调连续体辨别任务中反应更快、范畴化更明显,相比之下,无声调语言背景的学习者(如印尼语、吉尔吉斯语)表现更弱。然而,其他研究并未完全支持母语背景的促进作用。例如,张林军(2010b)比较了韩国(语调语言)、日本(音高重音语言)和泰国(声调语言)学习者,发现三组初学者在接受课堂学习后均能形成类似母语者的声调范畴感知模式,而其范畴化程度并无显著差异,表明声调母语经验并不一定在新声调范畴建立中起决定性作用。综上,虽然成人汉语学习者能够通过训练和课堂学习逐步形成声调范畴化,但母语背景、音乐经验以及学习方式对范畴化形成的具体影响仍存在不一致的研究结果,相关机制仍需进一步探究。

2.3 范畴感知模式的神经表征

尽管成人汉语学习者能够通过短期声调训练或长期课堂学习在行为层面表现出类似母语者的声调范畴识别模式,但其在神经层面形成自动化的音位表征仍然困难(Zhang & Wang, 2007; Shen & Froud, 2018; Yu et al., 2019)。张林军(2013)使用双耳分听范式考察学习者的声调加工偏侧化模式,发现部分已经建立较好范畴感知的学习者仍未呈现母语者典型的左侧化优势。张林军(2013)指出,行为层面的范畴化并不等同于能够在词汇加工中有效利用声调线索;只有当学习者能够将声调与词汇表征稳定地绑定并存储于长时记忆中(即形成音位表征),才能真正实现基于声调的词汇辨认和意义通达。Shen & Froud(2016)的研究进一步揭示了这一行为—神经分离现象。他们发现,汉语学习者在声调连续体听辨任务中可以表现出类似母语者的行为范畴感知模式,但在脑电反应上却明显不同。与母语者对范畴间偏

差刺激产生更强的MMN和P300相比,学习者对范畴内与范畴间刺激的MMN和P300响应无显著差异,说明学习者在注意阶段(MMN,约100–250 ms)与注意阶段(P300,约300 ms以后)均未形成神经层面的范畴化表征(Shen & Froud, 2018)。

这一观点在后续脑电研究中得到进一步支持。有学者发现,学习者在声调加工的早期阶段主要进行基于声学特征的自动声音处理,而非基于语言类别的语音处理(Yu et al., 2019; Xi et al., 2021)。值得注意的是, Xi等人(2021)发现,较高水平汉语学习者的P3b(P300的亚成分)在范畴间偏差上显著大于范畴内偏差,说明在注意加工阶段,他们开始出现一定程度的范畴化神经加工。这提示声调音位表征的形成与学习者的汉语熟练度密切相关。

综上,成人汉语学习者在行为上可以逐渐表现出母语者样的声调范畴感知,但在神经层面形成真正自动化的音位表征仍面临挑战,尤其是在前注意阶段的早期语音加工中,即使高水平学习者也难以达到母语者的加工水平。因此,在未来的汉语教学和神经机制研究中,有必要从神经层面进一步探索学习者如何有效建立稳定的声调音位表征,并明确影响该过程的关键因素。

3 汉语学习者声调感知的困难及相关训练方法

3.1 汉语学习者声调感知的困难

在汉语教学实践中,声调加工始终是学习者最具挑战性的能力之一。已有大量行为学证据表明,即便是达到高水平的汉语学习者,其在多种声调相关任务中仍面临显著困难(Pelzl et al., 2018, 2019, 2020, 2021)。例如, Pelzl等人(2018)发现,平均具有约十年学习经验的高水平学习者仅在孤立音节的声调判别任务中能够接近母语者水平;然而,在更具生态效度的语境中,如双音节词或句子中利用声调进行词汇识别时,其表现明显低于母语者。这表明,即使经过长期学习,学习者对声调的掌握仍然局限于低层次的感知水平,难以迁移至真实语言使用中。

在神经层面,学习者的困难更加突出。Pelzl等人(2020, 2021)在词汇辨别和图词匹配任务中发现,高水平汉语学习者在面对声调伪词时,脑电反应中并未产生典型的N400(与语义预测违背相关)或语音失匹配负波(Phonological Mismatch Negativity, PMN),说明他们不能有效利用声调线索触发语音或语义层面的加工。此外,在更复杂的句子语境中,学习者同样未能对声调伪词产生预期的N400效应(Pelzl et al., 2018),进一步表明其声调加工尚未形成自动化、语言层级的处理机制。

这些困难可从“音位表征”的角度得到较好解释。Pelzl等人(2019)指出,声调感知的成功依赖两个关键

条件:其一,是能够准确感知音高差异并将其与相应的声调范畴匹配;其二,也是更为关键的一点,是需要将声调信息与具体的词汇心理表征相整合,使其存储于长时记忆并在词汇检索时被自动激活。高水平学习者虽然可以进行一定的音高辨别,但由于缺乏稳定的声调音位表征,他们无法在词汇加工流程中自动利用声调线索进行词条检索(张林军, 2013)。换言之,他们的声调加工停留在感知层面,而未能真正进入语言认知的深层结构。

3.2 知觉训练和手势教学促进声调习得

在汉语声调教学中,传统的模仿与跟读方法仍占主导地位,但其在促进学习者对声调轮廓(音高走势)的敏感性及范畴化加工方面效果有限(张林军, 2010c)。近年来,越来越多的研究开始尝试采用更为系统化和科学化的教学干预方式,其中以知觉训练和手势教学为代表的新型教学方法被证明能够显著促进学习者的声调感知能力(孙悦等, 2013; 于晓敏等, 2014; Lu et al., 2015; 邓丹等, 2017; 洪炜等, 2019)。

在知觉训练方面,研究通常采用高变异输入、适应性训练或反馈强化机制,以提升学习者对声调差异的敏感度。孙悦等(2013)对日本学习者进行适应性与高变异声调训练,发现两种训练方法均能有效提升其对阳平/上声自然音节及连续体刺激的听辨表现。随后,于晓敏等(2014)进一步考察初级与中级日本学习者的训练效果,结果表明:初级学习者的阳平/上声感知提升显著,而中级学习者由于已具备一定的范畴化加工,其连续体听辨提升有限,显示训练效果受学习者原有范畴化程度影响。Lu等(2015)比较了“纯知觉训练”(声音判断+反馈)与“知觉—产出结合训练”(模仿声调后反馈)的效果,发现两类训练均可显著提升英语学习者的声调识别准确率;邓丹和林雨菁(2017)的研究亦表明,来自不同母语背景的学习者在知觉训练后,其声调听辨与产出均有明显改善。这些研究一致显示,系统化的声调知觉训练能有效补足传统教学的不足,使学习者在较短时间内获得显著进步。

在手势教学方面,研究主要聚焦于将声调的音高变化以视觉化方式呈现,通过手部动作帮助学习者构建声调轮廓的动态表征。相关研究分为两种典型方式:其一是学习者被动观看教师的手势并进行跟读,其二是学习者主动参与手势动作并结合视听材料进行模仿。贾琳等(2013)发现,被动观看手势加跟读能够显著提升无汉语经验学习者对声调的感知能力;洪炜等(2019)进一步表明,无论学习者是否具有声调语言背景,主动手势配合视听跟读均能在声调感知与产出上产生良好效果。这类教学方法通过视觉—听觉—动作的多模态整合,强化了学习者对音高走势的感知与记忆,使声调这一抽象语音特征具备更直观的学习路径。

可见,知觉训练和手势教学均为提高汉语学习者声

调感知能力提供了有效途径,尤其适用于初级和中级阶段的学习者。然而,对于已经形成一定范畴化能力的中高级学习者,其训练效果存在上限,未来仍需探索更能促进范畴内部精细加工和音位表征形成的高阶声调训练方法。

4 成人汉语学习者的神经可塑性

从神经机制的角度考察成人汉语学习者声调习得过程中的可塑性,对于理解声调感知训练的脑机制具有重要意义。一方面,语言习得关键期假说(Critical Period Hypothesis)认为,大脑神经可塑性在青春期后显著减弱,从而限制第二语言学习能力(Johnson & Newport, 1989; Long, 1990)。另一方面,来自神经科学领域的研究表明,大脑皮层在整个生命周期内仍保持相当程度的可塑性,成人也能够通过语言输入和学习经验的作用产生神经表征的重构(Van Turennout et al., 2000)。近年来,汉语声调学习相关研究逐渐将这一神经可塑性视角引入分析框架,为理解成人学习者的声调习得机制提供了新的证据。

Wang等人(2003)最早利用功能磁共振成像记录汉语初学者(英语母语者)在接受一学期汉语课程后的脑结构与功能变化,结果显示短期声调训练可使与语言加工相关的脑区(如韦尼克区)激活体积显著增加,并出现新的激活区域承担声调加工任务。Wong等人(2007)的研究进一步发现,声调训练成功的学习者主要表现为左侧颞上回(Superior Temporal Gyrus, STG),尤其是后部颞上回的显著增强激活。这些结果共同表明,成人学习者在声调习得过程中能够启动与母语者类似的神经加工网络,呈现出大脑皮质在声调学习中的结构和功能可塑性。这一观点随后也得到了多项神经影像研究的支持(Yang et al., 2015; Lee et al., 2017; Yang & Li, 2019; Qi et al., 2019)。

在脑磁图研究中, Lee等人(2017)对汉语初学者进行短期语境对话训练,并比较训练前后对声调连续体的神经反应。结果显示,训练后学习者在左半球表现出显著强于右半球的MMNm(MMN的脑磁表现),尤其在左侧颞横回(Heschl's gyrus, HG)和左侧岛叶,对阴平/上声连续体的MMNm反应显著大于阳平/上声。这不仅说明训练后学习者能够捕捉更多与声调有关的语言学特征,也表明其大脑在声调加工过程中逐渐呈现出类似汉语母语者的左侧化语言加工模式,体现了功能性重塑。

在功能磁共振成像研究中, Yang等人(2015)对英语母语者进行为期六周的声调伪词训练,结果发现训练组在双侧颞中回(Middle Temporal Gyrus, MTG)后部及角回的激活显著增强,同时右半球部分区域的激活反而减少。这种从双侧加工逐渐向左侧偏移的模式与语言加工的侧化趋势一致,但与Wong等人(2007)在左侧颞上回未发现强激活的结果存在差异,提示不同训练任务可

能涉及不同的加工网络。随后, Yang & Li(2019)对同类型学习者进行六周词汇训练,发现其学习效果与左颞横回、左壳核、右侧顶上小叶(Superior Parietal Lobule, SPL)及双侧舌回等多处脑区激活相关。Qi等人(2019)也报道,经过一月声调训练后,学习者在左侧额下回(Inferior Frontal Gyrus, IFG)和左侧顶上小叶等语言相关脑区的激活增加,而右侧部分区域(包括额下回)激活减弱,进一步说明脑网络在训练过程中经历了重组。

综上所述,这些研究一致表明,尽管成人在年龄上已超过传统意义上的语言关键期,但其大脑仍然保有显著的可塑性。通过系统的声调训练或课堂学习,学习者可以逐渐增强声调相关脑区的功能活动,优化语音加工路径,并逐步建立起适应汉语声调系统的神经表征体系。这一发现不仅深化了我们对声调习得神经机制的理解,也为汉语教学中开发更具针对性的声调训练方法提供了重要的理论支持。

5 总结与展望

汉语学习者能够通过短期声调训练与长期课堂学习逐步提升声调感知能力,在行为层面形成类似汉语母语者的声调范畴感知模式。然而,与行为表现相比,其神经层面的声调音位表征形成滞后,尤其在前注意阶段的自动化语音加工中仍难达到母语者水平。教学实践表明,对于学习者在复杂语境中利用声调进行词汇识别的困难,知觉训练和手势教学等方法能够有效提升其声调感知能力。而从神经机制角度看,成人学习者的大脑仍具一定可塑性,这在汉语教学中开发更具针对性的声调训练方法提供了神经科学证据。

尽管近年来神经科学技术在汉语二语习得研究中的应用逐渐增多,但相关研究仍然有限,并主要集中于不同母语背景学习者的声调加工差异。现有研究在一定程度上揭示了影响声调范畴形成和神经表征的若干关键因素,包括年龄、音乐经验、母语类型、目的语接触程度,以及音节结构等。然而,关于学习者在行为上已表现出母语者样加工模式时,其背后的神经机制是否真正达到母语者水平仍需更深入的探讨。

未来研究可从以下几个方面进一步推进。首先,应结合脑电图、脑磁图与功能磁共振成像等多模态脑成像技术,对学习者在声调加工过程中的时空神经活动进行更系统的溯源与定位,以揭示声调音位表征形成的神经基础。其次,鉴于成人大脑仍保持显著的可塑性,采用纵向追踪设计考察不同教学方法(如知觉训练、手势教学、多模态训练等)在训练前后的神经变化,将有助于评估各类教学干预的有效性及其神经机制。最后,将行为研究与神经成像证据更紧密地结合,有望推动汉语声调教学从经验型向证据型、机制驱动型方向发展,为汉语第二语言教学提供更科学的理论依据与实践指导。

参考文献

- [1] 毕芳. (2011). 欧美留学生汉语声调学习中的难点—阳平—阳平课堂教学的实践方法及其实证考察报告. *现代语文* (语言研究版), (7).
- [2] 陈默. (2011). 无声调语言母语者汉语声调范畴习得的实验研究. *华文教学与研究*, (4).
- [3] 程潇. (2010). 外国留学生习得汉语声调的难点及教学策略. *现代语文* (语言研究版), (9).
- [4] 邓丹, 林雨箐. (2017). 感知训练方法在汉语语音教学中的应用研究. *云南师范大学学报* (对外汉语教学与研究版), (3).
- [5] 高玉娟, 李宝贵. (2006). 韩国留学生汉语声调习得偏差的声学研究. *云南师范大学学报*, (1).
- [6] 韩明. (2005). 越南留学生声调偏误分析及教学对策. *玉林师范学院学报*, (2).
- [7] 洪炜, 何文华, 黄亿雯. (2019). 手势对初级汉语二语者声调感知与产出的影响. *汉语学习*, (6).
- [8] 贾琳, 王建勤. (2013). 视觉加工对英语母语者汉语声调产出的影响. *华文教学与研究*, (4).
- [9] 林焘. (1996). 语音研究和对外汉语教学. *世界汉语教学*, (3).
- [10] 孙悦, 张劲松, 解焱陆, 曹文. (2013). 日本学生汉语阳平和上声的知觉训练效果的初步分析. *清华大学学报* (自然科学版), (6).
- [11] 谭董妍. (2010). 以美国学生习得汉语声调为例探析对外汉语声调教学. *文学界* (理论版), (9).
- [12] 王功平. (2015). 西班牙语区留学生普通话双音节声调感知实验. *华文教学与研究*, (3).
- [13] 王燕. (2016). 对外汉语中高级水平声调教学策略研究——以韩、美、日汉语学习者为例. *语文建设*, (18).
- [14] 王韞佳, 李美京. (2011). 韩语母语者对普通话阳平和上声的知觉. *语言教学与研究*, (1).
- [15] 吴倩, 王韞佳. (2018). 声调的范畴知觉及其神经机制. *心理科学进展*, (1).
- [16] 姚勇, 刘莎. (2012). 不同汉语水平的中亚留学生汉语声调感知实验及成因分析. *云南师范大学学报* (对外汉语教学与研究版), (2).
- [17] 易斌, 吴永明, 阿丽达. (2021). 泰国学习者汉语单字调习得过程及特点的实验研究. *语言教学与研究*, (6).
- [18] 于晓敏, 孙悦, 张劲松, 解焱陆, 曹文. (2014). 知觉训练对初中级日本学生感知汉语声调的训练效果分析. *汉语应用语言学*研究, (3).
- [19] 张锦玉. (2019). 东南亚华裔学生阳平、上声的知觉研究. *海外华文教育*, (1).
- [20] 张林军. (2010a). 母语经验对留学生汉语声调范畴化知觉的影响. *华文教学与研究*, (2).
- [21] 张林军. (2010b). 日本留学生汉语声调的范畴化知觉. *语言教学与研究*, (3).
- [22] 张林军. (2010c). 知觉训练在第二语言语音习得中的作用——兼论对外汉语的语音习得和教学研究. *云南师范大学学报* (对外汉语教学与研究版), (1).
- [23] 张林军. (2013). 美国留学生汉语声调感知的左右耳优势. *语言教学与研究*, (2).
- [24] Bidelman M, Gavin & Chia-Cheng Lee. (2015). Effects of language experience and stimulus context on the neural organization and categorical perception of speech. *NeuroImage*, (120), 191–200.
- [25] Chan K W, Ricky & Janny H C Leung. (2020). Why are lexical tones difficult to learn? *Studies in Second Language Acquisition*, 42(1), 33–59.
- [26] Bharath, Ananthanarayan Krishnan & Jackson T Gandour. (2007). Mismatch negativity to pitch contours is influenced by language experience. *Brain Research*, (1128), 148–156.
- [27] Chen, Fei, Gang Peng, Nan Yan & Lan Wang. (2016). The development of categorical perception of Mandarin tones in four- to seven-year-old children. *Journal of Child Language*, 44(6), 1413–1434.
- [28] Feng, Yan & Gang Peng. (2023). Development of categorical speech perception in Mandarin speaking children and adolescents. *Child Development*, 99(1), 28–43.
- [29] Gandour, Jack, Yisheng Xu, Donald Wong, Mario Dzemidzic, Mark Lowe, Xiaojian Li & Yunxia Tong. (2003). Neural correlates of segmental and tonal information in speech perception. *Human Brain Mapping*, (20), 185–200.
- [30] Hall é A, Pierre, Yueh-Chin Chang & Catherine T Best. (2004). Identification and discrimination of Mandarin Chinese tones by Mandarin Chinese vs. French listeners. *Journal of Phonetics*, 32(3), 395–421.
- [31] Johnson S, Jacqueline, Elissa L & Newport. (1989). Critical period effects in second language learning: The influence of maturational state on the acquisition of English as a second language. *Cognitive Psychology*, 21(1), 60–99.
- [32] Klein, Denise, Robert J. Zatorre, Brenda Milner & Viviane Zhao. (2001). A cross-linguistic PET study of tone perception in Mandarin Chinese and English speakers. *NeuroImage*, 13(4), 646–653.
- [33] Krishnan, Ananthanarayan, Yisheng Xu, Jackson Gandoura & Peter Cariani. (2005). Encoding of pitch in the human brainstem is sensitive to language experience. *Cognitive Brain Research*, 25(1), 161–168.
- [34] Kuhl K & Patricia. (2004). Early language acquisition: Cracking the speech code. *Nature Reviews Neuroscience*, (5), 831–843.
- [35] Lee, R.-W. Rose, Chun-Hsien Hsu, Sheng-Kai Lin, Denise Hsien Wu & Ovid J.-L. Tzeng. (2017). Learning

- transforms functional organization for Mandarin lexical tone discrimination in the brain: Evidence from a MEG experiment on second language learning. *Journal of Neurolinguistics*, (42), 124–139.
- [36] Liberman M, Alvin, Katherin S, Harris, Howard S, Hoffman, Belver C & Griffith. (1957). The discrimination of speech sounds within and across phoneme boundaries. *Journal of Experimental Psychology*, 54(5), 358–368.
- [37] Long, H. Michael. (1990). Maturational constraints on language development. *Studies in Second Language Acquisition*, 12(3), 251–285.
- [38] Lu, Shuang, Ratre Wayland & Edith Kaan. (2015). Effects of production training and perception training on lexical tone perception – A behavioral and ERP study. *Brain Research*, (1624), 28–44.
- [39] Ma, Junzhou, Jiaqiang Zhu, Yuxiao Yang & Fei Chen. (2021). The development of categorical perception of segments and suprasegments in Mandarin-speaking preschoolers. *Frontiers in Psychology*, (12), 1–15.
- [40] Mattock, Karen & Denis Burnham. (2006). Chinese and English infants' tone perception: Evidence for perceptual reorganization. *Infancy*, (10), 241–265.
- [41] Mattock, Karen, Monika Molnar, Linda Polka & Denis Burnham. (2008). The developmental course of lexical tone perception in the first year of life. *Cognition*, 106(3), 1367–1381.
- [42] Pelzl, Eric. (2019). What makes second language perception of Mandarin tones hard? *Chinese as a Second Language*, 54(1), 51–78.
- [43] Pelzl, Eric, Ellen F. Lau, Taomei Guo & Robert DeKeyser. (2018). Advanced second language learners' perception of lexical tone contrasts. *Studies in Second Language Acquisition*, 41(1), 59–86.
- [44] Pelzl, Eric, Ellen F. Lau, Taomei Guo & Robert DeKeyser. (2020). Even in the best-case scenario L2 learners have persistent difficulty perceiving and utilizing tones in Mandarin: findings from behavioral and event-related potentials experiments. *Studies in Second Language Acquisition*, 43(2), 268–296.
- [45] Pelzl, Eric, Ellen F. Lau, Taomei Guo, Robert M & DeKeyser. (2021). Advanced second language learners of mandarin show persistent deficits for lexical tone encoding in picture-to-word form matching. *Frontiers in Communication*, (6), 1–18.
- [46] Peng, Gang, Hong-Ying Zheng, Tao Gong, Ruo-Xiao Yang, Jiang-Ping Kong & William S.-Y. Wang. (2010). The influence of language experience on categorical perception of pitch contours. *The Journal of Phonetics*, 38(4), 616–624.
- [47] Qi Zhenghan, Michelle Han, Yunxin Wang, Carlo de los Angeles, Qi Liu b, Keri Garel, Ee San Chen... & Perrachione. (2019). Speech processing and plasticity in the right hemisphere predict variation in adult foreign language learning. *NeuroImage*, (192), 76–87.
- [48] Shen, Guannan & Karen Froud. (2016). Categorical perception of lexical tones by English learners of Mandarin Chinese. *The Journal of the Acoustical Society of America*, (140), 4396–4403.
- [49] Shen, Guannan & Karen Froud. (2018). Electrophysiological correlates of categorical perception of lexical tones by English learners of Mandarin Chinese: an ERP study. *Bilingualism: Language and Cognition*, 22(2), 253–265.
- [50] Shen, Xiaonan. (1989). Interplay of the four citation tones and intonation in Mandarin Chinese. *Journal of Chinese Linguistics*, 17(1), 61–74.
- [51] Studdert-Kennedy, Michael & Donald Shankweiler. (1970). Hemispheric specialization for speech perception. *The Journal of the Acoustical Society of America*, (48), 579–594.
- [52] Van Turenout, Miranda, Timothy Ellmore & Alex Martin. (2000). Long-lasting cortical plasticity in the object naming system. *Nature Neuroscience*, (3), 1329–1334.
- [53] Wang, Yue, Patricia K & Kuhl. (2003). Evaluating the “critical period” hypothesis: Perceptual learning of Mandarin tones in American adults and American children at 6, 10 and 14 years of age. In *Proceedings of the 15th International Congress of Phonetic Sciences*, 1537–1540. Barcelona, Spain: Futurgraphic.
- [54] Wang, Yue, Joan A, Sereno, Allard Jongman & Joy Hirsch. (2003). fMRI evidence for cortical modification during learning of Mandarin lexical tone. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(7), 1019–1027.
- [55] Wang, Yue, Michelle M. Spence, Allard Jongman, Joan A & Sereno. (1999). Training American listeners to perceive Mandarin tones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, (106), 3649–3658.
- [56] Wong C M, Patric & Tyler K. Perrachione (2007) Learning pitch patterns in lexical identification by native English-speaking adults. *Applied Psycholinguistics*, 28(4), 565–585.
- [57] Wong C M, Patric, Tyler K, Perrachione, Todd B & Parrish. (2007). Neural characteristics of successful and less successful speech and word learning in adults. *Human Brain Mapping*, (28), 995–1006.
- [58] Xi, Jie, Hongkai Xu, Ying Zhu, Linjun Zhang, Hua Shu & Yang Zhang. (2021). Categorical perception of Chinese

- lexical tones by late second language learners with high proficiency: Behavioral and electrophysiological measures. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 64(12), 4695–4704.
- [59] Xu, Yisheng, Jackson T, Gandour, Alexander L & Francis. (2006). Effects of language experience and stimulus complexity on the categorical perception of pitch direction. *Journal of the Acoustical Society of America*, (120), 1063–1074.
- [60] Yang, Jing & Ping Li. (2019). Mechanisms for auditory perception: A neurocognitive study of second language learning of Mandarin Chinese. *Brain Sciences*, 9(6), 139.
- [61] Yang, Jing, Kathleen Marie Gates, Peter Molenaar & Ping Li. (2015). Neural changes underlying successful second language word learning: An fMRI study. *Journal of Neurolinguistics*, (33), 29–49.
- [62] Yu, Keke, Li Li, Yuan Chen, Yacong Zhou, Ruiming Wang, Yang Zhang & Ping Li. (2019). Effects of native language experience on Mandarin lexical tone processing in proficient second language learners. *Psychophysiology*, (56), e13448.
- [63] Zhang, Yajing, Linjun Zhang, Hua Shu, Jie Xi, Han Wu, Yang Zhang & Ping Li. (2012). Universality of categorical perception deficit in developmental dyslexia: An investigation of Mandarin Chinese tones. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, (53), 874–882.
- [64] Zhang, Yang & Yue Wang. (2007). Neural plasticity in speech acquisition and learning. *Bilingualism: Language and Cognition*, 10(2), 147–160.
- [65] Zhao T, Christina & Patricia K Kuhl. (2015). Effect of musical experience on learning lexical tone categories. *The Journal of Acoustical Society of America*, (137), 1452–1463.

The Application of Electrophysiological and Neuroimaging Techniques in Chinese as a Second Language (CSL) Tone Acquisition: Implications for Chinese Language Education

Lu Lingxi Jin Yangpin

Cognitive Science and Allied Health School, Beijing Language and Culture University, Beijing

Abstract: Tone acquisition is one of the major challenges in Chinese as a second language (CSL) learning and has long been a central topic in Chinese language education. In recent years, advances in electrophysiological and neuroimaging techniques have substantially facilitated research on the neural mechanisms underlying CSL tone acquisition. Evidence from behavioral and neural studies indicates that CSL learners can develop a categorical perception pattern similar to that of native speakers through short-term tone training or classroom instruction, although a stable phonemic representation at the neural level remains difficult to establish. In addition, learners often show limited ability to use tonal cues during lexical recognition, whereas perceptual training and gesture-based instruction have been shown to enhance tone perception. More importantly, neuroimaging findings reveal that adult CSL learners retain a certain degree of structural and functional neuroplasticity during the learning process. This review systematically summarizes empirical findings from behavioral measures, electroencephalography (EEG), magnetoencephalography (MEG), and functional magnetic resonance imaging (fMRI) on CSL tone acquisition, discusses unresolved issues in current research, and outlines directions for future studies.

Key words: CSL acquisition; Tone perception; M/EEG; fMRI; Neural plasticity