

语音学习的神经机制研究及其在纠正外语口音中的应用

程冰, 张 旸, 张小娟

(西安交通大学 外国语学院 陕西 西安 710049; University of Minnesota, Department of Speech-Language-Hearing Sciences, Minneapolis, MN 55455, USA; 西安交通大学 外国语学院 陕西 西安 710049)

摘要: 在学习外语或第二语言(简称二语)时,成人可能会在语音方面遇到诸多挑战。本文旨在分析成年人语音学习困境背后的大脑神经机制,从认知神经语言学的视角解释母语磁吸效应对外语或二语学习中辨音和发音产生的巨大影响,探索利用符合大脑语音认知规律的语料,经计算机合成、编辑技术开发软件进行语音培训,从而突破母语磁吸效应,并印证成年阶段大脑神经的可塑性,为纠正外语或二语学习者的口音提供行之有效的方法。

关键词: 母语磁吸效应; 范畴化感知; 外语口音纠正

中图分类号: H030 文献标识码: A 文章编号: 1000-5544(2017)04-0062-05

Abstract: While learning a foreign or second language (L2), adults tend to have tremendous difficulties in acquiring native-like pronunciation. This paper aims to provide an analysis of the neurocognitive mechanisms that constrain adult phonetic learning and discuss how the Native Language Neural Commitment interferes with L2 speech perception and production. The focal point is to develop and improve brain-science-based methods, including computer-assisted speech training programs, that can effectively promote neural plasticity in order to overcome the native-language interference and reduce or eliminate foreign accent in adult L2 learners.

Key words: native language neural commitment; categorical perception; foreign accent reduction

1. 引言

相比儿童习得母语的过程,成年人学习外语(或二语)时会在语音感知准确度和发音流利性等方面遇到巨大挑战,普遍会出现语音感知不准确、外语口音或反应迟顿等现象。随着脑科学技术的发展,这些传统的语音问题被重新解读。近二十年来,随着生物工程、计算机科学、数据统计处理、脑成像技术等相关领域迅速发展,脑科学研究利用交叉学科的优势,对大脑发育成长和语言学习环境的互动过程进行了全新的探索。神经语言学家对婴儿语言学习过程的研究使人们对语言结构和学习过程的认识有了突破性的进展(Kristin *et al.* 2006: 7638; Kuhl 2007: 81; Rivera-Gaxiola *et al.* 2005: 168)。从已有的脑电数据可以看出,婴儿在出生后几天就可以感知出语音范畴的区别,而在12个月以后则逐渐失去了对非母语语音的敏感性(Cheour *et al.* 1998: 224; Näätäneiv *et al.* 1997: 433; Kuhl 2007: 73),从而造成将来外语(或二语)语音学习的障碍。大脑神经系统在承载母语的过程中逐渐被母语化,这种现象就是母语磁吸效应(Native Language Neural Commitment)(Kuhl *et al.* 2008: 983)。研究表明,儿童的大脑在出生后的第一年里就完成了母语语音识别图的建立,敏感对象从通用语言过渡转换到特定母语,即获得母语语音感知优势(Kuhl 2007: 73)。值得注意的是,儿童习得母语的过程伴随着其它语种学习能力的下降。母语磁

吸效应理论认为语音学习是一个隐性的、不断自我强化的过程,其过程会逐渐促进趋同母语的语音模式的学习,并会干扰与母语不同的语音模式的学习(Kuhl *et al.* 2008: 983)。因此,对具备母语经验的成年学习者而言,他们的语音学习模式与婴儿并不相同。婴儿可能需要数月的语音学习经验才能逐渐发出第一个清晰的语音。他们最初的发音可能是不准确的,但是通过在母语环境中不断自我纠正或成人的指导,便可以逐渐掌握母语的语音体系。而成人在学习外语(或二语)时会受到母语磁吸效应的干扰,他们会习惯从自己的母语语音认知体系出发去学习外语(或二语),因而容易产生语音感知不准确和外语口音等一系列问题。

2. 外语语音学习的神经机制研究

2.1 关键期假说与大脑神经可塑性

从表面现象看,成人学习外语(或二语)的时间越早,其语音表现越容易接近母语水平。关键期假说认为,获得接近母语水平的语音感知和发音能力从6岁开始衰减,12岁以后将进一步退化,基本不再可能习得如母语般精准纯正的语音(Long 1990: 266)。Flege认为,尽管语音学习表面上看似存在年龄限制,但成年人的语音系统并非完全失去可塑性,其外语(或二语)语音感知和产出能力仍然具备逐步提升的可能性(Flege 2007: 336)。成人的大脑曾经一直被认为是一成不变的,可塑性极低。其实我们的大脑

从未停止改变和调整以达到最优神经回路,只是在幼年时期这个过程发生得比较迅猛。比如,大脑模块假设提出,大脑的模块性在婴幼儿期以后逐渐增强,不太可能再发生大规模结构性重构,但这并不意味着大脑的模块结构趋于静态。虽然模块随着年龄日渐成熟稳定,但模块间的关联数目、强度和方式仍然会随经验改变。由此可见,个体的大脑模块是发展变化的,具有相当的可塑性(陈艳红、刘润清 2017: 22)。随着脑科学的发展,研究人员从大脑认知神经层面重新解读了关键期假说,认为仅用年龄界定关键期并不科学严谨,其假设存在相当大的局限性,后天的经验与学习可以重组神经通路。然而成年人的大脑可塑性有着很大的个体差异,不能一概而论。现实生活中可以发现有的人很难改变乡音,有的人却能够惟妙惟肖地讲不同方言就是一个例证。关键期现象产生的原因可能是大脑在 12 岁以后因神经成熟而导致的神经可塑性降低(Birdsong & Molis 2001: 238; Long 1990: 278; 刘振前 2003: 163)。因此,关键期现象存在的本质是大脑神经认知敏感度的变化。母语磁吸效应认为,1 岁以后儿童的中枢神经系统逐渐失去对非母语语音的敏感性,成年人在个体发展上已经过了“关键期”,即大脑对语音习得最敏感的时期。但这并不意味着过了关键期,在语音学习上我们就不能有所作为。近年来,不断有研究表明,大脑皮质表征可能会因为学习而发生变化。在语音学习过程中,大脑会出现半脑资源(比如左右半脑的相对优势)的重新分配、额外大脑区域的补充、神经通路结构的增强(如白质密度的增加)以及功能链接的增强(脑区之间关联性的增强)、激活量的增加或减少等活动。这表明语言学习并不是一个严格受时间限制的发展过程。越来越多的语音干预研究致力于探索通过加强大脑反应敏感和熟练程度从而提高大脑皮质递增变化的可能性,进一步印证即使是在成年时期,人类大脑皮层在功能链接和重组上仍旧表现出巨大的神经可塑性(Golestani *et al.* 2007: 581; Zhang *et al.* 2009: 236; Li *et al.* 2014: 301)。

2.2 范畴化感知与语音范畴的建立

每种语言都有其独特的语音范畴,只有建立正确的语音范畴才能实现准确感知语音和正确发音。范畴化感知现象指连续的语音变化被感知为离散的且数量有限的语音单元,即音位(Lieberman *et al.* 1957: 358; 张林军 2009: 560)。研究表明,小于 6 个月的婴儿(其中包括出生只有四天的新生儿)就已经具备区分语音范畴的能力。我们每学习一个音素都需要在大脑中建立这个音素的语音范畴,该语音范畴不是一个点,而是一个集合,其中包含语音的声学变量和分布特征。若沉浸在母语环境中,10 到 12 个月的婴儿就已经在大脑中建立了一套系统的母语语音识别图。而外语学习者接触到的语言环境与母语学习环境无法比拟,对于同一种语言,外语学习者与母语学习者在脑中建立的语音范畴往往并不相同(程冰 2009: 99)。比如,英语音素 /i/ (如在单词 seat 中) 和 /I/ (如在单

词 sit 中) 属于两个不同的语音范畴,其发音位置和时长都有本质区别。中国英语学习者在学习 /i/ 和 /I/ 时会在音质特征上将这两个音素都归类于汉语中的“衣”(拼音“yi”) 并且只是在发音时长上将其区分,因而他们在脑中建立的这两个音素的语音范畴与母语为英语的人建立的语音范畴并不相同。根据 Flege (1995: 237) 的语音学习模型,外语(或二语)的语音习得过程是从母语语音知觉出发感知新语音的过程。母语语音系统好比一个声音过滤器,通过将外语(或二语)中与母语相似的语音与母语语音对应,从而将母语的语音范畴区分方式应用到外语(或二语)学习中。Flege 从学习方式角度阐述母语负迁移的影响,而也有越来越多的实证研究表明,母语经验会改变语音感知敏感度,从而导致成年学习者对学习非母语语音相当关键的声学特征的敏感度下降。例如, Miyawaki 等人(1975: 336) 和 Zhang 等人(2005: 715) 都发现美国被试对英语语音连续体 /ra-la/ 表现出典型的范畴感知,而在日本被试中没有发现此现象,但是这两组被试对一个区分 /r/ 和 /l/ 十分关键的声学特征 F3 有着几乎相同的感知能力;这个发现说明日本被试其实自身具备区分 /r/ 和 /l/ 的能力,但可能因为母语经验导致的注意力分配问题而使其无法正确感知到 /r/ 和 /l/ 的语音区别。脑电数据显示,美国被试在听 /r/ 和 /l/ 的区分时,关注点在 F3,而日本被试的关注点在 F2。利用多维度标度分析(相似度结构分析,多重变量分析的方法之一)的研究也表明,母语磁吸效应对日本、德国、美国成年被试感知英语语音 /r/ 和 /l/ 有很大影响(Iverson & Kuhl 1996: 1133; Bosch *et al.* 2000: 209)。其中,日本成年被试对与英语语音 /r/ 和 /l/ 范畴感知无关的声学线索 F2 表现出高敏感度;德国成年被试与美国成年被试相似,都对重要声学线索 F3 过渡表现出高敏感度。也就是说,日本被试的大脑本身具备区分 F3 差别的能力,但是由于受到母语的影响,他们的大脑自动选择不关注 F3 特征。而除此相似之处外,因母语磁吸效应,美国成年被试与德国成年被试对不同声学特征的敏感度也存在明显差异。另外, Winkler 等人(1999: 640) 发现芬兰语音素 /e/ 和 /æ/ 可以在会说芬兰语的匈牙利被试大脑中诱发出失匹配负波(mismatch negativity, MMN),而在没有接触过芬兰语的匈牙利被试中没有类似发现;同时,他们还发现在会说芬兰语的匈牙利被试大脑中诱发出的 MMN 与在芬兰被试大脑中诱发出的 MMN 相同,这说明语言学习能够造成前注意力阶段大脑神经表征的变化,因而要想在成年时期提高大脑神经对非母语语音的敏感度并非无法实现。

3. 在脑科学指引下的语音干预研究

在外语语音学习中,有些语音问题可以通过常规教学得以解决,但是有些问题即使在母语环境中经过多年的学习也不能解决。例如,有多年英语学习经验或英语国家移民经历的日本成年英语学习者仍旧难以区分英语音素

/r/和/l/。是否超过一定年龄就无法再习得一口纯正的外语(或二语)语音?对于成年外语(或二语)学习者的口音问题,我们是否真的束手无策?近年来,针对外语(或二语)学习者在元音、辅音、声调以及音节结构等方面的语音问题,研究人员做过不少尝试来干预语音习得过程。

英语中的元音数量较其它大多数语言多,因此英语不同元音之间的范畴区分也较其它语言更为细微。例如英语元音/i/和/l/在音长和音位上都有区别,然而 Ylinen 等学者(2010: 1327)的研究发现成年芬兰人在学习英语时更倾向于利用语音的音长特征来区分英语语音/i/和/l/。与此发现一致的是, Giannakopoulou 等人(2013: 201)通过对比研究发现二语学习者与母语人士在语音不同特征上的注意力分配权重并不相同,如希腊人在学习英语时更倾向于依赖语音音长这个特征来区分近似音素的语音差别,而母语为英语的人则更倾向于依赖语音的频谱特征;并且对学习者的而言,这样注意力权重分配的不同极有可能导致学习者无法建立准确的语音范畴。因此,在只能依靠语音频谱特征进行语音辨识的测试中,希腊被试的表现并不理想。但在 Giannakopoulou 等人(2013: 214)等人对这些希腊被试进行语音培训后,被试的语音辨识表现明显提高。越来越多的有效培训方法被运用于各种语音干预研究中,如视听知觉训练法(在培训中提供视觉和听觉双渠道的语料呈现方式)、适应性知觉训练法(利用语音合成和编辑技术由高至低逐渐减小培训语料之间的音素物理学特征差异)以及多变体语音训练法(即语料来自多名发音者和不同的语音语境)等方法。在 Ylinen 等人(2010)的语音培训中,不仅提供了多变体的培训语料,还进一步对培训的部分语料进行处理使得两个音素之间的音长相同,因而被试只能“被迫”利用语音的物理频谱特征来区分这两个音素的差别(Ylinen *et al.* 2010: 1319)。培训结果发现不论是针对自然语料还是处理后音长相同的语料,被试的区分正确率都显著提高。研究证明了语音感知培训方法的有效性和可操作性。语音干预研究可以改变外语或二语学习者在不同语音特征上的注意力权重分配,从而帮助建立与母语人士相似的语音范畴。还有研究提出,语音感知培训不仅对学习者的感知能力有提高作用,对学习者的发音也有一定促进作用(Bradlow *et al.* 1999: 982; Thomson 2011: 758)。比如, Thomson(2011: 758)利用计算机辅助的语音感知培训对中国英语学习者进行英语元音区分训练,培训中提供了视觉和听觉的双渠道刺激语料。培训前后对被试目标元音的发音表现进行测试,结果发现他们的语音清晰度显著提高,并且培训效果可延伸至未经过培训的语境中。此外,随着科学技术的不断发展,通过事件相关电位、功能性磁共振等技术的使用,神经语言学家们发现语音感知培训不仅改变了学习者的行为表现,更是在他们的大脑神经层面导致了生理变化(Wang *et al.* 2003: 1020; Zhang *et al.* 2009: 233)。比如, Wang 等人(2003: 1020)利用功能性磁共振技术对美国被试汉语声

调培训前后进行测试,发现被试行为表现的提高与大脑中左颞叶上回激活区域的增加以及其它皮层区域的激活呈现相关关系。这证明了大脑神经很强的可塑性,语音的培训学习不仅会增加语言相关区域的激活量,也会新激活其它皮层区域。

语音干预研究中有一个很著名的难题,即很难通过常规手段的培训帮助日本英语学习者准确区分英语语音范畴/r/和/l/。由于日语中没有/r/和/l/的范畴区分,所以在日常语言学习环境中,日本英语学习者首先从听觉上就无法感知这两个音的差别,也由此在发音时区分不出这两个音的不同。这种困难的产生可以用前文提到的母语磁吸效应来解释。针对这一问题,国际上已经有许多研究人员尝试过各种语音培训方法,培训效果不尽相同。有的显示被试语音感知能力显著提高,也有的被试提升幅度较小但具有统计意义,还有研究结果显示被试对这组音的感知能力几乎没有任何提高(Bradlow *et al.* 1999: 984; Lively *et al.* 1993: 1252; Lively *et al.* 1994: 2086; Takagi 2002: 2895)。

Kuhl(2000: 11854)对婴儿早期语音习得的研究为解决这一难题提供了一些思路。她发现,儿童在母语环境中会听到各种人说话的声音,并可以看见不同人的发音口形,这样有利于提高他们区别语音音素差异的能力,从而全面提高母语语音范畴识别能力。同时,通过分析母亲与婴儿说话时使用的“儿向语”发现“儿向语”的语音单位通过声带的振动在口腔、喉腔、鼻腔的共振频率被特意放大,并且元音特有的共振峰之间的间隙也被人为地加大。这种放大不仅使婴儿容易辨别语音单位,而且也会使他们容易感知母语中区分单词的关键语音要素。母亲与婴儿说话时的声音具有很大的弹性和变动性,这样的弹性变动有助于婴儿建立有效的声学模式,从而可以进行语音归类,即在大脑中建立每一个音素的母语语音范畴。神经语言学界已有多例研究,模仿婴儿接触到的、适合大脑感知的语音,对采集到的自然语音进行处理,并运用计算机语音合成技术将其加工成语音培训语料,即 Infant Directed Speech (IDS),而后对外语语音学习中难以掌握的语音进行训练(Iverson *et al.* 2005: 3270)。其中一例较为成功的尝试是美国研究人员 Zhang 利用 IDS 进行的培训(Zhang *et al.* 2009: 227)。该研究使用自行设计的语音培训软件,分阶段进行培训。通过语音合成技术放大了这两个音的物理声学特征,首先应用于培训的初始阶段,之后再逐步缩小被放大的语音声学特征,逐步应用于培训的后期阶段,直至最后阶段中语料恢复自然语音状态。也就是让被试的大脑首先感知易于识别的语音信息,然后逐渐将培训语料恢复到自然状态。该培训使用的语料有助于学习者从听觉上更清晰地识别/l/和/r/的声学特征。利用这些更适合大脑感知的语料 IDS 对学习者的语音培训,可以刺激他们已经对非母语语音失去敏感性的神经系统重新开放,进而更全面地接受语音信息。结果表明,被试的语音区分

能力以及神经系统对这两个音的敏感程度和大脑处理速度都明显提高。培训前后对被试的语音区分能力和脑磁图测试显示,辨音能力提高了21.6%,被试对/r/和/l/这两个音的失匹配磁场反应有显著变化(Zhang *et al.* 2009: 230)。该研究证明语音培训可以突破二语语音学习中的母语磁吸效应,显著提高神经可塑性。

类似的培训方法还应用在对中国英语学习者特别难以掌握的四组语音的干预研究中(Cheng & Zhang 2013: 4245)。被试为西安交通大学英语专业二年级的36名学生,他们已经学习了至少7年英语,但对/i/-/I/、/Λ/-/α/、/n/-/ŋ/、/r/-/l/这四组音素的感知还是很不理想。培训采用自行设计的语言培训软件,经过计算机语音合成技术处理,将多个母语人士原始录音的语音声学特征扩大300%、208%、144%和100%,制成培训语料,用丰富的语音变体帮助学习者建立正确的语音范畴。实验组A参加的培训分四个级别,只使用一个人的声音;实验组B的培训使用四个人的声音,分七个级别。两组培训被试接触到的语料总数一样。实验组C为对照组,不参加培训。研究结果表明,培训有效提高了被试的语音感知和产出能力。即时培训后测试没有显示使用多名发音者的培训效果显著优于单名发音者,但6个月后的保留效应测试结果表明实验组B的表现优于实验组A(Cheng 2010: 47-179)。而且,培训后的脑电测试表明被试对目标音形成了更好的语音感知范畴,脑电数据显示大脑对跨越范畴的语音出现了MMN(失匹配负波)反应(Cheng & Zhang 2013: 4245)。

4. 脑科学应用于语音学习的意义

近年来的语音干预研究突破了传统语音教学模式,从大脑认知的本源特点出发来对学习者进行语音训练。相关研究尚属于初步探索,大多数研究成果和发现还处于实验室阶段,有广阔的待开发空间。在理论意义上,该类型研究从认知神经学角度对语言学习中的大脑神经机制进行研究,通过将语音培训与相关脑科学技术结合,把研究对象从纯粹的认知心理与行为扩展到大脑的活动模式及其与认知过程的关系,继而深入探索大脑发育成长和语言学习环境的互动过程,将对人类认知语言学习的本质产生积极的推动作用。从实践意义上看,将认知神经科学的实验室成果运用于语音乃至语言的教学实践,通过对比母语与外语(或二语)学习过程的差异,可以帮助学习者创造出符合大脑认知规律的语言学习和应用环境,为分析和解决语言教学难题提供科学有效的解决方案。语音培训软件程序的设计开发是为了提高语音培训的定制性和适用性,不仅是作为一个研究工具更可以作为一个在线语音培训教程。不论出于研究还是教学目的,该程序都能简单地进行修改以加入新的语音对比。这样的语音培训程序在新语音范畴的短时间习得研究中被证明是有效的。(Cheng & Zhang 2013: 4245; Zhang *et al.* 2009: 230)然而,

以往研究中还存在一些问题有待进一步探究,比如语音水平提高的保留效应、不同语音的培训效果差异、显著个体差异的潜在原因分析等。除了单音层面的母语干扰因素,在跨越单音层面的音节结构上,母语同样对外语语音学习造成很大的干扰。比如,语音知觉和发音的跨语言对比研究实验表明,中国学生英语辅音的知觉和发音在音节的首位比末位占有很大的优势(Cheng & Zhang 2015: 1811)。未来的外语语音学习研究除了在单音的训练上采用被脑科学证明了的方法之外,还可以在外语音节结构的特征上下功夫,加以系统的行为和认知神经科学的检验和论证手段,找出适合中国学生的有效的、全方位的训练方法来指导外语语音教学和实践。今后的研究可以通过在培训前后测试中运用EEG(脑电图)和fMRI(功能磁共振)等脑科学技术来检测神经可塑性,最终目标是通过提供客观全面的技能测试和定制化培训程序,例如通过整合已发现的能有效提高成年时期大脑可塑性的不同声学特征为不同英语学习者提供个性化的培训程序。

无论在教学理念还是在研究的深度和广度方面,我国的英语语音教学与研究都还有着广阔的探索空间。从大脑认知神经视角探究如何通过特殊的语音培训手段突破成人学习外语(或二语)的口音问题,不仅可以为成年学习者提供卓有成效的语音学习建议,还将进一步印证即便是在成年时期大脑神经依旧具备可塑空间。从大脑语言学习规律出发来探索语音教学的新方法,能够切实地帮助中国英语学习者解决一些常规课堂无法攻克的语音学习难题。认知神经语言学是一个新兴领域,把认知神经科学的实验室成果运用于语音教学实践,将会为语音教学乃至整个外语教学和研究提供一条新的思路。

参考文献

- [1] Birdsong, D. & M. Molis. On the evidence for maturational constraints in second-language acquisition [J]. *Journal of Memory and Language*, 2001(2): 235-249.
- [2] Bosch, L., A. Costa & Sebastián-Gallés, N. First and second language vowel perception in early bilinguals [J]. *European Journal of Cognitive Psychology*, 2000: 189-221.
- [3] Bradlow, A. R., R. Akahane-Yamada, D. B. Pisoni & Y. I. Tohkura. Training Japanese listeners to identify English /r/ and /l/: Long-term retention of learning in perception and production [J]. *Perception & Psychophysics*, 1999(5): 977-985.
- [4] Cheng, B. The relationship between speech perception and production in adult learners of English as a foreign language: Implications for phonetic training [D]. Shanghai: Shanghai International Studies University, 2010.
- [5] Cheng, B. & Y. Zhang. Neural plasticity in phonetic training of the /i-i/ contrast for adult Chinese speakers [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America* 2013(5): 4245.
- [6] Cheng, B. & Y. Zhang. Syllable structure universals and native language interference in second language perception and production: Positional asymmetry and perceptual links to accentedness [J]. *Frontiers in*

- Psychology*, 2015(6): 1801-1817.
- [7] Cheour, M., K. Alho, R. Ceponiené, K. Reinikainen, K. Sainio, M. Pohjavuori, & R. Näätänen. Maturation of mismatch negativity in infants [J]. *International Journal of Psychophysiology*, 1998(2): 217-226.
- [8] Flege, J. E. Language contact in bilingualism: Phonetic system interactions [J]. *Laboratory Phonology*, 2007(9): 353-382.
- [9] Flege, J. E. Second language speech learning: Theory, findings, and problems [A]. In W. Strange (ed.). *Speech Perception and Linguistic Experience: Issues in Cross-language Research* [C]. Baltimore: York Press, 1995: 233-277.
- [10] Giannakopoulou, A., M. Uther, & S. Ylinen. Enhanced plasticity in spoken language acquisition for child learners: Evidence from phonetic training studies in child and adult learners of English [J]. *Child Language Teaching and Therapy*, 2013(2): 201-218.
- [11] Golestani, N., N. Molko, S. Dehaene, D. LeBihan, & C. Pallier. Brain structure predicts the learning of foreign speech sounds [J]. *Cerebral Cortex*, 2007(3): 575-582.
- [12] Iverson, P., V. Hazan, & K. Bannister. Phonetic training with acoustic cue manipulations: A comparison of methods for teaching English /r/-/l/ to Japanese adults [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005(5): 3267-3278.
- [13] Iverson, P. & P. K. Kuhl. Influences of phonetic identification and category goodness on American listeners' perception of /r/ and /l/ [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1996(2): 1130-1140.
- [14] Kristin, M. N., J. C. Mazziotta, & D. Mirella. Cracking the language code: Neural mechanisms underlying speech parsing [J]. *Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 2006(29): 7629-7639.
- [15] Kuhl, P. K. A new view of language acquisition [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2000(22): 11850-11857.
- [16] Kuhl, P. K. Cracking the speech code: How infants learn language [J]. *Acoustical Science & Technology*, 2007(2): 71-83.
- [17] Kuhl, P. K., B. T. Conboy, S. Coffey-Corina, D. Padden, M. Rivera-Gaxiola, & T. Nelson. Phonetic learning as a pathway to language: New data and native language magnet theory expanded (NLM+) [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008(1493): 979-1000.
- [18] Li, P., J. Legault, & K. Litcofsky, A. Neuroplasticity as a function of second language learning: Anatomical changes in the human brain [J]. *Cortex*, 2014(58): 301-324.
- [19] Liberman, A. M., K. S. Harris, H. S. Hoffman, & B. C. Griffith. The discrimination of speech sounds within and across phoneme boundaries [J]. *Journal of Experimental Psychology*, 1957(5): 358-368.
- [20] Lively, S. E., J. S. Logan, & D. B. Pisoni. Training Japanese listeners to identify English /r/ and /l/ II: The role of phonetic environment and talker variability in learning new perceptual categories [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1993(3): 1242-1255.
- [21] Lively, S. E., D. B. Pisoni, R. A. Yamada, Y. I. Tohkura, & T. Yamada. Training Japanese listeners to identify English /r/ and /l/ III: Long-term retention of new phonetic categories [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1994(4): 2076-2087.
- [22] Long, M. H. Maturation constraints on language development [J]. *Studies in Second Language Acquisition*, 1990(3): 251-285.
- [23] Miyawaki, K., J. J. Jenkins, W. Strange, A. M. Liberman, R. Verbrugge, & O. Fujimura. An effect of linguistic experience: The discrimination of /r/ and /l/ by native speakers of Japanese and English [J]. *Perception & Psychophysics*, 1975(5): 331-340.
- [24] Näätänen, R., A. Lehtokoski, M. Lennes, A. Luuk, J. Alliki, J. Sinkkonen, & K. Alho. Language-specific phoneme representations revealed by electric and magnetic brain responses [J]. *Nature*, 1997(358): 432-434.
- [25] Rivera-Gaxiola, M., J. Silva-Pereyra, & P. K. Kuhl. Brain potentials to native and non-native speech contrasts in 7- and 11-month-old American infants [J]. *Developmental Science*, 2005(2): 162-172.
- [26] Thomson, R. I. Computer assisted pronunciation training: Targeting second language vowel perception improves pronunciation [J]. *Calico Journal*, 2011(3): 744-765.
- [27] Takagi, N. The limits of training Japanese listeners to identify English /r/ and /l/: Eight case studies [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2002(6): 2887-2896.
- [28] Wang, Y., J. A. Sereno, A. Jongman, & J. Hirsch. fMRI evidence for cortical modification during learning of Mandarin lexical tone [J]. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2003(7): 1019-1027.
- [29] Winkler, I., T. Kujala, H. Tiitinen, P. Sivonen, P. Alku, A. Lehtokoski, I. Czigler, V. Csepe, R. J. Ilmoniemi, & R. Näätänen. Brain responses reveal the learning of foreign language phonemes [J]. *Psychophysiology*, 1999(5): 638-642.
- [30] Ylinen, S., M. Uther, A. Latvala, & S. Vepsäläinen. Training the brain to weight speech cues differently: A study of Finnish second-language users of English [J]. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2010(6): 1319-1332.
- [31] Zhang, Y., P. K. Kuhl, T. Imada, P. Iverson, J. Pruitt, E. B. Stevens, & I. Nemoto. Neural signatures of phonetic learning in adulthood: A magnetoencephalography study [J]. *Neuroimage*, 2009(1): 226-240.
- [32] Zhang, Y., P. K. Kuhl, T. Imada, M. Kotani, & Y. Tohkura. Effects of language experience: Neural commitment to language-specific auditory patterns [J]. *Neuroimage*, 2005(3): 703-720.
- [33] 程冰. 母语习得的脑神经机制研究及对外语教学的启示 [J]. *西安交通大学学报(社科版)*, 2009(3): 98-104.
- [34] 陈艳红, 刘润清. 认知视角下的大脑模块化与可塑性 [J]. *外语教学*, 2017(1): 19-25.
- [35] 刘振前. 第二语言习得关键期假说研究评述 [J]. *当代语言学*, 2003(2): 158-172.
- [36] 张林军. 知觉训练和日本留学生汉语送气/不送气音的范畴化感知 [J]. *世界汉语教学*, 2009(4): 560-566.
- 基金项目: 本文系国家社会科学基金项目“对语言范畴感知的ERP研究”(项目编号: 15BY005)的部分成果。
- 作者简介: 程冰, 西安交通大学外国语学院副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向: 英语语音与音系学、认知神经语言学、语言学习策略与学习风格。
- 张旻, 美国明尼苏达大学言语-语言-听力科学系终身教授, 神经和行为发展研究中心教授, 博士, 研究方向: 认知神经语言学、儿童语言认知、自闭症诊疗。
- 张小娟, 西安交通大学外国语学院硕士研究生, 研究方向: 认知神经语言学。

责任编辑 郑荣