

• 研究方法(Research Method) •

脑干诱发电位在言语感知研究中的应用*

夏志超¹ 洪 恬¹ 张林军² 舒 华¹

(¹ 北京师范大学认知神经科学与学习国家重点实验室 北京 100875)

(² 北京语言大学汉语学院 北京 100083)

摘 要 脑干诱发电位是一种考察听觉脑干加工声音信号时神经活动的非侵入性技术,近年来被广泛用于探索言语感知的神经基础。相关研究主要集中在考察成年人和正常发展儿童语音编码时脑干的活动特征及发展模式,探讨发展性阅读障碍及其他语言损伤的语音编码缺陷及其神经表现等方面。在已有研究的基础上进一步探索初级语音编码和高级言语加工之间的相互作用机制,考察阅读障碍的底层神经基础将成为未来该技术在言语感知研究中应用的重点。

关键词 脑干诱发电位;言语感知;神经机制;发展性阅读障碍

分类号 B845

言语感知的神经机制一直是语言认知神经科学研究的重点。随着功能磁共振成像(fMRI)、事件相关电位(ERP)等技术在语言研究中的应用,研究者积累了大量证据,并建立起言语感知的脑机制模型(Hickok & Poeppel, 2007; McGettigan & Scott, 2012; Price, 2012)。这些模型的共同特征之一在于将言语感知解释为自下而上的感知驱动和自上而下的认知调控相互作用的复杂过程。其中,对声音刺激的神经编码是言语加工的初始阶段,也是复杂语言理解的重要基础(Friederici, 2012; Kotz & Schwartze, 2010)。从发展的角度来说,基本声学特征加工能力的高低会影响儿童言语技能的获得,并进一步影响阅读能力的发展(Kuhl et al., 2008)。因此,对声音初级编码过程的脑机制进行研究具有十分重要的意义。目前,相关研究大多侧重于考察语音信息在大脑皮层中的抽象表征,而对语音编码神经机制的探索相对有限。为更全

面准确地把握言语加工的认知机制和神经生理基础,特别是从具体声音编码到抽象语音表征的转换过程,就非常有必要用客观的方法对言语加工时皮层下听觉中枢的神经活动进行精确记录。

听觉系统对声音刺激的加工包括皮层下神经中枢对声学物理信号的精确编码到大脑皮层听觉感知的抽象表征等一系列复杂过程(Wang, 2007),其中,脑干是对声音进行初级编码的重要结构。脑干位于间脑和脊髓之间,由中脑、脑桥和延髓三部分组成,包含大量上、下行听觉通路的神经核团,是连接耳蜗核与初级听觉皮层的重要节点(Kraus & Nicol, 2005; Kraus, Skoe, Parbery-Clark, & Ashley, 2009; Skoe & Kraus, 2010a)。有研究者甚至认为与V1区视觉神经元拥有相似功能的听觉神经元存在于脑干水平(Nelken, 2004)。因此,对听觉脑干功能的考察有助于更好地理解神经系统对声音的编码过程。由于电生理研究表明这种编码在刺激呈现后几十毫秒内就已经完成,所以对该过程的考察首先依赖于具有高时间分辨率的记录手段。功能磁共振成像和事件相关电位是语言认知神经科学研究中最常用的两种技术。以血氧依赖水平(blood oxygenation level dependent, BOLD)为基础的功能磁共振成像主要通过对实验条件间的激活水平来定位参与特定认知加工的

收稿日期: 2013-01-28

* 国家社科基金重大项目(11&ZD186), 国家自然科学基金项目(31271082), 教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目(11JZD041), 中央高校基本科研业务费专项基金和北京市自然科学基金项目(7132119)支持。

通讯作者: 舒华, E-mail: shuh@bnu.edu.cn

脑区。虽然该技术具有较高的空间分辨率,可以精确定位不同大脑结构及皮层下神经核团。但由于血流变化是神经活动的间接反映,且响应速度较慢,因此该指标并不能提供神经活动时间进程方面的精确信息,无法全面揭示语音编码的神经机制。此外,脑干附近的 BOLD 信号非常容易受到心跳和呼吸等生理噪声的影响,从而导致结果可靠性和稳定性的降低(Beissner, Deichmann, & Baudrexel, 2011; Beissner, Schumann, Brunn, Eisenträger, & Bär, 2013)。与 fMRI 不同,事件相关电位是由外部刺激诱发的神经活动在头皮上的电位表征,这种通过头皮电极记录的电压变化是神经活动的直接体现。尽管这一技术的空间定位较为粗糙,但较高的时间分辨率使其非常适用于从时间维度上考察认知加工的神经机制。脑电信号中包含不同的成分,语言认知神经科学领域的研究者主要关注其中的慢波和晚成分(如 P300、N400、P600 等),并将这些成分与特定的心理过程联系起来,再通过比较不同条件间特定成分的波幅或潜伏期差异来推测与实验设计有关的认知加工。相对于慢波和晚成分,脑电信号中的早成分更加单纯地反映了感知系统对外界刺激进行加工时的神经活动。其中,脑干诱发电位(auditory brainstem response, ABR)记录了听神经、脑干等一系列皮层下神经中枢对声音刺激的编码过程。这一特征使该技术非常适于揭示声音刺激(特别是语音)编码加工的神经机制,帮助研究者将具体的声学分析和抽象的皮层言语表征联系起来。脑干诱发电位在言语研究中的应用为完善对言语感知神经生理基础的认识提供了独特的视角:一方面有助于阐明言语感知过程中低级听觉中枢的功能,以及这些功能的获得和发展,回答神经系统功能可塑性及其影响因素等重要问题;另一方面研究者也可以在此基础上探索初级感知过程和高级语言技能之间的关系,并应用于教育和临床实践。例如,预测儿童语音意识和阅读能力的发展,识别发展性阅读障碍(developmental dyslexia),帮助设计和评价特定的训练手段,促进障碍儿童的语言发展等。本文将首先介绍脑干诱发电位的基本原理和特点,然后综述该领域已有的研究和重要发现,最后总结目前仍有待解决的问题,并指出未来的研究方向。

1 脑干诱发电位的基本原理

脑干诱发电位是通过头皮电极记录的脑干内神经元同步活动的远场电位,能够精确反映脑干内神经核团对声音刺激中不同声学属性的编码加工(Kraus et al., 2009)。临床上一般使用简单声音(如咔嚓声或纯音)作为诱发刺激。由这类刺激引发的脑干活动表现为刺激呈现后相继出现的一系列反应波,依次用罗马数字 I, II, III, IV, V, VI, 和 VII 表示,分别反映前庭耳蜗神经末梢(I),前庭耳蜗神经(II),耳蜗核(III),上橄榄复合体(IV),外侧丘系(V),以及下丘(VI, VII)的神经活动(Wible, Nicol, & Kraus, 2004)。由于这些反应波的潜伏期、峰间期长短受听觉神经纤维髓鞘化程度、突触结构及功能成熟度的影响,振幅又与接受刺激的神经元数量和兴奋性水平有关(Jiang, Brosi, Shao, & Wilkinson, 2000),因此,脑干诱发电位被广泛用于评价听觉传导通路的完整性以及诊断听觉系统疾病,并且其敏感性和准确性不断获得提高(Don, Kwong, Tanaka, Brackmann, & Nelson, 2005; Don, Kwong, & Tanaka, 2012; Don, Masuda, Nelson, & Brackmann, 1997)。

近年来,对复杂声音刺激诱发的脑干活动,即 complex-ABR (cABR)的研究获得重要进展。cABR 相比简单刺激诱发的脑干活动更为复杂,包含更多神经活动的信息,并能精确表征原始语音信号的时间和频率特征(Akhoun, Gallégo, et al., 2008; Chandrasekaran & Kraus, 2010; Galbraith, Arbagey, Branski, Comerc, & Rector, 1995)。以音节/da/为例,该音节由快速变化的辅音和较稳定的元音两部分构成,其引发的 cABR 也主要包括瞬时性反应(transient onset response)和持续性反应(sustained frequency-following responses, FFR)两种成分(Russo, Nicol, Musacchia, & Kraus, 2004)。其中,瞬时性反应由短暂、非周期性变化的刺激属性(如刺激起始或刺激结束)诱发,持续性反应则由周期性变化的声学特征(如音高)引起。由于脑干水平的神经元最高可以编码 1000 Hz 左右的频率,因此 cABR 能够精确表征语音中的基频、谐波,以及第一共振峰等信息(如图 1 所示)。这种神经反应和刺激特征之间的精确对应关系使该技术可以用于考察脑干进行语音编码时的功能特征,如神经反应的速度和强度、相位锁定反应

的强度和精确性等。

为更加科学有效地利用 cABR 研究脑干对语音信号的编码,研究者建立起较为规范的实验流程,并开发出丰富的数据处理方法(Akhoun, Moulin, et al., 2008; Russo et al., 2004; Skoe & Kraus, 2010a)。一般来说,脑干诱发电位实验中的刺激呈现和的数据采集均由同一台计算机控制(如图 2 所示)。声音首先从声卡发出,再通过音量控制装置传递至插入式耳机,并以此呈现给被试。信号采集则通过记录(active)、参考(reference)和接地(ground)三个电极进行。这三个电极分别位于 Cz 点,耳垂(或乳突),以及前额正中(国际脑电 10-20 系统)。刺激呈现系统和信号采集系统的同步则通过触发器实现。在声音呈现的具体方面,关键刺激的声压级一般设定在 60~85 dB 之间。成年人参加实验时多使用双耳呈现的方式,而当被试为儿童或出于其他考虑也可以采用一侧耳机呈现刺激声音。在后一种情况下,由于右耳传入的声音主要在左脑加工,所以在研究言语诱发的脑干活动时更多地将实验材料呈现给右耳。另一方面,因为 cABR 的波幅相对较小,同一种实验条件通常需要重复呈现 1000 次以上才能获得较为稳定的波形。声音属性上,刺激的时长一般控制在 40 至 2000 ms 之间,而 ISI 约为该时长的 30% 到 200%,呈现速率则由刺激时长和 ISI 共同决定。除单一条件的情况外,当实验包含多个条件时可以采用组块(block)或交替(interleave)的方式进行刺激呈现。在此基础上,研究者还可以根据具体的研究问题结合使用其它实验范式,如利用 oddball 范式考察脑干对非预期声音信号的自动识别(Slabu, Grimm, & Escera, 2012)。信号采集方面,与一般的 ERP 实验类似,在正式实验开始前需要将电极的电阻降低至 5000 Ω 以保证良好的信噪比。不同之处则在于为了提高时间上的精确性,cABR 通常需要采用更高的采样率(一般在 6000~20000 Hz 之间)。而滤波范围则取决于研究关注的脑干活动特征。最后,实验材料的选择需要综合考虑研究问题、被试群体、以及声音属性等多个因素。在基础研究中,单音节/da/和汉语声调是使用最为广泛的两类刺激。前者一般被用于比较不同群体(如阅读障碍和正常儿童)脑干活动的差异,后者则用于考察复杂听觉经验(如语言和音乐)对脑干声音编码能力的影响。随着研究的不断深入,研究者也开始在实验中使用单词、短语、

哭声和音乐等更加复杂的声音刺激(Strait, Kraus, Skoe, & Ashley, 2009)。更具生态效度的刺激材料和更精细的实验设计使 cABR 能帮助研究者更全面地理解正常交流中的听觉加工过程,由发展和成熟带来的言语编码能力的提高,以及患有学习障碍(如发展性阅读障碍)的儿童表现出的听觉系统功能损伤。

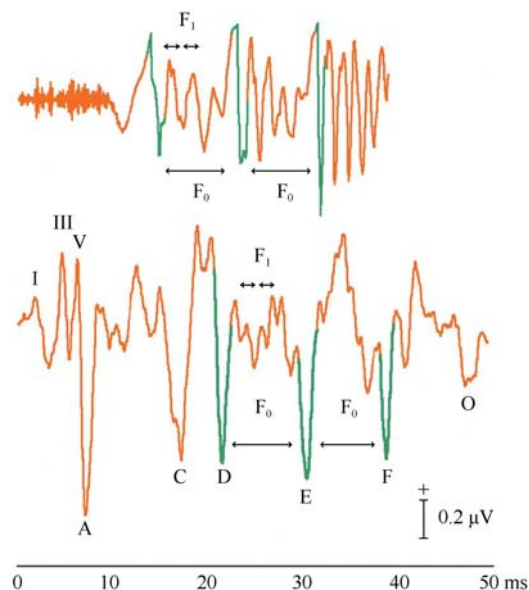


图 1 语音声学特征与脑干诱发电位的相似性

(修改自:Kraus & Nicol, 2005)

注:图 1 的上半部分是刺激/da/的波形图, F_0 和 F_1 分别代表基频和第一共振峰。图的下半部分为由刺激/da/引起的脑干诱发电位。其中,V-A 复合体一般被称为起始反应,O 为终止反应,D、E、F 由周期性声学属性诱发,也被称为频率追随反映(FFR), F_0 和 F_1 分别代表基频和第一共振峰。

与数据采集流程相对统一的情况不同,脑干诱发电位的数据分析方法较为多样。研究者可以使用多种方法从不同层面揭示脑干神经活动的特征,从而更加细致全面地考察听觉脑干对声音刺激的编码加工(Skoe & Kraus, 2010a)。具体来说,峰值大小和潜伏期长短是评价瞬时性反应的主要指标,分别代表脑干神经元对输入刺激的反应强度的大小和反应速度的快慢。对于持续性反应,分析方法则主要包括求均方根、傅立叶变换、刺

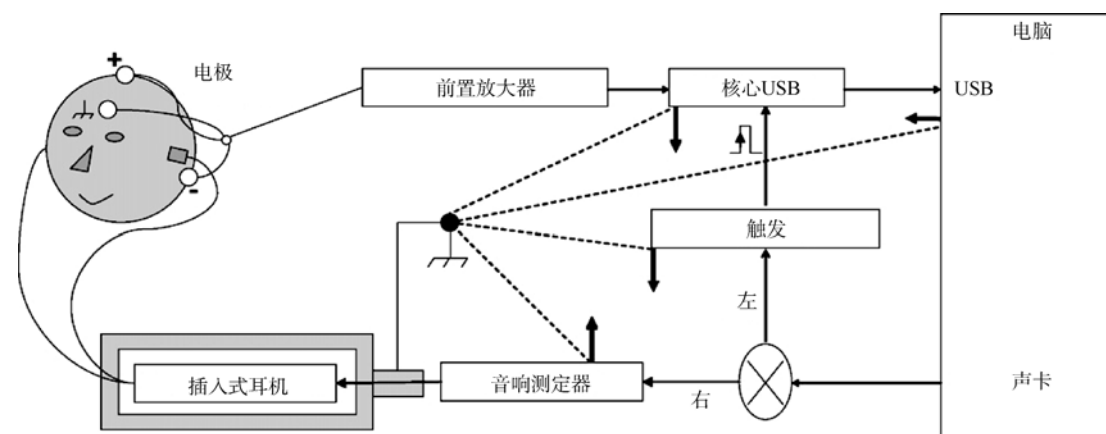


图2 ABR数据采集示意图(修改自：Akhoun et al., 2008)

注：此图示意了言语 ABR 的采集装置。整个系统由一台电脑控制，声音由声卡发出，经由音响控制装置传递至插入式耳机。同时由置于头皮的电极记录脑电信号。触发器保证了刺激呈现和信号记录的一致性。

激波形与反应波形的相关分析、自相关分析等。其中，通过计算均方根研究者可以得到脑干整体活动强弱的指标；傅立叶变换常被用于考察特定频率下神经活动的强度；相关分析使研究者可以比较神经反应与原始声音信号的同步性及形态差异；通过自相关分析可以得出脑干对周期性变化声学属性的加工情况，如对基频 (fundamental frequency, F_0) 的锁相反应等。

脑干诱发电位之所以被广泛应用于临床，并在近几年被逐渐用于言语感知研究在很大程度上是由于该技术具有非侵入性、安全、所需电极数量少、无需主动任务等特点。此外，脑干诱发电位还具有两个独特优势。一是其测量结果有较高的稳定性和可重复性。二是其可以精确反映脑干神经结构对复杂声音信号时间维度和频率维度声学信息的编码。这两大优势使脑干诱发电位可以用于回答正常言语编码的神经机制及其发展，异常脑干活动与言语技能发展落后之间的关系等重要理论问题。

2 脑干语音编码功能的发展及影响因素

神经系统的发育和成熟、功能可塑性及影响因素、神经生理活动与语言能力之间的关系等问题是目前语言认知神经科学研究的热点 (Partanen et al., 2013)。听觉系统的发育过程十分复杂，受到成熟和经验等因素的共同影响 (Gao & Suga, 2000; Moore & Linthicum, 2007; Suga & Ma, 2003)。对先

天聋人的研究发现，关键期内的声音输入对听觉系统的正常发育具有十分重要的作用。虽然传统观点认为听觉脑干在儿童 2 岁左右时就已经发育成熟，此后对声音感知能力的塑造主要发生在大脑皮层水平，但近期研究者通过对不同年龄阶段个体的脑干诱发电位进行分析发现神经系统对声音的编码是一个随年龄增长不断成熟的动态过程。即使儿童的脑干在结构层面已经发育成熟，其功能仍与成年个体存在较大差异，而这种差异会随着年龄的增长不断缩小。听觉脑干功能随年龄发展的另一个特点是表现出从简单一般到复杂特殊的渐进模式。具体来说，脑干编码简单声音的能力获得较早，而对复杂声音信号 (如语音) 进行编码的能力则持续发展到青春期才能达到和成年人近似的水平 (Johnson, Nicol, Zecker, & Kraus, 2008)。这些证据表明正常儿童脑干功能的发展一方面受到基因和成熟的影响，另一方面声音环境的特征同样发挥着重要的塑造作用。

2.1 脑干对刺激呈现统计特征的学习

统计学习 (statistical learning) 在儿童语言能力发展过程中起着非常重要的作用。研究表明，处于婴儿期的个体就能够抽取环境中特定声学线索的统计特征，具体表现为对出现频率高的声学线索发展出越来越强的敏感性，同时对低频线索的反应逐渐降低 (Werker & Tees, 1984; Werker, Gilbert, Humphrey, & Tees, 1981)。与行为研究的结果相似，神经系统同样具有从输入信号中“学

习”的能力(Segaert, Weber, de Lange, Petersson, & Hagoort, 2012; Winkler, Denham, & Nelken, 2009)。动物电生理研究证明中脑神经元对声音刺激中不同属性的统计特征非常敏感(Dean, Harper, & McAlpine, 2005), 并且以层级性的方式进行组织(Winkler et al., 2009)。在正常人言语加工神经机制的探索方面, 研究者同样试图寻找统计学习的底层神经机制、发展模式 and 重要影响因素。脑干诱发电位使研究者可以通过分析脑干水平的神经活动来回答这些问题。

脑干位于大脑皮层和耳蜗核之间。这一结构不仅是声音信号传输的中转站, 还能对这些信号进行主动加工, 并且其功能受到信号本身特征的调节。近期, Chandrasekaran 等人首次证明了脑干活动受声音信号局部统计特征的影响(Chandrasekaran, Hornickel, Skoe, Nicol, & Kraus, 2009)。研究者在重复刺激和变化刺激两种条件下分别测量儿童的脑干诱发电位, 结果发现相对于变化条件, 重复条件下的脑干活动更强, 对音节的表征更加精确。在这一结果的基础上, Skoe 等人在成年人群中同时考察局部和整体统计属性对脑干活动的影响, 结果发现在旋律内部音符重复和整体旋律重复条件下的神经编码均表现出增强的趋势, 并且由局部特征导致的增强更加明显(Skoe & Kraus, 2010b)。这些研究一致表明声音刺激呈现时的统计特征能够影响皮层下听觉中枢的活动。这种调节作用可能是统计学习的神经生理基础, 能够增强个体对特定声音线索的感知能力, 对个体的生存发展, 以及复杂认知技能的获得都具有十分重要的意义。研究者通过考察脑干神经活动与复杂言语技能之间的关系为上述观点提供了有力支持。首先, 重复条件与随机条件间 cABR 基频(F_0)表征的差异变化越大, 个体进行快速统计学习时的行为表现就越好(Skoe, Krizman, Spitzer, & Kraus, 2013)。此外, 脑干对声音信号呈现规律性的利用与儿童在噪音背景下的言语感知以及阅读能力的高低密切相关(Hornickel, Chandrasekaran, Zecker, & Kraus, 2011)。在该研究中, 作者使用结构方程模型的分析方法, 发现脑干对刺激呈现规则的学习能力与其它 cABR 指标结合可以解释儿童阅读发展和言语感知能力 50% 以上的变异。综合已有研究结果表明, 脑干能够对外界输入的声音信号进行即时监控, 并

根据刺激序列的特征调整自身的活动模式, 从而实现更精确、高效的编码和表征, 促进对言语信息的加工。

2.2 语言经验对脑干活动的塑造

影响个体对特定声学线索感知的关键因素除了呈现时的统计特征外, 还包括该线索在语言系统中的功能, 如第二共振峰过渡段(F_2 transition)的不同指向在感知上会形成/ba/, /da/, /ga/三个不同的音位, 基频的变化模式则决定了不同的声调范畴等。与之类似, 神经系统不仅受到刺激呈现时统计特征的影响, 长期的听觉经验也会导致特定脑区的结构属性, 以及在任务中的活动模式发生改变(Zatorre & Gandour, 2008)。功能磁共振研究表明长期的语言经验和音乐训练会改变正常人听觉皮层的形态和在特定任务中的激活, 从而影响言语技能和其他认知加工能力(Dehaene et al., 2010; Hyde et al., 2009; Thiebaut de Schotten, Cohen, Amemiya, Braga, & Dehaene, 2012)。但在初级的声音编码和皮层水平的抽象表征之间存在巨大的鸿沟, 仅依靠 fMRI 研究无法阐明这种变化是由特定经验直接导致, 还是源于对基本声音进行编码的能力改变。作为脑成像研究的重要的补充, 脑干诱发电位能更精确地反映听觉脑干对言语听觉信号的编码加工, 帮助考察长期的复杂听觉经验对初级声音编码过程的塑造, 从而建立听觉感知和认知加工之间的联系。

举例来说, 基频的不同变化模式在声调语言(如泰语、汉语等)中是区分语义的重要线索, 但对非声调语言(如英语)的听者来说则并非如此。这一特点使研究者可以通过操纵音高变化来考察不同语音环境对神经系统的塑造。fMRI 研究表明这种由语音系统差异导致的不同在大脑激活上表现为汉语母语者在加工音高变化时左侧岛叶前部等脑区的激活增强(Wong, Parsons, Martinez, & Diehl, 2004)。由于脑干诱发电位中的频率跟随反应(frequency-following response, FFR)反映了脑干对音高编码的精确性(Krishnan, Xu, Gandour, & Cariani, 2004), 因此这两种语言的母语者可能在该指标上存在显著差异。使用汉语声调作为实验材料, Krishnan 等人发现汉语母语者的脑干诱发电位相比非汉语母语者表现出更好的音高表征和更精确的音高追踪能力, 并且在第二共振峰的谐波上有更强的神经反应, 这种差异显然是由不同

的语言经验引起的,证明了长期语言经验对底层神经结构声音编码能力的塑造作用(Krishnan, Xu, Gandour, & Cariani, 2005)。进一步的研究发现这种由经验塑造的神经活动特征可以迁移到其他具有相似语音系统的言语感知上,甚至还能影响个体对非言语声音的加工(Krishnan, Gandour, Smalt, & Bidelman, 2010; Krishnan, Gandour, & Bidelman, 2010; Krishnan, Swaminathan, & Gandour, 2009)。

2.3 音乐训练对言语脑干诱发电位的影响

除了跨语言研究,长期经验对听觉系统功能的塑造作用同样在音乐家和非音乐家的对比中得到了验证。研究者发现音乐训练不但能引起特定大脑皮层的结构变化和功能重组(Hyde et al., 2009),并且还可以促进个体对音高、音色等基本声音属性的加工,听觉注意和噪音环境下的言语感知能力也得以显著提高(Kraus & Chandrasekaran, 2010; Münte, Altenmüller, & Jäncke, 2002; Parbery-Clark, Skoe, Lam, & Kraus, 2009; Parbery-Clark, Strait, Anderson, Hittner, & Kraus, 2011; Strait, Parbery-Clark, O'Connell, & Kraus, 2013; Zendel & Alain, 2012)。与言语相似,乐音中也包含着复杂的声学特征(Zatorre, Belin, & Penhune, 2002),因此,音乐训练同样可能会作用于皮层下听觉中枢,改变其对特定声音信号的反应模式。通过测量脑干诱发电位,研究者发现音乐家的脑干神经活动相比没有受过专业音乐训练的个体潜伏期更短,波幅更大,并且长期的音乐训练可以产生更强的相位锁定反应,提高脑干对言语刺激中音高信息表征的精确性(Kraus et al., 2009; Musacchia, Sams, Skoe, & Kraus, 2007; Wong, Skoe, Russo, Dees, & Kraus, 2007)。此外,音乐训练还可以提高听觉脑干在噪音背景下对言语刺激(如音节)的编码能力(Parbery-Clark, Skoe, & Kraus, 2009),增大音位最小对立体(minimal pair)在脑干水平神经活动的区分性。而这种神经活动区分程度的变化被证明与噪音背景下言语感知能力之间存在显著相关(Parbery-Clark, Tierney, Strait, & Kraus, 2012)。近几年来,音乐训练对于脑干功能的促进作用在正常成年人(Parbery-Clark, Skoe, Lam, et al., 2009; Parbery-Clark, Skoe, & Kraus, 2009)、学龄儿童(Strait, Hornickel, & Kraus, 2011; Strait, Parbery-Clark, Hittner, & Kraus, 2012)、甚至学龄前儿童身上(Strait et al., 2013)均得到了验证。另一方面,音

乐经验还能减少由听觉系统损伤带来的不良影响。表现为有音乐经验的患者相对没有音乐训练经验的患者有更稳定的皮层下神经活动,并保留了更好的言语感知能力(Parbery-Clark, Anderson, & Kraus, 2013)。一些研究者认为,这种音乐技能和言语感知能力变化的同步性可能是由于皮层下听觉中枢对关键声学线索统计特征的抽取能力与两种高级认知加工之间均存在紧密相关(Strait et al., 2011)。

综合已有研究表明,脑干对语音信号的编码能力受到听觉经验的显著影响。一方面,声音刺激的统计特征,长期的语言经验和音乐训练都能在一定程度上塑造脑干的功能。另一方面,这种塑造提高了脑干在加工相似语音特征时的精度和效率,证明了即使在皮层下水平同样存在低级神经活动和复杂言语加工之间的相互作用。

3 脑干诱发电位应用于发展性阅读障碍研究

语言认知神经科学研究的目的一方面在于探索正常语言加工的神经机制,另一方面则在于帮助患有语言障碍的儿童,促进其语言和阅读能力的发展。作为语言认知神经科学的重要组成部分,正常人的脑干诱发电位研究提供了关于脑干水平的语音编码特征以及功能可塑性影响因素的可靠证据,使研究者在初级语音感知与高级语言加工之间的关系问题上有了更清晰的认识。在此基础上,这一技术还可以被用于揭示学习障碍,特别是阅读障碍儿童的语音编码缺陷,以及皮层下听觉中枢的功能异常。

正常的听觉输入对儿童的语言发展具有重要作用。由于脑干诱发电位对声音传导通路的功能完整性有很好的检测能力,因此这项技术可以作为婴幼儿听力水平的客观指标用于听觉疾病的临床诊断(Chalak et al., 2013)。另一方面,听力正常的儿童也可能在言语感知和语言发展上表现出困难(如患有阅读障碍的儿童),而导致这一问题产生的原因目前仍是研究者试图回答的核心问题。尽管主流观点认为阅读障碍儿童的功能损伤发生在比较高级的语音加工层面,但行为和脑成像研究同样表明对特定语音线索的感知能力在个体的认知,特别是阅读发展中具有重要作用(Bailey & Snowling, 2002; Kuhl et al., 2008; Tallal & Gaab,

2006)。为回答障碍儿童的语音损伤是否源于声音编码的早期阶段,研究者开始利用 cABR 能反映脑干对复杂声音信号编码情况的特点,对发展性阅读障碍的认知和神经机制进行考察(Basu, Krishnan, & Weber-Fox, 2010; Chandrasekaran et al., 2009; Hornickel, Skoe, Nicol, Zecker, & Kraus, 2009; Russo, Nicol, Trommer, Zecker, & Kraus, 2009; Wible et al., 2004; Wible, Nicol, & Kraus, 2005)。

3.1 利用 cABR 考察阅读障碍儿童的语音编码能力

发展性阅读障碍是一种常见的学习障碍(Gabrieli, 2009)。被诊断为阅读障碍的儿童在词汇再认和阅读方面存在明显落后,但这种落后并非由智力或基本感知觉方面的缺陷引起。目前,关于阅读障碍的发生机制及核心损伤存在不同的观点,主要包括语音损伤理论、大细胞通路损伤理论、小脑理论等(Peterson & Pennington, 2012; 陈庆荣, 邓铸, 2006)。此外,也有研究者认为不同语言背景下阅读障碍的语言能力损伤存在不同。如与拼音文字中语音意识占核心地位的情况不同,语素意识、正字法知识,以及视觉空间加工能力的损伤可能是引起汉语阅读障碍的主要原因(Siok, Niu, Jin, Perfetti, & Tan, 2008; Siok, Spinks, Jin, & Tan, 2009; Tong, McBride-Chang, Shu, & Wong, 2009)。现有的理论观点中,语音损伤假设得到了大量行为和脑成像研究的支持,并且在跨语言研究中得到了较为一致的结果(Ramus, 2003; Ramus et al., 2003; Ramus & Szenkovits, 2008; Siok et al., 2008, 2009; Zhang et al., 2012)。但语音损伤的本质问题仍处于争论之中(Ramus & Ahissar, 2012; Ramus & Szenkovits, 2008)。一些研究者认为语音加工缺陷本身就是核心损伤,另一些研究者则认为损伤的根源产生于更早的声音编码阶段,如对快速变化声音信号的加工等(Tallal, 2004; Temple et al., 2000; Vandermosten et al., 2010; Wang, Huss, Hämäläinen, & Goswami, 2012)。后一种观点的支持者认为基本声音信号感知方面的缺陷会导致儿童无法建立稳定的语音表征,从而影响儿童语音意识的发展,继而使儿童在学习形-音对应关系时遇到困难,最终导致阅读方面的落后。神经机制方面,阅读障碍患者在加工快速变化声音信号时左侧前额叶表现出激活不足,而针对性训练则可以同时提高大脑激活水平和阅读成绩(Temple et al., 2000)。近期,研究者发现阅读障碍患者在加工

声音信号时听觉皮层的神经活动在 Gamma 频段(约 30Hz)与正常个体存在显著差异,并且这种异常的神经活动模式与语音意识、快速命名和语音工作记忆之间存在紧密相关,提示其可能是阅读障碍重要的神经生理基础(Kraus, 2012; Lehongre, Ramus, Villiermet, Schwartz, & Giraud, 2011)。虽然行为和脑成像研究证明了障碍个体在加工声音刺激时存在问题,但仍缺少直接的证据证明障碍儿童在初级语音编码阶段存在落后。由于 cABR 具有反映脑干对语音信号编码精确程度的能力,因此对阅读障碍儿童脑干诱发电位的研究能够更加直接地反映障碍儿童在对言语刺激进行编码时的神经活动情况。

以此为出发点,研究者同时使用简单和复杂的声音刺激对阅读障碍儿童的语音编码能力进行考察。结果发现障碍儿童虽然对简单声音刺激有正常的脑干活动,但在对快速变化语音信号进行加工时存在明显问题(Banai et al., 2009; Johnson, Nicol, Zecker, & Kraus, 2007; Kraus & Nicol, 2005; Song, Banai, Russo, & Kraus, 2006; Wible et al., 2004),表现为神经反应速度下降,不同音位诱发的神经活动模式区分性减弱,以及神经活动变异性增大等(Wible et al., 2005)。例如,辅音是一种持续时间较短且包含时域和频域变化的语音信号。对辅音的感知异常是阅读障碍儿童普遍存在的问题(Tallal, 1980)。Banai 等人的研究表明阅读水平较低的儿童相比阅读水平高的儿童在音节/da/诱发的脑干神经反应上表现出更大的延迟,并认为阅读相关语音技能的高低可能与皮层下听觉中枢对声音信号加工的速度之间存在紧密联系(Banai et al., 2009)。与此同时, Hornickel 等人则发现了脑干对不同塞音的神经活动存在不同。研究者使用了/ba/、/da/、/ga/三个单音节作为刺激进行实验,结果发现音节/ga/诱发的脑干神经活动潜伏期最短,而/ba/诱发的反应波潜伏期最长。更重要的是,这三种刺激诱发的反应波形之间的分离程度与阅读能力存在正相关,即神经活动分离程度越大的儿童阅读能力越强。此外,这种神经编码上的区分性还与噪音背景下的言语感知能力密切相关(Hornickel et al., 2009)。噪音背景下的言语感知困难是阅读障碍儿童语音加工缺陷的一种典型表现(Ziegler, Pech-Georgel, George, & Lorenzi, 2009),出现该问题的原因可能在于底层神经环路的损伤

导致个体无法对特定的刺激模式建立预期,即在利用刺激的重复性上存在不足(Ahissar, 2007; Ahissar, Lubin, Putter-Katz, & Banai, 2006)。Anderson 等人利用 cABR 证明了这一观点,他们发现正常儿童的脑干在刺激以某种规则呈现的条件下相比不规则的条件有更强的编码和表征,而障碍儿童则没有或表现出相反的神经活动模式(Anderson, Skoe, Chandrasekaran, & Kraus, 2010; Chandrasekaran et al., 2009)。从另一个角度出发,近期的一项研究表明阅读障碍儿童脑干神经元对声音刺激的编码缺乏稳定性,这种不稳定的神经活动同样可能是导致儿童无法有效建立良好语音表征的重要原因,并最终影响熟练阅读技能的获得(Hornickel & Kraus, 2013)。以上研究从听觉脑干语音编码的不同方面揭示了阅读障碍语音加工缺陷的底层神经机制,有助于更全面地理解语音损伤的本质,并以此为基础设计更具针对性的训练以促进障碍儿童阅读能力的提高。

3.2 脑干诱发电位在评价和促进儿童阅读能力发展中的应用

自然状态下的言语理解和文本阅读是正常语言交流的基础。研究表明对语音信号编码的精确程度能很好地预测这两种能力的发展。脑干诱发电位不仅能反映这种编码能力,而且相对于行为测验和其他脑成像技术更简单易行,对损伤和异常也更加敏感。同时,脑干诱发电位还具有高稳定性和可重复性等优点,因此这一技术能够被用于预测儿童语言能力发展(Banai et al., 2009; Chonchaiya et al., 2013; Hornickel, Lin, & Kraus, 2013; Veuille, Magnan, Ecalle, Thai-Van, & Collet, 2007)。事实上,脑干诱发电位提供了反映皮层下神经中枢对声音信号加工情况的大量指标,这些指标的不同组合可以分别预测特定言语技能的发展水平。例如,规则性条件下神经活动的增幅大小、对不同塞音神经活动的区分程度、神经反应的速度可以结合起来对儿童阅读能力的发展进行有效的预测;而规则性条件下的活动增强、低频的谐波表征、以及噪音条件下的神经活动延迟则能够解释儿童言语理解能力 56% 的变异(Hornickel et al., 2011)。其他研究者同样采用脑干诱发电位对儿童的阅读能力发展和低级听觉中枢神经活动的关系进行考察,结果表明 cABR 的特定指标(如神经活动的即时性)确实具有非常好的

预测能力(Banai, Nicol, Zecker, & Kraus, 2005; Chonchaiya et al., 2013; Hornickel et al., 2011; Wible et al., 2005)。

将脑干诱发电位应用于儿童阅读发展和障碍研究的主要目的一方面在于寻找能准确识别和诊断阅读障碍的可靠指标,另一方面则是为了制定更有效的训练方案来帮助障碍儿童提高其阅读能力。语音编码与高级言语技能之间的密切关系提示研究者可以通过提高儿童对声音信号的编码水平来促进言语感知和阅读能力的发展(Tallal, 2012)。在训练研究中,方法和对象是两个重要方面。cABR 首先可以作为评价训练方式的客观指标,帮助研究者制定更具针对性的训练方案。例如, Cunningham 等人通过对比训练前后的脑干活动发现个体在噪音背景下的言语感知能力及相应的神经活动异常可以通过增强刺激的关键特征加以提高(Cunningham, Nicol, Zecker, Bradlow, & Kraus, 2001)。Veuille 等人则证明了视听跨通路训练的有效性(Veuille et al., 2007)。从训练对象的角度出发, King 等人的研究表明言语损伤儿童脑干对言语刺激的反应模式可以预测个体从训练中受益的程度(King, Warrier, Hayes, & Kraus, 2002)。该研究发现,脑干活动存在显著延迟的个体可以通过语音训练提高对 /da/ 和 /ga/ 的辨别能力。并且脑干诱发电位的活动也逐渐恢复到正常模式。这些结果表明研究者可以通过测量儿童的 cABR 将不同类型的语言障碍患者和特定的训练手段进行匹配从而获得最佳的干预效果。Hornickel 等人近期则利用 cABR 证明了在课堂环境中使用听力辅助设备(assistive listening FM system)可以帮助阅读障碍儿童提高脑干对快速变化语音线索(如共振峰变换)反应的稳定性,同时促进语音意识和基本的阅读能力的提高(Hornickel, Zecker, Bradlow, & Kraus, 2012)。

脑干诱发电位在阅读障碍研究中的应用一方面证明了障碍儿童确实在加工基本声音信号时存在问题,并且导致该问题的根本原因很可能在于低级神经中枢对声学信息的异常编码。另一方面这些研究也表明可以利用 cABR 对儿童的阅读能力进行评价和预测。此外,由于针对基本听觉能力的训练可以带来阅读能力的显著提高,提示教育者可以从提高基本感知能力和注意控制等方面入手促进儿童的言语和阅读发展。

4 研究展望

脑干诱发电位为研究者提供了无损伤地考察皮层下听觉中枢对声音信号进行编码加工的有效途径。该技术具有客观性和可重复性等优点,并且对发展变化十分敏感,已经被广泛应用于听觉损伤的临床诊断。更重要的是,言语脑干诱发电位能反映脑干对语音信号编码和表征的活动特征及精确性,可以弥补目前对于初级语音编码,特别是低级听觉中枢研究相对不足的问题。随着这一技术应用的不断深入,相应的研究已经扩展到对儿童脑干功能发展,音乐家、学习障碍、以及正常成人言语加工模式和发展变化的考察,揭示脑干功能与经验、环境、以及高级认知加工之间的相互关系。其中,对语言发展和阅读障碍的研究表明脑干对言语信号的反应特征与阅读能力、认知功能以及噪音背景下言语感知能力等密切相关,可以用来预测儿童的语言和阅读能力发展。

脑干水平的言语编码机制是一个崭新的研究领域,对复杂声音信号神经编码机制的考察目前正处于起步阶段,仍有大量问题有待回答。首先,正常言语编码的神经机制仍将是该领域未来研究的重要方面,相关问题包括脑干如何对更复杂的声音信号进行编码,多通道信息整合是否能够促进脑干对于声音信号的加工等。第二,在儿童语言发展方面,阅读障碍儿童听觉脑干活动的异常和高级皮层功能损伤之间的关系,以及和不同层次语音加工能力落后之间的关系将成为另一个重要的研究方向。需要特别指出的是,虽然西方国家已经在该领域进行了大量的探索,但到目前为止,汉语阅读障碍脑干语音编码的研究仍未见报告。行为和脑电研究表明汉语阅读障碍儿童在声调感知方面存在异常(Zhang et al., 2012),但这种异常是否产生于更早的加工阶段,脑干水平的声调编码与高级阅读能力之间究竟存在怎样的关系等问题仍需得到更加清楚的回答。第三,在阅读障碍及其他发展性语言障碍的诊断和训练方面还存在两个重要问题:(1)如何将脑干活动指标和其它方法结合起来对障碍儿童进行精确识别;(2)何种训练能更有效地帮助障碍儿童获得言语感知和阅读能力上的提高。最后,研究者需要将脑干诱发电位和其他脑成像技术、基因分析、行为追踪

研究等结合起来,从而更加全面地揭示基因、脑与不同层次言语及阅读能力发展之间的关系,进一步完善对言语加工神经机制的认识。

参考文献

- 陈庆荣, 邓铸. (2006). 发展性阅读障碍的理论及眼动研究. *心理科学进展*, 14(1), 46–52.
- Ahissar, M. (2007). Dyslexia and the anchoring-deficit hypothesis. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(11), 458–465.
- Ahissar, M., Lubin, Y., Putter-Katz, H., & Banai, K. (2006). Dyslexia and the failure to form a perceptual anchor. *Nature Neuroscience*, 9(12), 1558–1564.
- Akhoun, I., Gallégo, S., Moulin, A., Ménard, M., Veuillet, E., Berger-Vachon, C., ... Thai-Van, H. (2008). The temporal relationship between speech auditory brainstem responses and the acoustic pattern of the phoneme /ba/ in normal-hearing adults. *Clinical Neurophysiology*, 119(4), 922–933.
- Akhoun, I., Moulin, A., Jeanvoine, A., Ménard, M., Buret, F., Vollaie, C., ... Thai-Van, H. (2008). Speech auditory brainstem response (speech ABR) characteristics depending on recording conditions, and hearing status: An experimental parametric study. *Journal of Neuroscience Methods*, 175(2), 196–205.
- Anderson, S., Skoe, E., Chandrasekaran, B., & Kraus, N. (2010). Neural timing is linked to speech perception in noise. *Journal of Neuroscience*, 30(14), 4922–4926.
- Bailey, P. J., & Snowling, M. J. (2002). Auditory processing and the development of language and literacy. *British Medical Bulletin*, 63, 135–146.
- Banai, K., Hornickel, J., Skoe, E., Nicol, T., Zecker, S., & Kraus, N. (2009). Reading and subcortical auditory function. *Cerebral Cortex*, 19(11), 2699–2707.
- Banai, K., Nicol, T., Zecker, S. G., & Kraus, N. (2005). Brainstem timing: Implications for cortical processing and literacy. *Journal of Neuroscience*, 25(43), 9850–9857.
- Basu, M., Krishnan, A., & Weber-Fox, C. (2010). Brainstem correlates of temporal auditory processing in children with specific language impairment. *Developmental Science*, 13(1), 77–91.
- Beissner, F., Deichmann, R., & Baudrexel, S. (2011). fMRI of the brainstem using dual-echo EPI. *Neuroimage*, 55(4), 1593–1599.
- Beissner, F., Schumann, A., Brunn, F., Eisenträger, D., & Bär, K. J. (2013). Advances in functional magnetic resonance imaging of the human brainstem. *Neuroimage*, doi: 10.1016/j.neuroimage.2013.07.081
- Chalak, S., Kale, A., Rawekar, A., Khatib, N., Deshpande, V.

- K., & Biswas, D. A. (2013). A comparison of auditory brainstem response obtained using monaural and binaural stimulation in normal children and in children with hearing loss. *International Journal of Applied and Basic Medical Research*, 4, 3453–3457.
- Chandrasekaran, B., Hornickel, J., Skoe, E., Nicol, T., & Kraus, N. (2009). Context-dependent encoding in the human auditory brainstem relates to hearing speech in noise: Implications for developmental dyslexia. *Neuron*, 64(3), 311–319.
- Chandrasekaran, B., & Kraus, N. (2010). The scalp-recorded brainstem response to speech: Neural origins and plasticity. *Psychophysiology*, 47(2), 236–246.
- Chonchaiya, W., Tardif, T., Mai, X., Xu, L., Li, M., Kaciroti, N., ... Lozoff, B. (2013). Developmental trends in auditory processing can provide early predictions of language acquisition in young infants. *Developmental Science*, 16, 159–172.
- Cunningham, J., Nicol, T., Zecker, S. G., Bradlow, A., & Kraus, N. (2001). Neurobiologic responses to speech in noise in children with learning problems: Deficits and strategies for improvement. *Clinical Neurophysiology*, 112(5), 758–767.
- Dean, I., Harper, N. S., & McAlpine, D. (2005). Neural population coding of sound level adapts to stimulus statistics. *Nature Neuroscience*, 8(12), 1684–1689.
- Dehaene, S., Pegado, F., Braga, L. W., Ventura, P., Nunes, F. G., Jobert, A., ... Cohen, L. (2010). How learning to read changes the cortical networks for vision and language. *Science*, 330(6009), 1359–1364.
- Don, M., Kwong, B., & Tanaka, C. (2012). Interaural stacked auditory brainstem response measures for detecting small unilateral acoustic tumors. *Audiology and Neurotology*, 17(1), 54–68.
- Don, M., Kwong, B., Tanaka, C., Brackmann, D., & Nelson, R. (2005). The stacked ABR: A sensitive and specific screening tool for detecting small acoustic tumors. *Audiology and Neurotology*, 10(5), 274–290.
- Don, M., Masuda, A., Nelson, R., & Brackmann, D. (1997). Successful detection of small acoustic tumors using the stacked derived-band auditory brain stem response amplitude. *The American Journal of Otology*, 18(5), 608–621, 682–685.
- Friederici, A. D. (2012). The cortical language circuit: From auditory perception to sentence comprehension. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(5), 262–268.
- Gabrieli, J. D. E. (2009). Dyslexia: A new synergy between education and cognitive neuroscience. *Science*, 325(5938), 280–283.
- Galbraith, G. C., Arbagey, P. W., Branski, R., Comerci, N., & Rector, P. M. (1995). Intelligible speech encoded in the human brain stem frequency-following response. *Neuroreport*, 6(17), 2363–2367.
- Gao, E., & Suga, N. (2000). Experience-dependent plasticity in the auditory cortex and the inferior colliculus of bats: Role of the corticofugal system. *Proceedings of the National Academic Sciences of the United States of America*, 97(14), 8081–8086.
- Hickok, G., & Poeppel, D. (2007). The cortical organization of speech processing. *Nature Reviews Neuroscience*, 8(5), 393–402.
- Hornickel, J., Chandrasekaran, B., Zecker, S., & Kraus, N. (2011). Auditory brainstem measures predict reading and speech-in-noise perception in school-aged children. *Behavioural Brain Research*, 216(2), 597–605.
- Hornickel, J., & Kraus, N. (2013). Unstable representation of sound: A biological marker of dyslexia. *Journal of Neuroscience*, 33(8), 3500–3504.
- Hornickel, J., Lin, D., & Kraus, N. (2013). Speech-evoked auditory brainstem responses reflect familial and cognitive influences. *Developmental Science*, 16(1), 101–110.
- Hornickel, J., Skoe, E., Nicol, T., Zecker, S., & Kraus, N. (2009). Subcortical differentiation of stop consonants relates to reading and speech-in-noise perception. *Proceedings of the National Academic Sciences of the United States of America*, 106(31), 13022–13027.
- Hornickel, J., Zecker, S. G., Bradlow, A. R., & Kraus, N. (2012). Assistive listening devices drive neuroplasticity in children with dyslexia. *Proceedings of the National Academic Sciences of the United States of America*, 109(41), 16731–16736.
- Hyde, K. L., Lerch, J., Norton, A., Forgeard, M., Winner, E., Evans, A. C., & Schlaug, G. (2009). Musical training shapes structural brain development. *Journal of Neuroscience*, 29(10), 3019–3025.
- Jiang, Z. D., Brosi, D. M., Shao, X. M., & Wilkinson, A. R. (2000). Maximum length sequence brainstem auditory evoked responses in term neonates who have perinatal hypoxia-ischemia. *Pediatric Research*, 48(5), 639–645.
- Johnson, K. L., Nicol, T. G., Zecker, S. G., & Kraus, N. (2007). Auditory brainstem correlates of perceptual timing deficits. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(3), 376–385.
- Johnson, K. L., Nicol, T., Zecker, S. G., & Kraus, N. (2008). Developmental plasticity in the human auditory brainstem. *Journal of Neuroscience*, 28(15), 4000–4007.
- King, C., Warrier, C. M., Hayes, E., & Kraus, N. (2002). Deficits in auditory brainstem pathway encoding of speech sounds in children with learning problems. *Neuroscience Letters*, 319(2), 111–115.

- Kotz, S. A., & Schwartz, M. (2010). Cortical speech processing unplugged: A timely subcortico-cortical framework. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(9), 392–399.
- Kraus, N. (2012). Atypical brain oscillations: A biological basis for dyslexia? *Trends in Cognitive Sciences*, 16(1), 12–13.
- Kraus, N., & Chandrasekaran, B. (2010). Music training for the development of auditory skills. *Nature Reviews Neuroscience*, 11(8), 599–605.
- Kraus, N., & Nicol, T. (2005). Brainstem origins for cortical 'what' and 'where' pathways in the auditory system. *Trends in Neurosciences*, 28(4), 176–181.
- Kraus, N., Skoe, E., Parbery-Clark, A., & Ashley, R. (2009). Experience-induced malleability in neural encoding of pitch, timbre, and timing. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169, 543–557.
- Krishnan, A., Gandour, J. T., & Bidelman, G. M. (2010). The effects of tone language experience on pitch processing in the brainstem. *Journal of Neurolinguistics*, 23(1), 81–95.
- Krishnan, A., Gandour, J. T., Smalt, C. J., & Bidelman, G. M. (2010). Language-dependent pitch encoding advantage in the brainstem is not limited to acceleration rates that occur in natural speech. *Brain and Language*, 114(3), 193–198.
- Krishnan, A., Swaminathan, J., & Gandour, J. T. (2009). Experience-dependent enhancement of linguistic pitch representation in the brainstem is not specific to a speech context. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21(6), 1092–1105.
- Krishnan, A., Xu, Y., Gandour, J. T., & Cariani, P. A. (2004). Human frequency-following response: Representation of pitch contours in Chinese tones. *Hearing Research*, 189(1-2), 1–12.
- Krishnan, A., Xu, Y. S., Gandour, J., & Cariani, P. (2005). Encoding of pitch in the human brainstem is sensitive to language experience. *Cognitive Brain Research*, 25(1), 161–168.
- Kuhl, P. K., Conboy, B. T., Coffey-Corina, S., Padden, D., Rivera-Gaxiola, M., & Nelson, T. (2008). Phonetic learning as a pathway to language: New data and native language magnet theory expanded (NLM-e). *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1493), 979–1000.
- Lehongre, K., Ramus, F., Villiermet, N., Schwartz, D., & Giraud, A. L. (2011). Altered low-gamma sampling in auditory cortex accounts for the three main facets of dyslexia. *Neuron*, 72(6), 1080–1090.
- McGettigan, C., & Scott, S. K. (2012). Cortical asymmetries in speech perception: What's wrong, what's right and what's left? *Trends in Cognitive Sciences*, 16(5), 269–276.
- Moore, J. K., & Linthicum, F. J. (2007). The human auditory system: A timeline of development. *International Journal of Audiology*, 46(9), 460–478.
- Münste, T. F., Altenmüller, E., & Jäncke, L. (2002). The musician's brain as a model of neuroplasticity. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(6), 473–478.
- Musacchia, G., Sams, M., Skoe, E., & Kraus, N. (2007). Musicians have enhanced subcortical auditory and audiovisual processing of speech and music. *Proceedings of the National Academic of Sciences of the United States of America*, 104(40), 15894–15898.
- Nelken, I. (2004). Processing of complex stimuli and natural scenes in the auditory cortex. *Current Opinion in Neurobiology*, 14(4), 474–480.
- Parbery-Clark, A., Anderson, S., & Kraus, N. (2013). Musicians change their tune: How hearing loss alters the neural code. *Hearing Research*, 302, 121–131.
- Parbery-Clark, A., Skoe, E., & Kraus, N. (2009). Musical experience limits the degradative effects of background noise on the neural processing of sound. *Journal of Neuroscience*, 29(45), 14100–14107.
- Parbery-Clark, A., Skoe, E., Lam, C., & Kraus, N. (2009). Musician enhancement for speech-in-noise. *Ear and Hearing*, 30(6), 653–661.
- Parbery-Clark, A., Strait, D. L., Anderson, S., Hittner, E., & Kraus, N. (2011). Musical experience and the aging auditory system: Implications for cognitive abilities and hearing speech in noise. *PLoS One*, 6(5), e18082.
- Parbery-Clark, A., Tierney, A., Strait, D. L., & Kraus, N. (2012). Musicians have fine-tuned neural distinction of speech syllables. *Neuroscience*, 219, 111–119.
- Partanen, E., Kujala, T., Näätänen, R., Liitola, A., Sambeth, A., & Huotilainen, M. (2013). Learning-induced neural plasticity of speech processing before birth. *Proceedings of the National Academic of Sciences of the United States of America*, 110, 15145–15150.
- Peterson, R. L., & Pennington, B. F. (2012). Developmental dyslexia. *The Lancet*, 379(9830), 1997–2007.
- Price, C. J. (2012). A review and synthesis of the first 20 years of PET and fMRI studies of heard speech, spoken language and reading. *Neuroimage*, 62(2), 816–847.
- Ramus, F. (2003). Developmental dyslexia: Specific phonological deficit or general sensorimotor dysfunction? *Current Opinion in Neurobiology*, 13(2), 212–218.
- Ramus, F., & Ahissar, M. (2012). Developmental dyslexia: The difficulties of interpreting poor performance, and the importance of normal performance. *Cognitive Neuropsychology*, 29(1–2), 104–122.
- Ramus, F., Rosen, S., Dakin, S. C., Day, B. L., Castellote, J. M., White, S., & Frith, U. (2003). Theories of developmental dyslexia: Insights from a multiple case

- study of dyslexic adults. *Brain*, 126(Pt 4), 841–865.
- Ramus, F., & Szenkovits, G. (2008). What phonological deficit? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61(1), 129–141.
- Russo, N., Nicol, T., Musacchia, G., & Kraus, N. (2004). Brainstem responses to speech syllables. *Clinical Neurophysiology*, 115(9), 2021–2030.
- Russo, N., Nicol, T., Trommer, B., Zecker, S., & Kraus, N. (2009). Brainstem transcription of speech is disrupted in children with autism spectrum disorders. *Developmental Science*, 12(4), 557–567.
- Segaert, K., Weber, K., de Lange, F. P., Petersson, K. M., & Hagoort, P. (2013). The suppression of repetition enhancement: A review of fMRI studies. *Neuropsychologia*, 51(1), 59–66.
- Siok, W. T., Niu, Z. D., Jin, Z., Perfetti, C. A., & Tan, L. H. (2008). A structural-functional basis for dyslexia in the cortex of Chinese readers. *Proceedings of the National Academic of the Sciences of the United States of America*, 105(14), 5561–5566.
- Siok, W. T., Spinks, J. A., Jin, Z., & Tan, L. H. (2009). Developmental dyslexia is characterized by the co-existence of visuospatial and phonological disorders in Chinese children. *Current Biology*, 19(19), R890–R892.
- Skoe, E., & Kraus, N. (2010a). Auditory brain stem response to complex sounds: a tutorial. *Ear and Hearing*, 31(3), 302–324.
- Skoe, E., & Kraus, N. (2010b). Hearing it again and again: On-line subcortical plasticity in humans. *PLoS One*, 5(10), e13645.
- Skoe, E., Krizman, J., Spitzer, E., & Kraus, N. (2013). The auditory brainstem is a barometer of rapid auditory learning. *Neuroscience*, 243, 104–114.
- Slabu, L., Grimm, S., & Escera, C. (2012). Novelty detection in the human auditory brainstem. *Journal of Neuroscience*, 32(4), 1447–1452.
- Song, J. H., Banai, K., Russo, N. M., & Kraus, N. (2006). On the relationship between speech- and nonspeech-evoked auditory brainstem responses. *Audiology and Neurotology*, 11(4), 233–241.
- Strait, D. L., Hornickel, J., & Kraus, N. (2011). Subcortical processing of speech regularities underlies reading and music aptitude in children. *Behavioral and Brain Functions*, 7, 44.
- Strait, D. L., Kraus, N., Skoe, E., & Ashley, R. (2009). Musical experience and neural efficiency: Effects of training on subcortical processing of vocal expressions of emotion. *European Journal of Neuroscience*, 29(3), 661–668.
- Strait, D. L., Parbery-Clark, A., Hittner, E., & Kraus, N. (2012). Musical training during early childhood enhances the neural encoding of speech in noise. *Brain and Language*, 123, 191–201.
- Strait, D. L., Parbery-Clark, A., O'Connell, S., & Kraus, N. (2013). Biological impact of preschool music classes on processing speech in noise. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 6, 51–60.
- Suga, N., & Ma, X. F. (2003). Multiparametric corticofugal modulation and plasticity in the auditory system. *Nature Reviews Neuroscience*, 4(10), 783–794.
- Tallal, P. (1980). Auditory temporal perception, phonics, and reading disabilities in children. *Brain and Language*, 9(2), 182–198.
- Tallal, P. (2004). Improving language and literacy is a matter of time. *Nature Reviews Neuroscience*, 5(9), 721–728.
- Tallal, P. (2012). Improving neural response to sound improves reading. *Proceedings of the National Academic of Sciences of the United States of America*, 109(41), 16406–16407.
- Tallal, P., & Gaab, N. (2006). Dynamic auditory processing, musical experience and language development. *Trends in Neurosciences*, 29(7), 382–390.
- Temple, E., Poldrack, R. A., Protopapas, A., Nagarajan, S., Salz, T., Tallal, P., ... Gabrieli, J. D. E. (2000). Disruption of the neural response to rapid acoustic stimuli in dyslexia: Evidence from functional MRI. *Proceedings of the National Academic of Sciences of the United States of America*, 97(25), 13907–13912.
- Thiebaut de Schotten, M., Cohen, L., Amemiya, E., Braga, L. W., & Dehaene, S. (2012). Learning to read improves the structure of the Arcuate Fasciculus. *Cerebral Cortex*.
- Tong, X. L., McBride-Chang, C., Shu, H., & Wong, A. M. Y. (2009). Morphological awareness, orthographic knowledge, and spelling errors: Keys to understanding early Chinese literacy acquisition. *Scientific Studies of Reading*, 13(5), 426–452.
- Vandermosten, M., Boets, B., Luts, H., Poelmans, H., Golestani, N., Wouters, J., & Ghesquiere, P. (2010). Adults with dyslexia are impaired in categorizing speech and nonspeech sounds on the basis of temporal cues. *Proceedings of the National Academic of Sciences of the United States of America*, 107(23), 10389–10394.
- Veuillet, E., Magnan, A., Ecalle, J., Thai-Van, H., & Collet, L. (2007). Auditory processing disorder in children with reading disabilities: Effect of audiovisual training. *Brain*, 130(11), 2915–2928.
- Wang, H. L. S., Huss, M., Hämäläinen, J. A., & Goswami, U. (2012). Basic auditory processing and developmental dyslexia in Chinese. *Reading and Writing*, 25(2), 509–536.
- Wang, X. (2007). Neural coding strategies in auditory cortex.

- Hearing Research*, 229(1-2), 81–93.
- Werker, J. F., Gilbert, J. H. V., Humphrey, K., & Tees, R. C. (1981). Developmental aspects of cross-language speech perception. *Child Development*, 52(1), 349–355.
- Werker, J. F., & Tees, R. C. (1984). Phonemic and phonetic factors in adult cross-language speech perception. *Journal of the Acoustical Society of America*, 75(6), 1866–1878.
- Wible, B., Nicol, T., & Kraus, N. (2004). Atypical brainstem representation of onset and formant structure of speech sounds in children with language-based learning problems. *Biological Psychology*, 67(3), 299–317.
- Wible, B., Nicol, T., & Kraus, N. (2005). Correlation between brainstem and cortical auditory processes in normal and language-impaired children. *Brain*, 128(Pt 2), 417–423.
- Winkler, I., Denham, S. L., & Nelken, I. (2009). Modeling the auditory scene: Predictive regularity representations and perceptual objects. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(12), 532–540.
- Wong, P. C. M., Parsons, L. M., Martinez, M., & Diehl, R. L. (2004). The role of the insular cortex in pitch pattern perception: The effect of linguistic contexts. *Journal Of Neuroscience*, 24(41), 9153–9160.
- Wong, P. C. M., Skoe, E., Russo, N. M., Dees, T., & Kraus, N. (2007). Musical experience shapes human brainstem encoding of linguistic pitch patterns. *Nature Neuroscience*, 10, 420–422.
- Zatorre, R. J., Belin, P., & Penhune, V. B. (2002). Structure and function of auditory cortex: Music and speech. *Trends in Cognitive Sciences*, 6(1), 37–46.
- Zatorre, R. J., & Gandour, J. T. (2008). Neural specializations for speech and pitch: moving beyond the dichotomies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1493), 1087–1104.
- Zendel, B. R., & Alain, C. (2012). Musicians experience less age-related decline in central auditory processing. *Psychology and Aging*, 27(2), 410–417.
- Zhang, Y. J., Zhang, L. J., Shu, H., Xi, J., Wu, H., Zhang, Y., & Li, P. (2012). Universality of categorical perception deficit in developmental dyslexia: An investigation of Mandarin Chinese tones. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 53(8), 874–882.
- Ziegler, J. C., Pech-Georgel, C., George, F., & Lorenzi, C. (2009). Speech-perception-in-noise deficits in dyslexia. *Developmental Science*, 12(5), 732–745.

Application of Auditory Brainstem Response (ABR) in Speech Perception Research

XIA Zhichao¹; HONG Tian¹; ZHANG Linjun²; SHU Hua¹

(¹ National Key Lab of Cognitive Neuroscience and Learning, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(² College of Chinese Studies, Beijing Language and Culture University, Beijing 100083, China)

Abstract: Auditory brainstem response (ABR) provides a noninvasive and objective way to understand how complex sounds are processed in human brain. Recently it has been used in the field of auditory cognitive neuroscience to investigate: (1) brainstem response to speech sounds in adults and normally developing children and (2) the neural basis of perceptual and phonological deficits in dyslexia and other developmental disorders. By discussing these new findings, we suggest that the relationship between basic auditory processing and high-level cognitive processes in speech perception and the neural basis of dyslexia will be the main directions for future studies.

Key words: auditory brainstem responses; speech perception; neural basis; developmental dyslexia