

doi: 10.3969/j.issn.1672-4933.2024.06.007

儿童汉语语调习得与神经加工机制的研究进展

The Progress of Chinese Intonation Acquisition and Neural Processing Mechanism in Children

涂顺顺^{1,2} 肖永涛¹ 陈伟民² 胡林燕² 沈新佳² 葛佳乐² 张蓓华²

TU Shun-shun, XIAO Yong-tao, CHEN Wei-min, HU Lin-yan, SHEN Xin-jia, GE Jia-le, ZHANG Bei-hua

【摘要】语调作为副语言的一种表现形式,通过音高、速度、强度和响度的配置及其变化,承载着丰富的语义和情感信息,对词汇等语言和认知能力的发展起重要作用,它包括由基频决定的声调,也涵盖受时长影响的句调。对语调加工的神经发育早于言语。本文介绍了汉语普通话声调和句调的声学特征,概述了其感知与产出的发展规律,归纳反映儿童语调习得水平的声学测量参数,以帮助制定儿童早期筛查工具。语调习得水平的表现与其神经处理功能密切相关,本文整理了语调的神经机制假说及加工中枢的相关研究,为通过电生理学或脑功能影像学对风险儿童进行特异性脑区早期筛查提供参考。

【关键词】声调;句调;声学特征;发育规律;神经加工

【中图分类号】G762 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1672-4933(2024)06-0588-05

【Abstract】 Intonation, as a form of expression of paralinguistic, carries rich semantic and emotional information through the configuration and change of phonetic pitch, duration and intensity and so on, and plays an important role in the development of children's language and cognitive ability, such as vocabulary. It includes both lexical tone determined mainly by the base frequency and sentences tone mainly affected by the duration. The neural development of intonation processing is earlier than speech, so this paper preliminarily introduces the acoustic characteristics of Chinese Mandarin lexical tone and sentence tone, summarizes the development rules of their perception and output, and the acoustic measurement parameters reflecting the level of children's intonation acquisition, such as the rate of base frequency change, so as to help develop early childhood screening tools. Because the performance of intonation acquisition level is closely related to its neural processing function, this paper further summarizes the related research of the neural mechanism hypothesis and processing center of intonation, to provide reference for the early screening of specific brain areas of risk children through electrophysiology or brain function imaging, such as mismatch negativity (MMN) and so on.

【Key words】 Lexical tone; Sentence tone; Acoustic Characteristics; Rules of Development; Neural processing

1 引言

语调是语言理解和交流中一种重要的副语言,在功能上可表达情感、语义和调节对话行为,在声学上,其是声音的音高、音强等声学特征随时间变化的总体轮廓表现^[1],是依附在音段成分上的超音段成分。语调包括声调和句调。声调是指词汇(单词、语素、单词或语素的音节)的音高变化,句调是指短语或句子的音高变化^[1]。

人类对副语言加工的神经机制发育早于言语加工^[2],在2~3岁认知语言发育早期,儿童倾向于感知语调声学线索习得新词^[3];大脑对强韵律语调特征句子的神经活动

与儿童的言语沟通表现高度相关^[4]。这意味着语调习得对儿童词汇等语言认知功能发育具有重要意义。语言障碍儿童对超音段信息的产出和感知存在困难^[5]。语言障碍儿童有无意义发音,但不能配合完成口语表达能力测试时,对语调这一重要的副语言进行测试和训练,有利于其词汇等能力的发展。语调的习得有一定年龄依赖性,但目前临床尚缺乏相应的标准化筛选评估工具和教学策略。本文对汉语声调和句调的声学特征进行介绍,总结了其在感知和产出方面的发育规律,归纳了反映儿童语调习得水平相关的声学测量参数,帮助制订儿童早期筛

基金项目:1 国家临床重点专科建设项目(Z15508000004);2 上海市重中之重康复医学研究中心(2023ZZ02027);3 上海市松江区科技(医药卫生领域)攻关项目(22SJKGG37)

作者单位:1 浙江中医药大学 杭州 310000

2 同济大学附属养志康复医院 上海 201600

作者简介:涂顺顺 硕士在读 中级康复治疗师;研究方向:听力与言语康复

通讯作者:张蓓华, E-mail: helley-007@163.com

查工具提供教学策略。

相较于印欧语系等没有声调的句调语言来说,汉语作为一种声调语言,在处理语句时,除了处理句调,还结合声调在音节层面的音高信息对比语义^[6]。声调语言需说话者将声调音高处理为语义和语音信息的特定调谐^[6],因声调和句调在神经加工过程中相互影响,所以儿童在语言加工中常因需要同时控制声调和句调的感知和产出,导致顾此失彼。儿童语调习得水平的表现可能是其神经处理功能的反映,句调处理如何与声调处理重叠和分离。近年来的研究主要致力于声调和句调加工机制的异同和神经相关性。目前对语调神经加工的研究范围较广,研究方法多样,测试任务不一,研究结果也尚未进行系统归纳和转化为临床应用。因此,本文整理了声调和句调神经加工机制相关研究,有助于明确声调和句调特异性加工脑区,归纳电生理学和脑功能影像学上的可靠性指标,为辅助技术对风险儿童进行特异性脑区筛查提供参考,进而实现早期筛查。

2 声调、句调的特性、功能与分类

声调和句调在声学特征表现、音高承载范围、是否涉及语义功能及分类上存在差异。声调是指音节的音高轮廓,主要由基频决定^[7],音高承载范围为音节,含有语义信息;句调是指短语或句子的音高变化^[1],受基频和时长影响,音高承载范围为更大的短语或句子,且不含有语义信息。声调用以区分语音和语义信息表示字音含义;句调是有声语言表达语气意义的必要手段^[1],与人的社交沟通密切相关。

汉语声调有四声,分别为高平T1(阴平)、中升调T2(阳平)、降升调T3(上声)和高降调T4(去声)。在音高轮廓方面,T1为水平调,T2和T3为轮廓调;T1的基频明显高于T2、T3^[7]。句调主要从功能和情绪两个维度进行分类,句调功能包括陈述、疑问、祈使和感叹4种,句调情绪包含高兴、害怕、生气、难过、厌恶^[8]情感句调和一种自然句调。总之,声调和句调具有相近的声学特征,却有不同的语法语义功能。汉语普通话中声调和句调相互影响又协调表现,加大了对其发育规律和神经加工机制研究的困难。

3 儿童汉语语调的感知和产出规律

3.1 儿童汉语声调的感知和产出

每个声调有其独特的音高轮廓变化,不同声调之间的声学特征存在差异。有学者利用四声调不同的声学特征设计音位对,对儿童开展汉语声调感知和产出与发育年龄关系的探究。常见的音位对有T1/T3、T2/T3等。

在声调感知方面,Tsao^[9]发现6~12月龄婴儿区分T1/T3的对比度比T2/T4及T2/T3更准确;10~12月龄婴儿较6~8月龄婴儿、汉语婴儿较英语婴儿感知T1/T3的音高轮廓更敏感,区别准确性更高^[10]。声调变化会影响2岁儿童的单词识别精度,3岁儿童缺乏声调感知敏感性^[3],较难区别T2/T3^[11]。2~4岁儿童在前注意阶段可区分声学音位信息差异较大的T1/T3,但不能区分偏差小的T2/T3^[12]。4~5岁儿童可识别4个声调^[13],6岁儿童已获得和成人类似的范畴知觉能力,随着年龄发展不断精细化,但7岁儿童尚未达到成年人的敏感程度^[14]。

在声调产出方面,3岁儿童产出声调在音高范围和斜率方面没有达到成人水平,尤其是T3^[15];3~5岁儿童整体声调轮廓与成人接近,5岁时可实现与成人类似的T1,但其他声调差异明显。学龄前儿童在微调其对协调音高范围、坡度和曲率的控制^[16]。声调成熟年龄或更晚,4~11岁儿童能产出调形相互区分的4个声调,但4岁儿童的上声拐点靠后,T4的起首升高不足,7岁儿童声调调形在斜率和曲度上比成人大,9~11岁才趋于稳定^[4]。在习得顺序上,T1和T4的习得比T2和T3早,女童习得总体较男童早,声调较音段成分习得早,是儿童最先稳定的音节成分^[17]。

总之,在音节成分的习得上,声调较音节习得早,T4、T1习得较T2、T3早^[17]。声调产出功能总体随年龄的增长日益完善,除特定声调外,儿童6岁左右声调感知系统发展成熟,9~11岁能在基频变化、声调调形和曲度上近乎成人。可从基频变化、声调调形和曲度上进行声调发育的早期筛查。

3.2 儿童汉语句调的感知和产出

在句调感知方面,儿童3岁时能识别高兴和难过情绪句调,3岁后,生气、中性和害怕句调识别随年龄不断增长,其中,害怕句调最后识别^[18]。4~6岁健听儿童基础情感句调感知已接近成人,感知准确率悲伤>生气>高兴。悲伤情感句调平均基频、基频标准差较小,语速慢,响度低,更易被区分^[19,20]。情感语调识别重要的声学线索是言语的音高、时长(语速)和强度。疑问句感知比陈述句更难^[20]。提示可优先进行高兴的陈述句调识别,学龄后再训练感知害怕句调。

在句调产出方面,3~5岁儿童的情感句调发音较难,5岁左右会出现快速发展阶段且持续到学龄期^[21]。儿童主要利用更多的频率变化改变高兴和难过句调。句调的基频标准差有显著差异^[22]。功能句调上,整句和前分句的基频倾斜率是鉴别儿童句调特征的声学参数。3~5岁儿童产出的命令句调后分句基频倾斜率较成人有较大差异^[23]。4岁时很难通过升高基频和控制时长产出准确的

疑问句调,5岁开始发展陈述和命令句调,7~11岁能成熟地产出基频逐渐上升、句末基频差值最大的疑问句调模式^[4],这可能是较小儿童对声带等控制不佳,优先保持声调目标的准确性而不能兼顾句调的编码所致^[4,24]。与其神经加工机制密切相关,引发了科学界的探讨。

4 汉语语调习得的神经加工机制

目前,对语音在大脑中的半球处理主要有声学假说和功能假说2种基础假说。声学假说认为大脑依据声音物理属性处理语音,左、右两侧大脑半球分别处理以时间、频率变化为主的声音。功能假说则认为大脑依据语言功能处理语音,如左右半球分别处理语言、音乐。语调同时具有语音、语义功能的表现,其神经加工机制如下。

4.1 汉语声调的神经加工

根据上述假说,声调加工可能因其同时涉及基础音段成分(语义音节,时间变化为主的声学信息)和超音段成分(语音音调,频率变化为主的声学信息),致使不同优势半球加工,引发了声调感知的偏侧化争论。2个半球都普遍参与,半球的相对贡献取决于与声调感知进行比较的控制任务。罗昊^[25]通过失匹配负波(mismatch negativity, MMN)对辅音和声调在听觉认知前意识及意识阶段的对比研究,提出2级听觉认知模型:意识前阶段右脑依据听觉输入的声学特性处理汉语声调,意识阶段则左脑依据听觉输入的语义功能进行加工。孙琪^[26]用MMN考察了成人和幼儿在前注意加工阶段对汉语声调的辨别加工,发现幼儿主要表现为大脑右半球的加工优势,成人则相反,到幼儿4岁时,与成人类似的MMN才被可靠地发现,而较小的婴幼儿中则观察到正失配反应(positive mismatch response, P-MMR)。为声调评估提供参考。

双侧额颞叶^[27]和颞顶叶区域^[28]反映声调的语音和语义处理。双侧背侧喉运动皮层(dorsal laryngeal motor cortex, dLMC)参与了声调和辅音的感知,并在说话和唱歌时通过控制喉部声带的张力和收展运动调节声调和发声^[29]。提示对双侧额颞叶、颞顶叶区和dLMC进行辅助技术检测,有利于筛查早期声调障碍。

4.2 汉语句调的神经加工

对句调的神经加工研究主要聚焦于情绪情感表达功能和句法功能加工。为剔除语义干扰,有学者^[30]利用符合语法结构的伪句进行探究。Zhang^[31]对成人句调加工的研究发现,颞上皮层(superior temporal cortex, STC),尤其是颞上回(superior temporal gyrus, STG)的右中后部,在解码情绪句调的表达中起重要作用。高级中枢颞叶皮层能区分不同情绪类别的句调,相对于消极情绪句调(恐

惧和愤怒),积极句调(快乐)更易激活额下回(inferior frontal gyrus, IFG)左中部和额叶眼区,快乐句调在左IFG和左角回中引起更大的激活。愤怒、恐惧、快乐句调加工的特异性脑区分别位于左侧眶额叶、右侧缘上回(supra marginal gyrus, SMG)和左侧IFG,其中右侧SMG脑区同时受情绪和任务的调控;且右侧STC,包含颞中回(middle temporal gyrus, MTG)、STG等,以及右侧SMG在辨别情绪句调任务中起重要作用^[30]。此外,杏仁核参与情感韵律感知和理解的高级加工^[32]。于泽^[33]从电生理相关参数反应角度对前人的研究进行总结,失匹配负波(MMN)、右前负波(right anterior negativity, RAN)、早期负波(enrly negativity, EN)、中止正移波(closure positive shift, CPS)、P800、P600分别与句调自动化加工敏感性、句子句调、音高F₀轮廓条件、句调短语声学边界、违反语法与信息匹配、修正句调曲线相关^[32];MMN是句调加工的可靠神经生理学指标^[33]。

Zhang^[34,35]对新生儿研究发现,右颞叶皮层(主要位于MTG和STG)相对于中性句调表现出对情绪的增强反应,但相对于快乐和中性韵律,右顶叶区域(位于SMG)表现出对恐惧的高度敏感性,结果与成人相似。Yuebo^[4]对儿童汉语强弱句调特征影响进行探究,发现强句调特征能引起更广泛的右侧化皮质反应。左右STG和MTG,右初级皮质和关联皮层均参与加工,其中,右MTG在加工时长和强反应性上有轻微显著敏感性,支持声学假说。验证了儿童强句调韵律特征的神经敏感性可预测儿童的言语沟通能力发展,启示强句调声学特征信息或能帮助特殊儿童进行干预^[4]。

国内对儿童情绪句调的加工有限,国外则相对成熟。句调仅含有音高轮廓的声学信息,不涉及语义,不同语言神经加工具有一定相似性,故而借鉴国外相关研究进行总结。Homac等^[36-38]对3月龄和10月龄婴儿进行韵律句调加工系列实验发现,3个月大的婴儿在额叶、颞叶和颞顶叶区域表现出双侧激活;10个月大婴儿的右侧STG表现出更突出的激活,出现在了成年受试者中观察到的额外处理。推测10月龄婴儿已初步建立对本国情绪句调的神经加工机制,其加工过程是先分析音高信息,再整合言语信息,不熟悉的音高信息更易额外激活皮层。Belin^[39]对7月龄婴儿研究发现,右后颞叶皮层对愤怒表现出更强的激活,右IFG对快乐表现出更大的反应,4~7个月是婴儿大脑语音处理发展的关键时期。总之,包括额叶和颞叶在内的广泛脑网络是句调处理的重要脑基础,STG和IFG最为重要。

4.3 汉语声调和句调神经加工的比较研究分析

汉语句调包含一定声调信息,句调的音高信息变化

受声调影响,既有局部变化,也有整体变化。句调的语言功能优势不如声调,但句调和声调间存在音高线索重叠,其在听觉语音加工过程中既相互影响又协同处理^[6],致使加工脑区的重叠和分离。有学者利用音高轮廓区别度大的声调(T2/T4)结合功能句调(疑问/陈述)设计实验对汉语声调和句调的神经加工进行比较研究。语言负荷较大的声调加工主要发生在左半球,句调则有一定程度的右脑偏侧化,同时句调包含一定声调信息,出现双侧激活特点。附着在二声调后面的疑问句调不能诱发明显的MMN,推测其句调的音高信息被二声调音高信息掩蔽^[40]。无语义的二声调后疑问句调加工主要在左半球额部^[41]。研究结果的差异表明,句调的神经加工同时受声调和词义影响,机制复杂。MMN对不含复杂语言功能的音高变化信息加工更敏感^[41],有助于早期筛查量表的测试语料选择。Chien^[6,42]增加性别分类做控制任务对汉语和德语儿童进行对比研究,发现在左额顶、右额叶和双侧扣带颞盖区域的语调神经处理中,有很大跨语言共性;这些领域分别与一般语音、特定韵律句调和受控分类决策过程相关。汉语使用者的双侧额颞枕叶和皮质下区域引起的额外活动,可能与汉语声调的语义处理有关^[6]。声调和句调加工存在左额顶叶区域重叠,包括IFG和SMG;和右额叶区域分离。这表明音高轮廓的处理主要在左IFG,而句调比声调更强烈地涉及右IFG,可能反映特异性句调分类评估处理^[6]。采用模糊/清晰刺激的音频变形范式对其进一步探究,发现清晰>模糊声调、句调刺激时,双侧额颞区更强的受累^[42]。在声调方面,活动仅限于双侧颞区,反映了颞区涉及音调类别的听觉(音素)表征。在句调方面,双侧额颞叶活动和左侧IFG和双侧颞区之间的功能连接增加,说明对句调类别的听觉感知与高阶语音过程之间存在动态相互作用。在清晰句调和声调刺激时,双侧IFG和运动前区间也发现功能耦合增加,反映了言语运动计划;而右侧IFG和颞区之间的功能连接没有增加,说明左右IFG在语调处理中存在细微的功能差异^[42]。

结合对声调和句调的对比研究,总结声调的语音语义处理主要和双侧额颞叶^[27]、颞顶叶区域^[28]和dLMC有关,在句调的整体加工中额颞枕叶参与声调的语义处理。句调核心加工中枢主要有:①IFG(音高轮廓感知、情感/功能句调分类评估处理和整合);②杏仁核(情绪句调加工高级脑区);③眶额皮层(快乐、愤怒等的外显任务);④右STC(解码情绪句调);⑤SMG(恐惧句调和任务调整加工);⑥初级和次级听觉皮层(对音高轮廓特征的感知)。对儿童进行相应的任务测试,用辅助技术对重点脑区进行检测的手段或能在未来实现儿童早期语调障碍的筛查。

5 总结和展望

本文从声调和句调两个维度归纳整理了汉语儿童语调感知和产出规律。儿童6个月开始感知T1/T3差异^[9],到6岁完善声调系统^[13];4~6岁句调感知能力接近成人,而9~11岁句调产出才趋于稳定^[4]。整体语调发育感知在前,产出在后,且声调较句调更早习得。3岁前儿童倾向于感知频率变化范围大的声调线索习得新词,而3岁后更倾向于感知元音的变化^[3],启示家长在婴幼儿期(尤其是3岁前)应多用音高变化的声学信息帮助儿童感知声调和学习新词。在声调和句调产出上,儿童通过控制音高范围、坡度和曲率微调其语调,提示可以从基频变化、声调调形和曲度上评估儿童产出语调的准确度。

本文整理归纳了汉语声调和句调神经加工机制的相关研究。尽管众多国内外研究应用电生理和影像学等辅助技术对声调和句调信息加工机制进行探究,但结论并不尽相同,可能与实验使用语料紧密相关。排除音段语义信息及认知干扰,婴幼儿左半球MMN或可能是反应语调加工的可靠性生理指标^[26,33,41],MMN的峰值潜伏期、波幅、音调类别与F₀的间隔等对比差异反映了婴幼儿左半球语调加工的障碍,或许是语调加工早期筛查的特异性指标。另一方面,脑功能成像上IFG、杏仁核、STC及低级听觉皮层的广泛激活或也是声调和句调障碍更早期的筛查指标。

目前对语调产出的研究忽略了对相关构音器官的影响探究,采集环甲肌在发四声调时的表面肌电信号提高了在噪声环境下汉语声调识别的准确率^[43]。应用此项新技术可对自然情境下儿童构音器官产出的语调进行评估和完善相关研究。未来需要探索更新技术进一步揭示语调习得的细节和深层机制;深入探讨相关声学特征、电生理学等辅助技术上特异性指标的参考范围;明确相关测试任务,以开发对应的筛查量表并提供教学策略。

参考文献

- [1] Xu Y. Prosody, tone and intonation. In: Katz WF, Assmann PF, eds. The Routledge handbook of phonetics[M]. New York: Routledge, 2019. 314-356.
- [2] 伍可,陈杰,李雯婕,等. 人声加工的神经机制[J]. 心理科学进展, 2020, 28(5): 752-765.
- [3] Ma W, Zhou P, Singh L, et al. Spoken word recognition in young tone language learners: Age-dependent effects of segmental and suprasegmental variation[J]. Cognition, 2017, 159(2): 139-155.
- [4] Chen Y, Luo Q, Liang M, et al. Children's Neural Sensitivity to Prosodic Features of Natural Speech and Its Significance to Speech Development in Cochlear Implanted Children[J]. Frontiers in Neuroscience, 2022, 16(7): 892-894.
- [5] 陈绍艳. 4~11岁儿童的声调和疑问语调语音分析[D]. 中央民族大学

- 学,2020.
- [6] Chien PJ, Friederici AD, Hartwigsen G, et al. Neural correlates of intonation and lexical tone in tonal and non-tonal language speakers[J]. *Human brain map*,2020,41(7): 1842-1858.
- [7] 周晓琴.汉语普通话单音节词声调识别分析[D].南方医科大学,2009.
- [8] 陶仁霞,赵航,刘巧云.双耳双模式助听儿童情感语调感知特征[J].*中国听力语言康复科学杂志*,2021,19(2):133-136.
- [9] Tsao FM. The effect of acoustical similarity on lexical-tone perception of one-year-old Mandarin-learning infants[J]. *Chin. J. Psychol*,2008, 50(2):111-124.
- [10] Tsao FM. Perceptual improvement of lexical tones in infants: effects of tone language experience[J]. *Frontiers in psychology*, 2017, 8(5): 558-558.
- [11] Wong P, Schwartz RG, Jenkins JJ. Perception and production of lexical tones by 3-year-old, Mandarin-speaking children[J]. *Speech Lang Hear Res*, 2005,48(5):1065-1079.
- [12] 杨婉晴,肖容,梁丹丹.2~4岁普通话儿童前注意阶段的声调感知机制[J].*心理学报*,2020,52(6):730-741.
- [13] Zheng Y, Meng ZL, Wang K, et al. Development of the Mandarin early speech perception test: children with normal hearing and the effects of dialect exposure[J]. *Ear and Hearing*, 2009, 30(5): 600-612.
- [14] 席洁,姜薇,张林军,等.汉语语音范畴性知觉及其发展[J].*心理学报*, 2009,41(7):572-579.
- [15] Wong P. Acoustic characteristics of three-year-olds' correct and incorrect monosyllabic Mandarin lexical tone productions[J].*Journal of Phonetics*,2012,40(1):141-151.
- [16] Xu Rattanasone N, Tang P, Yuen I, et al. Five-year-olds' acoustic realization of Mandarin tone sandhi and lexical tones in context are not yet fully adult-like[J].*Frontiers in psychology*, 2018, 9(5): 817-817.
- [17] 张涣.南方汉语儿童双音节词声调习得的研究[D].湖南大学,2015.
- [18] 王异芳,苏彦捷,何曲枝.3~5岁儿童基于声音线索的情绪知觉[J].*心理学报*,2012,44(11):1472-1478.
- [19] 许文飞.人工耳蜗植入儿童情感韵律感知特征及干预策略研究[D].华东师范大学,2019.
- [20] 韩秀华,张磊,肖竟.4~6岁听障和健听儿童语调感知的比较研究[J].*听力学及言语疾病杂志*,2020,28(2):138-141.
- [21] 张芳,晁欣,黄露,等.学龄前人工耳蜗植入儿童与健听儿童情感语调发音的分析研究[J].*中国听力语言康复科学杂志*,2020,18(5): 402-404.
- [22] 张芳,黄露,晁欣,等.3~5岁听障与健听儿童情感语调发音的声学特征研究[J].*听力学及言语疾病杂志*,2021,29(2):146-150.
- [23] 丁迎春.健听与听障儿童语调声学特征的比较研究[D].华东师范大学,2011.
- [24] 杨金梅.人工耳蜗植入儿童情感韵律产出特征及干预策略研究[D].华东师范大学,2020.
- [25] 罗昊.听觉系统自动加工汉语声调和辅音时的大脑半球优势[D].中国科学技术大学,2007.
- [26] 孙琪.汉语声调加工的ERP研究[D].辽宁师范大学,2016.
- [27] Kwok VPY, Dan G, Yakpo K, et al. A meta-analytic study of the neural systems for auditory processing of lexical tones[J]. *Frontiers in human neuroscience*,2017,11(7):375-375.
- [28] Gandour J, Wong D, Dziedzic M, et al. A cross-linguistic fMRI study of perception of intonation and emotion in Chinese[J]. *Human Brain Mapping*,2003,18(3):149-157.
- [29] Liang B, Li Y, Zhao W, et al. Bilateral human laryngeal motor cortex in perceptual decision of lexical tone and voicing of consonant[J]. *Nature Communications*,2023,14(1):4710.
- [30] 雷震,毕蓉,莫李澄,等.外显和内隐情绪韵律加工的脑机制:近红外成像研究[J].*心理学报*,2021,53(1):15-25.
- [31] Zhang D, Zhou Y, Yuan J. Speech prosodies of different emotional categories activate different brain regions in adult cortex: an fNIRS study[J]. *Scientific reports*, 2018, 8(1): 218-218.
- [32] Frühholz S, Hofstetter C, Cristinzio C, et al. Asymmetrical effects of unilateral right or left amygdala damage on auditory cortical processing of vocal emotions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(5):1583-1588.
- [33] 于泽,任桂琴.韵律加工的事件相关电位研究[J].*辽宁师范大学学报*, 2012,35(20):201-205.
- [34] Zhang D, Zhou Y, Hou X, et al. Discrimination of emotional prosodies in human neonates: A pilot fNIRS study[J]. *Neuroscience letters*, 2017, 658(9): 62-66.
- [35] Zhang D, Chen Y, Hou X, et al. Near-infrared spectroscopy reveals neural perception of vocal emotions in human neonates[J]. *Human Brain Map*,2019,40(8): 2434-2448.
- [36] Homae F, Watanabe H, Nakano T, et al. The right hemisphere of sleeping infant perceives sentential prosody[J]. *Neuroscience research*, 2006, 54(4): 276-280.
- [37] Homae F, Watanabe H, Nakano T, et al. Prosodic processing in the developing brain[J]. *Neuroscience research*, 2007, 59(1): 29-39.
- [38] Homae F, Watanabe H, Nakano T, et al. Large-scale brain networks underlying language acquisition in early infancy[J]. *Frontiers in psychology*, 2011,2(5):93-93.
- [39] Belin P, Grosbras MH. Before speech: cerebral voice processing in infants[J]. *Neuron*, 2010, 65(6): 733-735.
- [40] 齐佳凝.汉语口语韵律早期控制加工的脑机制[D].辽宁师范大学, 2015.
- [41] 王梦如.汉语二声疑问词语调加工的ERP研究[D].辽宁师范大学, 2019.
- [42] Chien PJ, Friederici AD, Hartwigsen G, et al. Intonation processing increases task-specific fronto-temporal connectivity in tonal language speakers[J].*Human brain mapping*,2021,42(1):161-174.
- [43] 杜月山,彭佩瑶,韦峻峰.基于表面肌电信号的汉语单元音声调识别[J].*数字技术与应用*,2023,41(8):1-4.

收稿日期 2023-10-16

责任编辑 薛静