

语音治疗对非综合征型唇腭裂言语障碍患者大脑神经网络影响的研究进展

翟羽翔¹ 陈仁吉²

¹遵义医科大学附属口腔医院口腔美容与整形外科,遵义 563000; ²首都医科大学附属北京口腔医院口腔颌面整形创伤外科,北京 100050
通信作者:陈仁吉,Email:chenrenji@126.com

【摘要】 唇腭裂(CL/P)是最常见的颅颌面畸形之一。腭裂给患者带来的主要影响是言语障碍,而语音治疗是解决腭裂术后的言语障碍的主要方法。近年来,语音治疗对CL/P言语障碍患者脑区会产生什么样的影响成为人们关注的问题。目前研究发现,通过功能性磁共振成像(fMRI)检查可发现CL/P言语障碍患者的有关脑区结构及功能会发生改变。研究语音治疗对CL/P言语障碍患者的大脑神经网络是否有影响对临床治疗具有较大指导意义,本文就语音治疗对CL/P言语障碍患者脑区影响的fMRI研究现状及进展进行综述。

【关键词】 功能性磁共振成像; 非综合征型唇腭裂; 语音治疗; 言语障碍; 脑神经网络

基金项目:贵州省科技计划(黔科合基础-ZK[2022]一般635)

引用著录格式:翟羽翔,陈仁吉.语音治疗对非综合征型唇腭裂言语障碍患者大脑神经网络影响的研究进展[J/OL].中华口腔医学研究杂志(电子版),2025,19(6):418-423.

DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2025.06.011

Research progress on the impact of speech therapy on brain neural networks in patients with speech disorders due to non-syndromic cleft lip and palate

Zhai Yuxiang¹, Chen Renji²

¹Department of Oral and Maxillofacial Plastic Surgery, Hospital of Stomatology, Zunyi Medical University, Zunyi 563000, China; ²Department of Oral & Maxillofacial Plastic & Trauma Surgery, Beijing Stomatological Hospital Affiliated to Capital Medical University, Beijing 100050, China

Corresponding author: Chen Renji, Email: chenrenji@126.com

【Abstract】 Cleft lip and palate (CL/P) is one of the most common craniofacial deformities. The main impact of cleft palate on patients is speech disorders, and speech therapy is the main method to solve speech disorders after cleft palate surgery. In recent years, the impact of speech therapy on the brain regions of CL/P speech disorder patients has become a concern. Current research has found that through functional magnetic resonance imaging (fMRI) examination, changes in the structure and function of the relevant brain regions of CL/P

speech disorder patients have been observed. Therefore, whether speech therapy has an impact on the brain neural network of CL/P speech disorder patients has great significance for guiding clinical treatment. This article reviews the current status and progress of fMRI research on the impact of speech therapy on brain regions of patients with CL/P speech disorders.

【Key words】 Functional magnetic resonance imaging; Non-syndromic cleft lip and palate; Speech therapy; Speech disorder; Brain neural network

Fund program: Science and Technology Planning Project of Guizhou Province (Qiankehejichu-ZK [2022] General 635)

DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2025.06.011

唇腭裂(cleft lip or palate, CL/P)是最为常见的颌面部畸形之一,具有显著的种族和地理差异。亚洲和美洲印第安人的患病率最高,达到1/500^[1],我国CL/P的发生率约为1.82%,已成为发病率最高的先天性畸形之一。从遗传学角度,CL/P可分为非综合征型唇腭裂(non-syndromic cleft lip and palate, NSCL/P)和综合征型唇腭裂,其中NSCL/P占据了大多数病例。

语言是人类社会沟通的核心工具,也是大脑高级认知功能的重要体现。进行语言表达时,大脑需要处理复杂的神经活动,涉及多个语言功能区的协调工作。CL/P患儿可能出现喂养困难、传导性听力损害、言语问题和牙齿异常等,甚至出现相关的社会和心理问题,其中最主要的问题是语音障碍。CL/P言语障碍主要由腭裂的解剖学缺陷引起发音器官的功能不全所致,进而影响发音的准确性和流利性。语音治疗作为一种有效的治疗手段,已经成为改善腭裂患者言语功能的主要方式之一。然而,语音治疗改善患者语音功能的机制目前没有明确结论。因此,对腭裂术后语音障碍患者脑区结构、功能甚至神经网络的影响的研究已成为该领域一个重要课题。

一、语音治疗对腭裂患者的重要意义

腭裂患者主要表现为腭部裂隙、腭咽闭合不全和听觉感知功能异常等,这些因素往往会导致器质性构音障碍^[2-3]。所以,这会直接影响患者的发音质量,并且在部分患者中可能导致代偿性不良发音习惯的形成。这些代偿性语音错误,

即便腭咽结构和闭合功能得到矫正后,仍然可能持续存在,进而使患者的言语障碍无法完全消除。因此,语音治疗成为矫正这些不良发音习惯的关键手段。

语音治疗是针对由于生理、神经和心理等因素引发的言语或语言障碍进行专业干预的过程,通过视觉、听觉和肌肉运动感觉等多感官手段,帮助患者掌握正确的发音位置和气流流动的方向。通过运动学习和运动记忆的原理,患者将通过反复练习和强化逐步形成稳定的发音模式,进而纠正原本错误的发音并提升语音的清晰度。Alighieri等^[4]对CL/P患儿开展了不同强度的语言治疗,其结果显示,高强度语言干预治疗(即5次/周,1 h/次,疗程2周)比低强度(即1次/周,1 h/次,疗程10周)更有利于改善患儿语音清晰度及语言可理解度,强化语音治疗可在短期内利于患儿语言恢复。腭裂缺陷使得言语的正常发音过程受到阻碍,特别是对“爆破音”(如/p/、/b/、/t/和/d/等)和“擦音”(如/f/、/s/等)的发音。由于这些生理障碍,患者往往表现出发音不清、音调异常和共鸣失衡等问题^[5]。有研究表明,同时对34例学龄期腭裂术后语音障碍患儿、37例学龄期功能性语音障碍患儿及32名健康儿童进行社会能力横断面比较,发现两类语音障碍儿童的活动能力、社交能力及学习情况得分均低于正常儿童,结果提示言语障碍可能是影响其社会功能发展的重要因素^[6]。因此,语音治疗不仅能够纠正语音障碍患者说话时的发音问题,更对他们的社交自信与生活质量提升有着不可忽视的重要作用。

语音治疗的干预方法会根据患者的年龄、治疗阶段及个体差异进行个性化设计,以确保治疗的有效性和针对性。常见的语音治疗方法包括口腔运动训练、发音训练和呼吸控制训练等。口腔运动训练是语音治疗中的一项基础性方法,主要通过一系列的口腔运动来增强发音器官的灵活性和协调性。常见的训练动作包括嘴唇的张合、舌头的伸缩与运动等。对于腭裂患者,通过不断练习,能够增强口腔肌肉的力量和协调性,改善软腭的运动能力,良好的腭咽闭合是奠定清晰发音的基础^[7]。此外,语音的产生与气流的稳定性密切

相关,通过呼吸训练,患者能够改善气息的控制,帮助语音更稳定、更有力^[8]。但是,腭裂术后言语障碍儿童在言语输入和输出表达技能方面的表现比健康对照组差,表现为在执行任务时反应时间较长,且准确性较低,说明言语输入与言语输出能力之间存在着密切的联系,并且语音输出处理中出现的错误可能与CL/P患儿在语音输入处理中面临的困难有关^[9]。所以,腭裂患儿言语障碍的评估和治疗计划应包含与语音输入处理缺陷相关的内容。这表明,语音治疗不仅仅是对NSCL/P言语障碍患者进行简单的语音康复训练,更应该全方位、多角度地进行分析,制定个性化和精准的治疗方案,详细了解大脑神经动态网络变化机制,这样才能帮助患者实现更好的语言功能恢复。

二、功能性磁共振成像在唇腭裂患者大脑中的应用

功能性磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)是一种神经影像学技术,并且是为了显示大脑代谢的区域性结构与功能变化而开发的成像方法^[10]。利用fMRI和个性化数据处理,可了解大脑的重要功能区域结构或功能变化情况,如语言、运动和记忆,并能反映出每个大脑功能网络的具体变化特点,可以辅助研究者认知到更多的大脑神经功能机制^[11]。fMRI在CL/P患者大脑中发挥着极大的作用(图1)。在大脑结构方面,有学者对29例腭裂言语障碍患者进行fMRI研究发现,腭裂言语障碍患者的左侧颞下回、右顶下缘角回和左小脑上部灰质体积减小,右内侧额上回体积增加;左侧额下回岛叶部、右侧脑岛部皮质厚度变薄;右侧半球扣带回峡部折叠系数增大^[12]。这些脑区的形态与结构都与语言密切相关,它们的改变也许表明了与NSCL/P患者特有的言语障碍有关。

在大脑神经机制方面有研究发现,腭裂患者或语言障碍患者在治疗前,Broca区与Wernicke区之间的连接可能存在弱化或障碍,这会导致语言生成困难和理解障碍^[13]。既往研究表明,运用fMRI对24例腭裂术后语音障碍患者、21例腭裂术后语音治疗成功患者及24名健康对照组进行分析,与对照组相比,腭裂术后语音障碍患者在额叶、颞叶和顶叶显

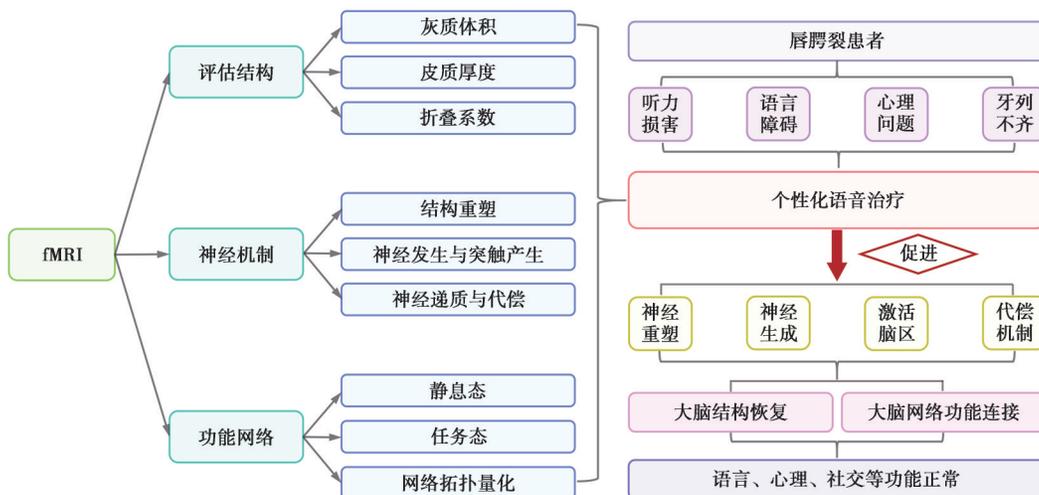


图1 功能性磁共振成像(fMRI)在唇腭裂(CL/P)患者大脑中的应用

示出异常的指标,而语音治疗成功患者在涉及语言、听觉、发音规划和执行功能的区域表现出皮层可塑性,经过治疗介入的患者的皮质可塑性可能是由语音治疗诱导的皮质神经发生引起的^[14]。所以通过fMRI跟踪,能够直观地观察到这些区域的连接性在治疗过程中的变化,显示出治疗后大脑神经连接的恢复或增强^[15]。在治疗初期,患者的脑区可能存在功能性连接障碍,信息传递不畅,这在fMRI图像中表现为某些关键脑区的低激活或异常激活模式。随着治疗的深入,反复的语言任务可以激活语音生成和语言加工的脑区,促使这些区域的神经回路发生重塑,这种重塑不仅限于单个脑区的活跃度变化,还涉及大脑不同区域之间的网络连接改善^[16-17]。fMRI能够揭示这种网络重构过程,表现为语言网络内不同脑区之间连接性的改变,促进语言生成与理解的能力恢复^[18]。

在大脑的网络功能方面,Rao等^[19]就已运用fMRI技术对CLP患儿康复后的脑结构进行研究,采用语言清晰度量表评分与非综合征性唇腭裂患者的拓扑特征进行相关性分析,在涉及高阶语言和社会认知的大脑区域中,发现了局部属性的组间显著差异。而在Cheng等^[20]的研究中,运用fMRI技术发现了CLP患儿与普通儿童大脑区域中与语言相关的大脑区域的结构有所不同,为言语康复儿童NSCLP的神经生物学理解提供了深刻的见解,并提出可能成为评估言语康复的潜在成像生物标志物。因此,有了fMRI在CLP患者治疗中的运用,能最大程度地帮助研究者了解疾病的进展情况,以及评估治疗效果,这对患者、医师和医学技术的发展都有着深远的影响。

数据分析方法方面,fMRI通常采用广义线性模型来分析任务引起的大脑区域的激活状态,它能够识别出与任务相关的脑区,并通过统计分析区分任务引起的激活与噪声信号^[21]。此外,近年来的多模态数据分析方法,如静态功能连接性分析、大脑网络分析等,也逐渐应用于语音治疗研究中,帮助深入理解语言和语音处理的网络机制。

三、语音治疗对大脑神经活动的机制

在神经影像学的视角下,语音治疗的神经原理可以从大脑皮层的重塑和神经通路的再连接来进行解释。神经可塑性是指大脑神经系统根据外界刺激、伤害、学习或经验变化的能力,它包括两个方面:功能性可塑性(功能重组)和结构性可塑性(神经回路的重塑)^[22]。功能性可塑性是指大脑在受到语音训练刺激后,脑区的活动模式发生变化,如特定区域的激活增加或模式恢复。而结构性可塑性则可能导致大脑结构上的改变,如新的神经元生成、突触连接的增强等^[23]。

神经可塑性在语音治疗的康复中起着关键作用,其涉及多种神经生物学过程^[24]。首先是突触可塑性,即突触连接的强度和效率可以因重复的学习和记忆任务而发生改变^[25]。当2个神经元在治疗任务中频繁、同步激活时(如听觉输入“苹果”与视觉看到“苹果”时激活相关神经元),它们之间的突触连接会增强。这意味着信号传递效率提高,未来激活这

个通路更容易、更快。这主要涉及突触后膜上谷氨酸受体,如 α -氨基-3-羟基-5-甲基-4-异恶唑丙酸(alpha-amino-3-hydroxy-5-methyl-4-isoxazolepropionic acid, AMPA)受体的数量增加和功能增强,以及相关的分子信号通路(如钙离子内流、激酶激活)。相反,那些在正确执行任务中不活跃或导致错误反应的神经连接会被削弱。这有助于抑制不正确的发音模式或词汇联想,使正确的通路更加突出。

其次是神经生成,即在特定脑区或神经网络中,尤其是成人大脑中,新的神经元可以在某些区域生成并与其他神经元连接,弥补受损的功能区域^[26]。第一,语音治疗通过特定的语言训练刺激,可以促进这些过程的发生。例如,NSCLP患者在治疗过程中,通过反复练习特定的发音动作和口腔运动,逐渐将这些动作转化为长时记忆,其不仅提高了NSCLP患者的语言能力,还为神经网络的重构提供了动力^[27]。第二,语音治疗通过持续的言语刺激和训练,可以启动代偿性神经机制,即非传统的神经通路被激活,弥补受损的语言区域^[28]。这些代偿性通路主要位于大脑的其他区域,这些区域通常不直接与语言功能相关,而它们能够承担部分语言功能,如情感调节区、运动控制区等。通过神经可塑性的作用,这些区域能够在语音产生过程中发挥作用,从而帮助患者恢复部分语言能力。

此外,语音运动轨迹在大脑语音视觉、听觉和运动皮层上有编码,再次揭示了语音产生的神经机制^[29]。语音治疗往往利用多种感官反馈(视觉反馈、听觉反馈和运动反馈等),这些反馈机制在治疗中起到了关键作用。通过视觉反馈(如镜像训练)和听觉反馈(如发音回声)等方式,患者能够即时调整自己的发音和语音生成过程。这时,Broca区通过其下游神经通路与运动皮层、听觉皮层等区域相互作用,协同完成发音的控制和语音的理解^[30-31]。在这种多维反馈的帮助下,患者能够更精准地调整气流控制、舌头和嘴唇的位置,进而帮助大脑形成新的神经联结。

四、语音治疗对非综合征性唇腭裂患者大脑的影响

语音治疗是CLP患者康复的核心环节,实质上是在“训练大脑”,其价值不仅在于提高言语清晰度,更多的是引导大脑进行深刻学习与功能重塑的过程,对CLP患者的神经发育和长期社会适应能力具有深远意义。随着神经影像学技术的发展,研究者们正从大脑结构变化深入探索语音治疗如何重塑CLP患者的大脑网络(表1)。既往研究已观察到治疗可能优化运动皮层、听觉皮层等经典语言区的功能连接^[36]。然而,CLP患者在语言任务中表现出的独特行为模式(如反应速度差异)背后的特定神经机制,尤其是涉及记忆与学习的关键脑区(如海马体)是否参与代偿,仍是亟待阐明的问题。正是在此背景下,Zhang等^[37]通过汉字隐匿任务探索CLP的大脑激活,两组受试者分别是腭裂成形术后接受言语训练的成年人及和年龄、性别匹配的对照组,与对照组相比,CLP患者对目标的反应明显更慢,而两组之间的准确性没有显著差异,CLP患者左半球的海马体显著激活,结果表明,海马可能参与了CLP患者的语言相关神经网络,并发

表1 功能性磁共振(fMRI)与语音治疗在唇腭裂(CL/P)领域中的代表性研究

作者	发表年份	概况	研究人群	干预方式	研究方法	主要发现
张文婧等 ^[12]	2022年	探讨 NSCL/P 儿童的脑灰质结构形态学变化	NSCL/P 儿童, 正常健康儿童	无	VBM、SBM 测量方法, 分析大脑结构差异	NSCL/P 患者与言语相关脑区灰质形态学异常可能与 CL/P 特有的腭裂言语障碍有关
Li 等 ^[14]	2020年	探讨 NSCL/P 成人语音治疗后的脑形态变化	NSCL/P 成人语音治疗前与治疗后的健康对照组	语音治疗	VBM、SBM 测量方法, 分析大脑结构差异	语音治疗后诱导了皮质神经的可塑性, 这可能反映了语音治疗期间潜在的神经机制
Wang 等 ^[32]	2022年	探讨了 NSCL/P 儿童在言语治疗后的脑部结构变化	NSCL/P 儿童语音治疗后, 健康对照组	语音治疗	SBM 分析	语言相关脑区结构损伤可能是 NSCL/P 患儿语音治疗后仍出现言语障碍的神经机制
程华等 ^[33]	2022年	探讨 NSCL/P 患儿在术后和语音治疗后静息状态脑功能模式	NSCL/P 儿童腭裂术后及语音治疗后, 健康对照组	语音治疗	静息态分析	语音治疗后的 NSCL/P 患儿静息态自发性神经元活动及其协调性仍未达到正常水平
司迁等 ^[34]	2022年	研究语音治疗改变 CL/P 患者静息态脑网络的时间动态功能连接的脑机制	NSCL/P 儿童未行语音治疗, NSCL/P 语音治疗后	语音治疗	静息态 fMRI, 通过独立成分分析进行动态功能网络连接	CL/P 患者动态脑网络之间功能连接的恢复和时间特性的改变为语音治疗的脑机制提供了客观解释
Sun 等 ^[35]	2022年	研究语音治疗对 CL/P 患者大脑激活、功能连接及有效连接方面的差异	NSCL/P 成人语音治疗前与治疗后的健康对照组	语音治疗	静息态分析	语音治疗促进了与发音相关的脑网络的任务相关激活, 揭示了 CL/P 中有效发音训练的神经相关性

注: NSCL/P 为非综合征型唇腭裂; VBM 为基于体素的形态测量学; SBM 为基于表面积形态测量学。

挥了发音检索的作用, 帮助 CL/P 患者有效地完成发音。原因可能是语言学习属于程序性学习, 这是一种无意识的学习过程, 涉及一系列动作或者感知处理功能, 比如学习骑自行车、开车等, 通过重复学习可以提高速度和准确性。

大脑神经可塑性理论指出, 特定的训练能够诱导大脑结构和功能的适应性改变。在 CL/P 康复领域, 语音治疗作为一种强化的、程序化的干预, 理论上应能重塑与言语产生和感知相关的神经网络。为了实证检验语音治疗诱导的神经可塑性, 并揭示其具体表现形式, Sun 等^[35]研究了经过手术后及语音训练后的 NSCL/P 患者在阅读任务中, 语音训练后 NSCL/P 患者的小脑、扣带回、中央前回及海马旁回被显著激活, 而未经语音训练的 NSCL/P 患者未发现激活; 在默读任务中, 语音训练后 NSCL/P 患者的小脑、岛叶呈显著激活, 未经语音训练的 NSCL/P 患者的中央前回、额上回被激活。说明通过成功的语音训练, NSCL/P 患者在发音过程中的大脑激活恢复到与常人相当的水平, 明显高于未经训练 NSCL/P 患者; 并且, NSCL/P 患者大脑的激活和网络效率都得到了系统的改善。fMRI 能够定量评估这种作用的变化, 反映出语言能力恢复的程度。具体而言, 随着语音治疗的持续, 患者大脑中与语言处理相关的区域逐渐显示出更加一致的激活模式。在治疗前, 可能由于功能性障碍, 患者的大脑语言网络在激活模式上存在不协调, 表现为某些区域的过度或不足激活。而治疗后, 经过一段时间的语音训练, 患者的大脑语言区域呈现出更加平衡和协调的活动模式。

既往利用静息态功能磁共振成像(resting state functional magnetic resonance imaging, rs-fMRI)研究 CL/P 患者脑网络,

多聚焦于静态功能连接, 反映的是扫描期间平均化的连接强度。然而, 大脑功能连接本质上是动态变化的, 其时间特性(如状态切换频率、驻留时间和连接强度波动)可能蕴含更丰富的病理信息和康复机制线索。理解 CL/P 患者脑网络在时间维度上的异常, 及其如何随言语康复而改变, 对于揭示训练诱导神经重塑的动态过程至关重要^[32]。为此, 有研究者通过独立成分分析进行动态功能网络连接, 比较完成语音治疗与未行语音治疗 CL/P 患者脑网络及动态时间特性的组间差异, 发现 CL/P 患者动态脑网络之间功能连接的恢复和时间特性的改变为言语康复训练的脑机制提供了客观解释, 并为进一步评判患者言语康复情况提供了参考^[34]。

神经影像学研究(如 fMRI)表明, 构音障碍患者其语言相关脑区(如 Broca 区、运动皮层和海马体等)常存在代偿性激活或功能低效^[38]。通过系统性语音治疗, 患者大脑表现出显著的可塑性变化: 在任务态下, 训练后患者的小脑、扣带回和海马旁回等区域激活增强, 且模式趋于接近常人水平; 动态功能网络分析进一步揭示, 治疗后脑网络间连接的协调性、稳定性及状态转换效率显著提升。这些改变印证了语音治疗通过强化听觉反馈、优化运动控制与发音检索, 驱动神经环路重组, 最终提升语言处理的整体效率。此外, 海马体等非典型语言区的参与, 暗示了程序性学习机制在发音自动化中的关键作用^[39]。综合而言, 语音治疗实质是“神经再教育”的过程——它定量可测地改善大脑语言网络的激活模式与动态功能整合, 不仅为康复机制提供客观神经依据, 也为评估疗效和制定个性化干预策略开辟了新视角。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] Dixon MJ, Marazita ML, Beaty TH, et al. Cleft lip and palate: Understanding genetic and environmental influences[J]. *Nat Rev Genet*, 2011, 12(3):167-178. DOI:10.1038/nrg2933.
- [2] Jørgensen LD, Willadsen E. Longitudinal study of the development of obstructive correctness from ages 3 to 5 years in 108 Danish children with unilateral cleft lip and palate: A sub-study within a multicentre randomized controlled trial[J]. *Int J Lang Commun Disord*, 2020, 55(1):121-135. DOI:10.1111/1460-6984.12508.
- [3] Malmenholt A, McAllister A, Lohmander A. Orofacial function, articulation proficiency, and intelligibility in 5-year-old children born with cleft lip and palate[J]. *Cleft Palate Craniofac J*, 2019, 56(3):321-330. DOI:10.1177/1055665618783154.
- [4] Alighieri C, van Lierde K, de Caesemaeker AS, et al. Is High-intensity speech intervention better? A comparison of high-intensity intervention versus low-intensity intervention in children with a cleft palate[J]. *J Speech Lang Hear Res*, 2021, 64(9):3398-3415. DOI:10.1044/2021_JSLHR-21-00189.
- [5] Lien KM, Scherer NJ, Cordero KN, et al. Speech production errors in children with cleft palate with or without cleft lip[J]. *J Speech Lang Hear Res*, 2023, 66(3):849-862. DOI:10.1044/2022_JSLHR-22-00264.
- [6] 林思帆, 马思维, 黄淇, 等. 关于腭裂语音障碍和功能性语音障碍儿童社会能力的横断面研究[J]. *口腔医学*, 2024, 44(11):837-840+855. DOI:10.13591/j.cnki.kqyx.2024.11.007.
- [7] 韩源, 汪彬昺, 李盛, 等. 一种以治疗方式为导向的腭裂相关语音障碍的分型系统: 基于347例患者的回顾研究[J]. *口腔医学*, 2022, 42(4):332-338. DOI:10.13591/j.cnki.kqyx.2022.04.010.
- [8] Barone NA, Ludlow CL, Tellis CM. Acoustic and aerodynamic comparisons of voice qualities produced after voice training[J]. *J Voice*, 2021, 35(1):157.e11-157.e21. DOI:10.1016/j.jvoice.2019.07.011.
- [9] Yang L, Mu Y, Zhai Y, et al. Impaired speech input and output processing abilities in children with cleft palate speech disorder[J]. *Int J Lang Commun Disord*, 2024, 59(5):1906-1922. DOI:10.1111/1460-6984.13037.
- [10] 杜小霞, 秦朝霞. 磁共振功能成像回顾与展望[J]. *磁共振成像*, 2019, 10(10):721-726. DOI:10.12015/issn.1674-8034.2019.10.001.
- [11] 冯芹, 白岩, 陈翰林, 等. 扩散张量成像和功能MRI在帕金森病脚桥核网络连接中的应用前景[J]. *磁共振成像*, 2021, 12(5):96-98+106. DOI:10.12015/issn.1674-8034.2021.05.023.
- [12] 张文婧, 赵翠, 李春林, 等. 腭裂言语障碍儿童语言相关脑区灰质形态学分析[J]. *中华口腔医学杂志*, 2022, 57(9):899-906. DOI:10.3760/cma.j.cn112144-20220705-00365.
- [13] Junès FV, Barragán E, Alvarez D, et al. Wernicke's area and Broca's area in functional connectivity of language[J]. *AIP Conf Proc*, 2019, 2090(1):040012. DOI:10.1063/1.5095915.
- [14] Li Z, Zhang W, Li C, et al. Articulation rehabilitation induces cortical plasticity in adults with non-syndromic cleft lip and palate[J]. *Aging (Albany NY)*, 2020, 12(13):13147-13159. DOI:10.18632/aging.103402.
- [15] Klingbeil J, Wawrzyniak M, Stockert A, et al. Resting-state functional connectivity: An emerging method for the study of language networks in post-stroke aphasia[J]. *Brain Cogn*, 2019, 131:22-33. DOI:10.1016/j.bandc.2017.08.005.
- [16] Shklovskij VM, Alferova VV, Ivanova EG, et al. Regression of post-stroke aphasia and associated non-speech syndromes caused by a course of restorative treatment including intensive speech therapy[J]. *Zh Nevrol Psikhiatr Im S S Korsakova*, 2018, 118(11):20-29. DOI:10.17116/jnevro20181181120.
- [17] 于可, 张超, 徐凯. 卒中后失语症治疗前后功能磁共振研究进展[J]. *磁共振成像*, 2020, 11(10):937-939. DOI:10.12015/issn.1674-8034.2020.10.026.
- [18] Simonyan K, Fuertinger S. Speech networks at rest and in action: Interactions between functional brain networks controlling speech production[J]. *J Neurophysiol*, 2015, 113(7):2967-2978. DOI:10.1152/jn.00964.2014.
- [19] Rao B, Cheng H, Fan Y, et al. Topological properties of the resting-state functional network in nonsyndromic cleft lip and palate children after speech rehabilitation[J]. *J Integr Neurosci*, 2020, 19(2):285-293. DOI:10.31083/j.jin.2020.02.19.
- [20] Cheng H, Rao B, Zhang W, et al. Increased modularity of the resting-state network in children with nonsyndromic cleft lip and palate after speech rehabilitation[J]. *Brain Behav*, 2021, 11(8):e02094. DOI:10.1002/brb3.2094.
- [21] Poline JB, Brett M. The general linear model and fMRI: Does love last forever? [J]. *Neuroimage*, 2012, 62(2):871-880. DOI:10.1016/j.neuroimage.2012.01.133.
- [22] Zilles K. Neuronal plasticity as an adaptive property of the central nervous system [J]. *Ann Anat*, 1992, 174(5):383-391. DOI:10.1016/s0940-9602(11)80255-4.
- [23] Lancaster HS, Lien KM, Haas J, et al. Reading development in children with nonsyndromic cleft palate with or without cleft lip: Meta-analysis and systematic review[J]. *Cleft Palate Craniofac J*, 2022, 59(9):1155-1166. DOI:10.1177/10556656211039871.
- [24] Crosson B, Rodriguez AD, Copland D, et al. Neuroplasticity and aphasia treatments: New approaches for an old problem [J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2019, 90(10):1147-1155. DOI:10.1136/jnnp-2018-319649.
- [25] Freed WJ, de Medinaceli L, Wyatt RJ. Promoting functional plasticity in the damaged nervous system [J]. *Science*, 1985, 227(4694):1544-1552. DOI:10.1126/science.3975624.
- [26] Bavelier D, Levi DM, Li RW. Removing brakes on adult brain plasticity: From molecular to behavioral interventions [J]. *J Neurosci*, 2010, 30(45):14964-14971. DOI:10.1523/JNEUROSCI.4812-10.2010.
- [27] Hickok G, Poeppel D. The cortical organization of speech processing [J]. *Nat Rev Neurosci*, 2007, 8(5):393-402. DOI:

- 10.1038/nrn2113.
- [28] Schlaug G, Marchina S, Norton A. Evidence for plasticity in white - matter tracts of patients with chronic Broca's aphasia undergoing intense intonation-based speech therapy[J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2009, 1169: 385 - 394. DOI: 10.1111/j. 1749 - 6632. 2009.04587.x.
- [29] Cavalheiro MG, Lamônica DAC, de Vasconcellos Hage SR, et al. Child development skills and language in toddlers with cleft lip and palate[J]. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 2019, 116: 18-21. DOI:10.1016/j.ijporl.2018.10.011.
- [30] Hartwigsen G, Saur D. Neuroimaging of stroke recovery from aphasia: Insights into plasticity of the human language network [J]. *NeuroImage*, 2019, 190: 14-31. DOI: 10.1016/j.neuroimage. 2017.11.056.
- [31] Turkeltaub PE. A taxonomy of brain-behavior relationships after stroke[J]. *J Speech Lang Hear Res*, 2019, 62(11): 3907-3922. DOI:10.1044/2019_JSLHR-L-RSNP-19-0032.
- [32] Wang S, Fang L, Miao G, et al. Atypical cortical thickness and folding of language regions in Chinese nonsyndromic cleft lip and palate children after speech rehabilitation [J]. *Front Neurol*, 2022, 13: 996459. DOI: 10.3389/fneur.2022.996459.
- [33] 程华, 饶波, 张文婧, 等. 经手术和语音康复后非综合征型唇腭裂儿童静息态脑功能改变的磁共振特征[J]. *中国医学物理学杂志*, 2022, 39(2): 177-181. DOI: 10.3969/j.issn. 1005-202X. 2022.02.008.
- [34] 司迁, 张文婧, 张旭, 等. 基于fMRI动态功能连接的唇腭裂患者言语康复训练脑机制研究[J]. *生命科学仪器*, 2022, 20(2): 27-35. DOI:10.11967/2022200403.
- [35] Sun L, Zhang W, Wang M, et al. Reading-related brain function restored to normal after articulation training in patients with cleft lip and palate: An fMRI study[J]. *Neurosci Bull*, 2022, 38(10): 1215-1228. DOI: 10.1007/s12264-022-00918-6.
- [36] Abo M, Senoo A, Watanabe S, et al. Language - related brain function during word repetition in post - stroke aphasics [J]. *Neuroreport*, 2004, 15(12): 1891-1894. DOI: 10.1097/00001756-200408260-00011
- [37] Zhang W, Li C, Chen L, et al. Increased activation of the hippocampus during a Chinese character subvocalization task in adults with cleft lip and palate palatoplasty and speech therapy [J]. *Neuroreport*, 2017, 28(12): 739-744. DOI: 10.1097/WNR. 0000000000000832.
- [38] Nasios G, Dardiotis E, Messinis L. From broca and wernicke to the neuromodulation era: Insights of brain language networks for neurorehabilitation [J]. *Behav Neurol*, 2019: 9894571. DOI: 10. 1155/2019/9894571.
- [39] Schapiro AC, Turk-Browne NB, Botvinick MM, et al. Complementary learning systems within the hippocampus: A neural network modelling approach to reconciling episodic memory with statistical learning [J]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2017, 372(1711): 20160049. DOI: 10.1098/rstb.2016.0049.

(收稿日期:2025-03-09)

(本文编辑:王嫚)