

[DOI]10.12016/j.issn.2096-1456.2019.05.010

· 综述 ·

应用磁共振评估腭咽结构与功能的进展

丁福根^{1,2}, 何苇², 宋庆高²

1. 遵义医学院, 贵州 遵义(563000); 2. 遵义医学院附属口腔医院口腔颌面外科, 贵州 遵义(563003)

【摘要】 正常发育的腭咽部结构是获得良好的腭咽闭合功能的关键。在对腭咽闭合功能和正常发音的评估中,有多种仪器可用于检测和辅助诊断腭咽闭合功能不全。过去对腭咽闭合的评估常常使用二维影像学手段进行观察或者仅仅依赖于语音师的主观评估。随着科学技术的发展,磁共振作为一种理想的检查手段逐渐被广泛应用于腭咽结构与功能的评估中。本文从腭咽闭合功能评估的现状与局限性,以及近年来使用的静态磁共振、动态磁共振、三维重建磁共振和扩散张量磁共振成像技术对腭咽部结构与功能的研究进行综述,探讨磁共振成像技术在评估腭咽结构与功能中的作用及意义。文献复习结果显示:静态磁共振成像扫描方式简单,参数便于调节,能较清楚地显示静息状态下或短暂发声状态下腭咽部的解剖结构。动态磁共振成像可以在较为复杂的发音状态下对腭咽部的解剖结构变化进行捕获,获得准确的腭咽闭合过程的动态图像以用于语音病理学的研究。三维重建磁共振成像通常应用于静息状态下的腭咽结构精细扫描,虽然耗时较长,但获得的图像清晰可靠,可进行三维重建分析及三维有限元分析,并对手术的效果评价和手术方式的设计提供帮助。扩散张量成像是通过对肌肉内水分子的运动轨迹来对肌肉的收缩功能进行观测,是一种全新的手段,可以对组成腭咽闭合功能的诸多肌肉进行分析研究。

【关键词】 磁共振成像; 腭咽结构与功能; 腭咽闭合功能; 腭咽闭合功能不全; 腭帆提肌

【中图分类号】 R78 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 2096-1456(2019)05-0321-06

【引用著录格式】 丁福根,何苇,宋庆高.应用磁共振评估腭咽结构与功能的进展[J].口腔疾病防治,2019,27(5):321-326.

Research progress in evaluating velopharyngeal structures and functions by magnetic resonance imaging

DING Fugen^{1,2}, HE Wei², SONG Qinggao². 1. Zunyi Medical University, Zunyi 563000, China; 2. Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Affiliated Stomatological Hospital of Zunyi Medical University, Zunyi 563003, China.

Corresponding author: HE Wei, Email: heweichenhui@163.com, Tel: 0086-851-28608438

【Abstract】 Normal development of the velopharyngeal structures is key to obtaining good velopharyngeal closure. In the assessment of velopharyngeal closure and normal pronunciation, a variety of instruments can be used to detect and assist in the diagnosis of velopharyngeal dysfunction. In the past, the assessment of velopharyngeal closure often used two-dimensional imaging or relied solely on the subjective assessment of the phonetician. With the development of science and technology, magnetic resonance imaging (MRI) has become widely used in the evaluation of velopharyngeal structures and functions as an ideal examination method. This article reviews the current capabilities and limitations in evaluating velopharyngeal closure, as well as recent research on the structures and functions of the velopharyngeal using static MRI, dynamic MRI, three-dimensional MRI reconstructions and diffusion tensor imaging (DTI) techniques; in addition, this work explores the role and significance of MRI technology in evaluating the structures and functions of the velopharyngeal. A review of the literature shows that static MRI is simple in terms of the scanning mode, has easily adjustable parameters, and clearly shows the anatomical structures of palatopharyngeal in resting or transient vocal states. Dynamic MRI can capture the anatomical changes of the palatopharyngeal in a more complex pronunciation state and obtain accurate dynamic images of the velopharyngeal closure process for the study of speech pathology. Three-dimen-

【收稿日期】 2018-09-05; **【修回日期】** 2018-10-02

【基金项目】 国家自然科学基金项目(81560182, 81860191)

【作者简介】 丁福根, 医师, 硕士研究生在读, Email: 1454850639@qq.com

【通信作者】 何苇, 副教授, 博士, Email: heweichenhui@163.com, Tel: 0086-851-28608438

sional MRI reconstructions are usually used in fine scanning of the velopharyngeal structures in a resting state; although this method takes a long time, the images obtained are clear and reliable. This approach can be used for three-dimensional reconstruction analysis and three-dimensional finite element analysis, and it can be used to help plan an operation and evaluate the effect of the surgery. DTI is a new method for observing the contractile function of muscles by observing the locus of water molecules in muscles. DTI can be used to analyze and study many muscles involved in velopharyngeal closure.

【Key words】 Magnetic resonance imaging; Velopharyngeal structure and function; Velopharyngeal closure; Velopharyngeal dysfunction; Levator veli palatini

腭咽闭合(velopharyngeal closure)是正常人发音时所必备的条件之一。由于结构异常、神经源性障碍、功能性问题等,导致软腭与咽壁不能形成闭合,造成发音时口-鼻腔相通,出现过度鼻音或鼻漏气时称为腭咽闭合功能不全(velopharyngeal dysfunction, VPD)^[1]。腭裂是引起腭咽闭合功能不全的最常见的疾病之一。腭裂手术的目标是获得良好的腭咽闭合功能。但由于腭裂手术自身的缺陷,术后仍有部分患者存在腭咽闭合功能不全^[2]。因此,为了制定合理的手术方案及进行有效的预后评估,术前对患者进行腭咽闭合功能的评估甚为重要。磁共振成像是临床上一种可靠的评估工具,它是观察腭咽部肌肉在静息和功能状态下的理想方法之一,目前已被用于对正常与异常的腭咽闭合功能机制的研究。

1 腭咽部的解剖结构及其生理意义

软腭肌肉由腭帆提肌、腭垂肌、腭帆张肌、咽上缩肌、腭咽肌、腭舌肌、茎突咽肌共同组成,软腭组织与吞咽和语音功能有关。软腭肌肉上抬与咽侧壁向内运动,将口腔与鼻腔分隔形成腭咽闭合状态。其中腭帆提肌(levator veli palatini, LVP)、咽上缩肌(superior pharyngeal constrictor)、腭垂肌(uvulae)3种肌肉与腭咽闭合功能有着密切关系。①腭帆提肌,是一对上抬软腭的主要肌肉,它起源于咽鼓管骨、软骨结合部和颞骨的岩部,向前、向下走行,最终以45°斜形插入到软腭中,并与对侧纤维相接。大部分纤维位于软腭的中三分之一处,形成吊带状结构。当收缩时,腭帆提肌将软腭向上、向后拉回到咽后壁,同时也使咽侧壁向内侧塌陷。通过这种方式关闭整个腭咽口^[3]。②咽上缩肌,起源于咽后壁中线。它的纤维向前和向内进入,从两侧进入软腭。在收缩时,可以使咽腔在硬腭的水平向内运动,以闭合腭咽口。在一些患者中,咽后壁由该肌肉复合体向前拉,在腭咽闭合

期间使咽后壁向前凸出,这种现象称为Passavant嵴^[4],被视为一种代偿性运动,咽上缩肌还与腭咽闭合模式有关。③腭垂肌,起源于软腭全长的前25%处的腭腱膜,纤维向后延伸,在提肌吊带处最为明显。在收缩时,它们增加了软腭后三分之一的厚度,填补悬雍垂与咽后壁之间的距离,封闭腭咽口^[5]。

腭裂患者在腭部中线处伴有组织缺失,正常附着在中线结构的组织被迫形成了异常附着。受裂痕影响最大的肌肉是腭帆提肌,在尸体解剖中证实了这种异常的肌肉附着情况。腭裂可能导致悬雍垂肌变小、缺失,目前尚无研究证实修复后的腭裂是否会促进腭垂肌肉纤维的形成。在未修复的腭裂中也观察到腭帆张肌在裂隙侧的异常附着,腭帆张肌主要是调节咽鼓管口的开放和平衡中耳内压,一般而言,初次腭裂外科手术并不是为了恢复腭帆张肌的正常定位,故术后患者可能会出现中耳功能异常的发生。腭裂患者的腭舌肌、腭咽肌的附着和腭帆提肌一样,沿硬腭的前部和外侧较多,咽上缩肌和咽鼓管咽肌一般不因腭裂而受到影响或改变。由于腭裂的存在,还会出现其他并发症,导致与喂食、上颌面部发育、牙列、中耳功能、听力和语言有关的问题。因此,明确腭咽部的解剖结构对手术恢复正常腭咽结构与功能(velopharyngeal structure and function)有着重要的实际意义。大量研究显示腭帆提肌对腭咽闭合功能有着显著的影响,对腭帆提肌形态研究可以为异常的语音及吞咽活动提供重要的信息^[6]。

2 腭咽闭合功能评估的现状

临床上评估腭咽闭合功能通常依靠语音师的主观判听。但受限于专业人员的水平,该过程有可能导致误判的发生。为了弥补主观语音评估存在的缺陷,临床及科研上常使用辅助仪器来补充语音评估,这些仪器根据原理不同可分为:间接评

估技术和直接评估技术。

2.1 间接评估技术

间接评估技术提供了可以推断腭咽活动和可能的功能障碍的信息。其又可分为两大类评估技术:声学 and 空气动力学测量。诸如:气压-气流测定法、口-鼻腔气流测定法、频谱分析、鼻息计等。然而,间接评估所需的专业设备往往应用较局限,操作程序复杂、昂贵且需要大量的合作^[7]。因此,其中的一些技术更多地应用在科研领域。与直接评估技术相比,这些评估方法仅提供了腭咽闭合的共鸣程度或异常功能的量化信息,并未真实呈现腭咽闭合的机制。

2.2 直接评估技术

直接评估技术是直接显示腭咽闭合机制并提供关于腭咽间隙大小和形状等信息。根据这些信息,临床医生结合主观语音评估可以为患者制定进一步的治疗方案,并且可量化治疗后的变化。常用的直接评估法包括:鼻咽镜检查(nasoendoscopy)、多视角视频荧光检查(multiview videofluoroscopy)、头颅侧位X线摄影分析(lateral cephalometric radiographic analysis)、计算机断层扫描(computed tomography, CT)和磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)。鼻咽镜可以观察静息及发声期间腭咽部的运动,它的好处在于患者不会接触到电离辐射,然而图像的获取是具有侵入性的,这造成低龄患者难以配合检查,同时二维影像并不能真实反应三维解剖结构,图像存在着一定的失真^[8]。多视角视频荧光检查是另一种可视化腭咽闭合机制的技术。但由于解剖结构重叠,软组织对比度较差,有时难以分析肌肉闭合的图像,患者还存在电离辐射暴露风险^[8]。头颅侧位X线摄影可以显示静息时或持续发声期间腭咽部的解剖结构^[9],可以得到软腭的长度、伸长度及咽腔深度等信息,是临床上一种简单、易行的方式。然而,这也将三维结构变为二维图像来表示,存在着较大误差^[10],同样存在着电离辐射。计算机断层扫描可以提供关于静息状态和持续发音状态下腭咽部轴面的结构与运动方式^[11],但这种技术也存在着局限性:患者长时间暴露于电离辐射,软组织分辨率不佳。因此,CT扫描并不常用于评估腭咽功能不全。

磁共振成像对于患者来说是一种更为有利的选择,因为它是一种非电离化、非侵入性、易于重复和可重复的诊断方式,可以获得更高分辨率的软组织图像,并且允许在三维空间中完全自由选

择图像平面,对软腭和鼻咽部区域进行无创评估是MRI的优势所在。尤其对于腭裂患儿而言,能够在数分钟内提供解剖结构及功能的评估,并提供即时数据分析和解释是非常重要的。

3 应用磁共振评估腭咽闭合功能的最新进展

磁共振成像能够快速获取腭咽部结构的静态与动态图像。同时,通过调节磁共振的扫描参数,可以获得任意扫描平面的二维或三维解剖图像序列,可以为后期的研究分析提供精准的数据^[12]。根据磁共振成像原理的不同,可以分为:静态MRI、动态MRI、三维重建MRI、扩散张量成像等技术。

3.1 静态MRI

腭帆提肌对腭咽闭合功能的形成有着重要的作用,大量静态MRI(static magnetic resonance imaging)研究都集中于此。在静息状态或持续发/a:/音数秒情况下,通过磁共振在不同扫描平面上可以清楚观察到腭咽部的行使功能的主要肌肉及周围重要的软硬组织的结构。Jordan等^[13]发现正常人软腭长度和腺样体厚度随着闭合方式而变化,同时女性表现出更多的环状闭合方式,而男性表现出更多的冠状闭合方式,并且男性的鼻咽长度、宽度及软腭长度显著大于女性,这些结果表明软腭的长度和腺样体的厚度可能对腭咽闭合模式有着较大的影响。以往研究表明腭帆提肌形态在不同性别、年龄和种族之间存在着差异。Perry等^[14]发现正常成年男性的腭帆提肌长度及起源的角度较女性大,位于软腭内部的腭帆提肌形态还可能存在着变异,表现出稀疏的肌纤维。进一步研究表明儿童中腭咽部的肌肉形态无明显性别差异,表明性别的影响似乎取决于年龄大小^[15]。Bae等^[16]通过对4名参与者进行为期8周的持续正压通气治疗(continuous positive airway pressure, CPAP),结果显示,其中有3人的软腭体积增加,腭帆提肌厚度和水平段肌肉比例增加。该研究从影像学角度证实CPAP治疗可以改变腭部解剖结构,同时也揭示了MRI对可视化腭咽部的结构具有重要的意义。另有研究发现,虽然腭裂患者与正常人相比在硬腭、腭帆提肌和咽门直径上有着显著差异,但一些个体仍表现出正常的语音共振^[17],未来还需要更多研究去分析解剖变异如何影响言语功能。

腭隐裂也是引起腭咽功能异常的原因之一,有学者通过磁共振观察到了腭帆提肌异常附着于

硬腭处,为腭隐裂的诊断提供了解剖学以外的直接的证据^[18]。对于腭隐裂和神经源性腭咽闭合不全患者来说,MRI可能是除语音评估以外最为重要辅助诊断方法,可避免因手术时间的延误及手术方式的错误导致患儿错过最佳的治疗时机。与传统的成像方法不同,因MRI的图像是仰卧位获得的,Silver等^[8]提出重力可能对评估过程产生不利影响。但Kollara等^[19]研究结果显示直立位和仰卧位之间腭咽部结构和功能并无显著差异。

3.2 动态MRI

腭咽功能的复杂性和动态性使其在发音过程中难以通过常规检查设备评估。动态磁共振成像(dynamic magnetic resonance imaging)是一个非常活跃的研究领域,它为直接观察腭咽部的结构与运动方式提供了一种可能性,同时也是目前唯一一种安全、无创,能在语音生成过程中使腭咽部肌肉可视化的成像方式。通过使用动态磁共振成像技术在矢状位和倾斜冠状位平面上能获得一系列动态图像,可观察到软腭、咽后壁、咽侧壁和腭帆提肌的运动^[20]。

动态MRI技术可以不依赖于重复或持续发声就可以获取一个发音周期内的腭咽结构的变化过程。有学者^[21]发现动态MRI在确定腭咽闭合模式时的准确性弱于鼻咽镜,推测可能是因为使用了二维MRI序列。相较于二维MRI序列,三维MRI可以在扫描之后对成像序列进行图像分割,便于在言语事件中查看多个腭咽部的解剖视角,可以避免使用二维序列采集下因重复发音引起的腭咽结构变化^[22]。

动态MRI可以用于在发音期间对舌的运动和咽腔变化进行成像^[23],通过同步录音后可以获得完整腭咽闭合过程的MRI电影^[24-26]。在研究腭咽闭合时,动态帧速(frames per second, fps)是一个重要因素,较低的帧速率会增加图像模糊程度和错失腭咽闭合事件,可能对腭咽闭合不全的诊断产生影响。与以往研究不同,磁共振语音评估法一直受限于发音的时间长短,仅能获得单音状态下的腭咽结构,且发音状态下肌肉收缩速率较快,低于10 fps的采集速率难以完整地观察腭咽闭合功能,无法捕捉复杂的语音下的结构变化。Perry等^[27]观察到儿童和成人的腭帆提肌收缩率相似,不因年龄的增加而变化,该研究使用了较高帧率(15.8 fps)的采集速率,获得了句子层面的腭咽闭合动态图像。同时,想获得理想的磁共振成像的

关键在于信噪比、时间分辨率、空间分辨率和主体容差度之间应取得最佳平衡。目前新的成像方法已经能够实现大约每秒20 fps的采集速度^[27, 28]。最近甚至发展出超过100 fps的采集速度应用于语音研究之中^[22, 29]。高速成像可以弥补运动伪影所带来的不利影响,但是图像质量会变差。高帧速的非笛卡儿序列(non-cartesian sequences)是改善动态语音磁共振成像的整体图像质量和时间分辨率的有前景的工具,在相同的空间-时间分辨率内,非笛卡尔采集序列提供了比笛卡儿序列(cartesian sequences)更高的对比噪声比(contrast noise ratio, CNR)^[30]。但非笛卡儿采样序列在标准的扫描仪上并不通用。此外,尤其是在高速采集状态下会产生的大量数据,往往依赖延迟重建进行分析,虽然对于研究腭咽闭合机制来说仍是可行的,但对交互式临床语音研究却是一个限制因素,未来仍需开发出自动化处理程序来辅助分析腭咽闭合事件。

3.3 三维重建MRI

三维重建(three-dimensional reconstruction)MRI是近年来较为热门的研究方向。用于腭帆提肌成像的二维MRI需要现场对取样目标进行多次调整以获得理想的成像平面,从而导致扫描时间的延长^[31]。三维图像序列,如高分辨率T2WI自旋回波三维解剖成像序列(SPACE),可在数分钟内创建一个数据集,通过先进的计算机三维软件重建后能获得腭帆提肌的数字化解剖信息,能以三维的方式展现腭帆提肌的形态,同时可以更加精确、方便地测量^[32]。该磁共振成像序列提供了良好的空间分辨率,能清晰地观察、分离包括悬雍垂和腭舌肌在内的相邻肌肉之间的边界,这是以往的研究所不能达到的。

Kotlarek等^[33]通过三维重建MRI比较正常成年人与腭裂术后成年人的腭帆提肌结构,发现患者的腭帆提肌体积明显减少,肌肉直径与周长在中线处差异明显,腭裂者在中线处出现腭帆提肌裂开(或与早期缺乏手术连接有关)。该研究有助于进一步了解对导致异常语音和吞咽的腭咽部肌肉形态与功能。Inouye等^[34]通过对腭咽部组织进行计算机建模后发现改善腭咽功能不全可以通过缩短腭咽前后径的距离,延长软腭长度和/或增加腭帆提肌横截面积。对腭咽部组织进行三维有限元分析后发现悬雍垂的存在可以增强腭咽闭合功能,在悬雍垂组织缺失或功能不全的情况下,将自

体或工程化组织植入软腭中线代替悬雍垂,可能产生更有利于腭咽闭合的几何形状^[35]。

三维重建MRI技术还为腭裂手术方案设计提供了新的方法。术前通过磁共振成像采集VPD患者腭咽部的结构,特别是腭帆提肌的发育情况、肌肉长度、走行、肌肉量及功能状态下腭咽形态结构变化等诸多信息,通过建立基于影像学的形态研究与腭咽手术方式的桥梁,为患者选择合适的腭裂修补方式、设计个性化的手术方式,并通过术后的随访,帮助研究者客观地评估及验证手术的效果。利用MRI技术获得的详细信息,还可以开发一种生物力学模型,考虑肌肉的主动和被动物理特性,以及后鼻棘与腭帆提肌水平段之间结缔组织的弹性特征,能够根据腭咽闭合过程中的形态和运动来预测腭咽结构的变化,就像各种手术所改变的一样^[36]。计算机建模后可以系统地研究在体内不可能完成的或需要数十年的临床试验来阐明的关系。虽然计算机建模的研究还处于初期探索阶段,但这些发现加深了研究者对腭咽结构的认识,对理解腭帆提肌的解剖结构和对外科手术恢复腭帆提肌正常形态提供了莫大的帮助。

3.4 扩散张量成像

扩散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)是一种特殊的磁共振成像方式,是通过在多个方向上应用扩散敏化梯度来检测水分子在生物组织中的扩散率所形成的图像,它可以区分不同的组织结构。对肌肉组织而言,它是可视化肌纤维分布的一个强大的工具,还可量化人体肌肉纤维在体内发生的形变^[37]。目前较常用于心脑血管疾病、肿瘤、神经性病变及骨骼肌肉病变等疾病的诊断之中。Perry等^[17]研究发现腭裂患者的腭帆提肌长度短于正常人,同时两侧肌肉之间更加宽大,导致这种差异的原因可能与个体差异和手术操作过程中翼钩区域解剖的变化有关。未来可以使用扩散张量磁共振成像研究腭帆提肌肌纤维分布情况,它可能是以后研究正常和病理性肌肉功能的一个有前景的工具。

4 磁共振评估腭咽闭合功能存在的局限

磁共振检查采集数据所需的时间较其它影像学检查长,因此,受试者的配合程度决定了检查的成功与否。针对腭裂患儿进行腭咽结构的磁共振检查时,通常需要麻醉或镇静来帮助检查的顺利进行。全身麻醉可以较好地预防患者的运动,成

像效果更佳,但全身麻醉是具有侵入性的,相比镇静而言费用较昂贵,家属难以接受。水合氯醛作为经典的镇静药物曾广泛应用于影像学检查之中,但其也有不足之处,部分患儿在检查过程中会苏醒,可能与药物的使用剂量、医患的沟通、焦虑程度等因素有关,同时还存在一些不良反应,如:呕吐、躁动、肝肾功能损害和呼吸抑制等^[38]。并且镇静或麻醉后仅能对静息状态下的腭咽部结构进行扫描,而无法对发音状态下的腭咽功能进行评估。另外,患有幽闭恐惧症的患者也较难顺利进行MRI检查^[39]。虽然磁共振成像技术的临床应用中,尤其对儿童人群而言尚存在着一些限制,但仍不失为一种诊断腭咽闭合不全及观察腭咽部解剖结构的重要工具。

5 结语

腭咽闭合功能的评估是一个相对复杂的过程,磁共振成像已逐渐成为研究腭咽闭合功能的最常用工具之一。目前对这一领域的关注度越来越高,未来需要进一步发展和完善技术,开发出一种更快速、更自动化的MRI数据可视化分析方法,同参与语音评估和治疗计划的人员的合作,进一步研究明确哪些数据及变量具有临床相关性,从而将新的成像方法应用于临床治疗中。

参考文献

- [1] Meier JD, Muntz HR. Velopharyngeal dysfunction evaluation and treatment[J]. *Facial Plast Surg Clin North Am*, 2016, 24(4): 477-485.
- [2] Sommerlad BC. International confederation for cleft lip and palate and related craniofacial anomalies task force report: palatoplasty in the speaking individual with unrepaired cleft palate[J]. *Cleft Palate Craniofac J*, 2014, 51(6): 122-128.
- [3] Raol N, Hartnick CJ. Anatomy and physiology of velopharyngeal closure and insufficiency[J]. *Adv Otorhinolaryngol*, 2015, 76(1): 1-6.
- [4] Sakamoto Y. Spatial relationship between the palatopharyngeus and the superior constrictor of the pharynx[J]. *Surg Radiol Anat*, 2015, 37(6): 649-655.
- [5] Glade RS, Deal R. Diagnosis and management of velopharyngeal dysfunction[J]. *Oral Maxillofac Surg Clin North Am*, 2016, 28(2): 181-188.
- [6] Perry JL, Kuehn DP, Sutton BP. Morphology of the levator veli palatini muscle using magnetic resonance imaging[J]. *Cleft Palate Craniofac J*, 2013, 50(1): 64-75.
- [7] Karnell MP. Instrumental assessment of velopharyngeal closure for speech[J]. *Semin Speech Lang*, 2011, 32(2): 168-178.

- [8] Silver AL, Nimkin K, Ashland JE, et al. Cine magnetic resonance imaging with simultaneous audio to evaluate pediatric velopharyngeal insufficiency[J]. Arch Otolaryngol Head Neck Surg, 2011, 137(3): 258-263.
- [9] Wu Y, Wang X, Ma L, et al. Velopharyngeal configuration changes following Le Fort I osteotomy with maxillary advancement in patients with cleft lip and palate: a cephalometric study[J]. Cleft Palate Craniofac J, 2015, 52(6): 711-716.
- [10] Berkowitz S. Diagnostic procedures and instruments used in the assessment and treatment of speech[J]. Cleft Lip and Palate, 2013, 51(5): 707-713.
- [11] Sakamoto Y, Soga S, Jinzaki M, et al. Evaluation of velopharyngeal closure by 4D imaging using 320-detector-row computed tomography[J]. J Plast Reconstr Aesthet Surg, 2015, 68(4): 479-484.
- [12] Naran S, Ford M, Losee JE. What's new in cleft palate and velopharyngeal dysfunction management?[J]. Plast Reconstr Surg, 2017, 139(6): 1343-1355.
- [13] Jordan HN, Schenck GC, Ellis C, et al. Examining velopharyngeal closure patterns based on anatomic variables[J]. J Craniofac Surg, 2017, 28(1): 270-274.
- [14] Perry JL, Kuehn DP, Sutton BP, et al. Sexual dimorphism of the levator veli palatini muscle: an imaging study[J]. Cleft Palate Craniofac J, 2014, 51(5): 544-552.
- [15] Kollara L, Perry JL, Hudson S. Racial variations in velopharyngeal and craniometric morphology in children: an imaging study [J]. J Speech Lang Hear Res, 2016, 59(1): 27-38.
- [16] Bae Y, Pfeil G. Structural changes following velopharyngeal resistance training (continuous positive airway pressure therapy): a preliminary report[J]. Cleft Palate Craniofac J, 2018, 55(9): 1321-1328.
- [17] Perry JL, Kotlarek KJ, Sutton BP, et al. Variations in velopharyngeal structure in adults with repaired cleft palate[J]. Cleft Palate Craniofac J, 2018, 10(5): 356-367.
- [18] Caterson EJ, Tsai DM, Cauley R, et al. Transillumination of the occult submucous cleft palate[J]. J Craniofac Surg, 2014, 25(6): 2160-2163.
- [19] Kollara L, Perry JL. Effects of gravity on the velopharyngeal structures in children using upright magnetic resonance imaging[J]. Cleft Palate Craniofac J, 2014, 51(6): 669-676.
- [20] Perry JL, Sutton BP, Kuehn DP, et al. Using MRI for assessing velopharyngeal structures and function[J]. Cleft Palate Craniofac J, 2014, 51(4): 476-485.
- [21] Perry JL, Mason K, Sutton BP, et al. Can dynamic MRI be used to accurately identify velopharyngeal closure patterns?[J]. Cleft Palate Craniofac J, 2018, 55(4): 499-507.
- [22] Fu M, Barlaz MS, Holtrop JL, et al. High-frame-rate full-vocaltract 3D dynamic speech imaging[J]. Magn Reson Med, 2017, 77(4): 1619-1629.
- [23] Scott AD, Wylezinska M, Birch MJ, et al. Speech MRI: morphology and function[J]. Phys Med, 2014, 30(6): 604-618.
- [24] Belcher R, Deshpande A, Goudy S. State of the art in treating velopharyngeal dysfunction[J]. Facial Plast Surg, 2016, 32(2): 156-161.
- [25] Ozawa E, Honda EI, Parakonthun KN, et al. Influence of orthodontic appliance-derived artifacts on 3-T MRI movies[J]. Prog Orthod, 2018, 19(1): 7.
- [26] Sagar P, Nimkin K. Feasibility study to assess clinical applications of 3-T cine MRI coupled with synchronous audio recording during speech in evaluation of velopharyngeal insufficiency in children[J]. Pediatric Radiology, 2015, 45(2): 217-227.
- [27] Perry JL, Kuehn DP, Sutton BP, et al. Velopharyngeal structural and functional assessment of speech in young children using dynamic magnetic resonance imaging[J]. Cleft Palate Craniofac J, 2017, 54(4): 408-422.
- [28] Feng X, Blemker SS, Inouye J, et al. Assessment of velopharyngeal function with dual-planar high-resolution real-time spiral dynamic MRI[J]. Magn Reson Med, 2018, 80(04): 1467-1474.
- [29] Fu M, Zhao B, Carignan C, et al. High-resolution dynamic speech imaging with joint low-rank and sparsity constraints[J]. Magn Reson Med, 2015, 73(5): 1820-1832.
- [30] Freitas AC, Ruthven M, Boubertakh R, et al. Real-time speech MRI: commercial Cartesian and non-Cartesian sequences at 3T and feasibility of offline TGV reconstruction to visualise velopharyngeal motion[J]. Phys Med, 2018, 46(4): 96-103.
- [31] Perry JL, Kuehn DP, Wachtel JM, et al. Using magnetic resonance imaging for early assessment of submucous cleft palate: a case report[J]. Cleft Palate Craniofac J, 2012, 49(4): 35-41.
- [32] Perry JL, Kuehn DP, Sutton BP. Morphology of the levator veli palatini muscle using magnetic resonance imaging[J]. Cleft Palate Craniofac J, 2013, 50(1): 64-75.
- [33] Kotlarek KJ, Perry JL, Fang X. Morphology of the levator veli palatini muscle in adults with repaired cleft palate[J]. J Craniofac Surg, 2017, 28(3): 833-837.
- [34] Inouye JM, Perry JL, Lin KY, et al. A computational model quantifies the effect of anatomical variability on velopharyngeal function [J]. J Speech Lang Hear Res, 2015, 58(4): 1119-1133.
- [35] Inouye JM, Lin KY, Perry JL, et al. Contributions of the musculus uvulae to velopharyngeal closure quantified with a 3-dimensional multimuscule computational model[J]. Ann Plast Surg, 2016, 77(1): 70-75.
- [36] Tian W, Yin H, Redett RJ, et al. Magnetic resonance imaging assessment of the velopharyngeal mechanism at rest and during speech in Chinese adults and children[J]. J Speech Lang Hear Res, 2010, 53(6): 1595-615.
- [37] Pamuk U, Karakuzu A, Ozturk C, et al. Combined magnetic resonance and diffusion tensor imaging analyses provide a powerful tool for *in vivo* assessment of deformation along human muscle fibers[J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2016, 63(3): 207-219.
- [38] Ratnapalan S. Chloral hydrate sedation in children[J]. Clin Pediatr (Phila), 2014, 53(10): 933-936.
- [39] Semba J. MRI claustrophobia: assessment and management[J]. Nihon Hoshasen Gijutsu Gakkai Zasshi, 2016, 72(10): 1027-1032.

(编辑 张琳)