

- [42] Chen LC, Kuo CW, Hsu HH, et al. Concurrent measurement of isokinetic muscle strength of the trunk, knees, and ankles in patients with lumbar disc herniation with sciatica [J]. *Spine*, 2010, 26(35):1612—1618.
- [43] Feldman DE, Shrier I, Rossignol M. Risk factors for the development of low back pain in adolescence lucien abenhaim[J]. *American Journal of Epidemiology*, 2001, 01:154—161.
- [44] Karvonen MJ, Viitasalo JT, Komi PV, et al. Back and leg complaints in relation to muscle strength in young men[J]. *Scand J Rehabil Med*, 1980, 12:53—59.
- [45] Suter E, Lindsay D. Back muscle fatigability is associated with knee extensor inhibition in subjects with low back pain[J]. *Spine*, 2001, 26:361—366.
- [46] Hart JM, Fritz JM, Kerrigan DC, et al. Reduced quadriceps activation after lumbar paraspinal fatiguing exercise[J]. *Journal of Athletic Training*, 2006, 41(1):79—86.
- [47] Hart JM, Fritz JM, Kerrigan DC, et al. Quadriceps inhibition after repetitive lumbar extension exercise in persons with a history of low back pain [J]. *Journal of Athletic Training*, 2006, 41(3):264—269.
- [48] Hart JM, Weltman A, Ingersoll CD. Quadriceps activation following aerobic exercise in persons with low back pain and healthy controls[J]. *Clinical Biomechanics*, 2010, 25(8): 847—851.
- [49] Leetun DT, Ireland ML, Willson JD, et al. Core stability measures as risk factors for lower extremity injury in athletes[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2004, 36(6):926—934.
- [50] Kibler WB, Press J, Sciascia A. The role of core stability in athletic function [J]. *Sports Med*, 2006, 36:189—198.
- [51] Barash HL, Galante JO, Lambert CN. Spondylolisthesis and tight hamstrings[J]. *J Bone Joint Surg*, 1970, 52:1319—1328.
- [52] Biering-Sorensen F. Physical measurements as risk indicators for low-back trouble over a one-year period[J]. *Spine*, 1984, 9:106—119.
- [53] Khali TM, Asfour SS, Martinez LM, et al. Stretching in the rehabilitation of low-back pain patients[J]. *Spine*, 1992, 17(3):311—317.
- [54] Tafazzoli F, Lamontagne M. Mechanical behavior of hamstring muscles in low-back pain patients and control subjects[J]. *Clinical Biomechanics*, 1996, 11:16—24.
- [55] Williams PE, Goldspink G. Changes in sarcomere length and physiological properties in immobilized muscle[J]. *J Anat*, 1978, 127(3):459—468.
- [56] Marshall PW, Mannion J, Murphy BA. The eccentric, concentric strength relationship of the hamstring muscles in chronic low back pain[J]. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 2010, 10:39—45.
- [57] Bunn EA, Grindstaff TL, Hart JM, et al. Effects of paraspinal fatigue on lower extremity motoneuron excitability in individuals with a history of low back pain [J]. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 2011, 21:466—470.
- [58] McGregor AH, Hukins DW. Lower limb involvement in spinal function and low back pain[J]. *J Back Musculoskel-et Rehabil*, 2009, 22(4): 219—222.
- [59] Willson JD, Dougherty CP, Ireland ML, et al. Core stability and its relationship to lower extremity function and injury [J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2005, 13(5):316—325.

· 综述 ·

声学分析在吞咽障碍研究中的应用价值

冯 纯¹ 林 枫^{2,3}

吞咽障碍是脑卒中常见并发症之一,也是导致患者死亡的独立危险因素^[1]。随着年龄增长,会出现吞咽时间延迟和咳嗽反射减弱,因此老年人本身就容易出现吞咽问题。在70—79岁的老年人中,近1/4有不同程度的吞咽障碍。在80岁以上,这个比例则升至1/3^[2]。吞咽障碍导致的吸入性肺

炎,有近90%为隐匿起病,临床表现不典型,病初不易引起家属及医护人员注意^[3]。约有45%的正常老年人会在睡眠中发生误吸(包括隐性误吸在内),由误吸引发的肺炎病死率占到全部肺炎病死率的1/3^[4]。伴随着我国社会老龄化进程的加剧,对吞咽障碍诊断和治疗的需求将越来越高。

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2016.09.021

1 南京医科大学第一临床医学院康复医学系,南京,210029; 2 南京医科大学第一附属医院康复医学科; 3 通讯作者
作者简介:冯纯,女; 收稿日期:2015-02-22

目前吞咽障碍的临床筛查,主要依靠量表法或医生个体经验。钡餐放射影像学检查和纤维支气管镜检查,都会引发患者不适,甚至带有风险。通过听诊吞咽声音的方法来诊断疾病,虽然临床上早已有之,但却未能得到应有的重视,没有像心音分析那样建立成熟的检测、记录和评价体系。但是,由于其安全、非侵入和可记录的特性,吞咽声学分析具有独特的优势。通过非侵入性手段检测和分析吞咽时产生的声音特性,对于诊断和评估脑部特定区域损伤和相关神经损伤,具有特殊的重要性^[5-6]。另外,通过吞咽声学监测,从食物摄取周期和摄食次数来客观评估个体摄食行为,已经直接应用于探寻肥胖和超重的病因学机制^[7-8]。因此,在摄食—吞咽相关的功能障碍和疾病的研究中,吞咽声学分析已经获得越来越多的关注。

1 吞咽音声学研究背景

吞咽是一个复杂的过程,受到多种神经机制调控。一般根据食团(气团)位置,将吞咽周期分为3个时相:口腔期,咽喉期和食管期。吞咽音声学分析通常研究的是咽喉期的声音。食物已经形成食团,在喉部上抬,推送食团(气团)通过食道时,会产生特征性的吞咽音。这是一种短时、尖锐的“咕—噜”声,连续出现时可能听起来像单个音。若仅存在“咕—”声,提示存在食物误入气道可能。吞咽音持续时间随年龄增加而变长,随食团体积增加而缩短。当液体变得黏稠时,吞咽音持续时间变短,音调变低^[9-10]。正常情况下,由于存在咳嗽反射和气道保护反射,食物或液体不易侵入气道。液体由于吞咽障碍而侵入气道时,就以声带为中心,构成了一个可产生振动波的混沌系统。这种系统的最典型表现,是吞咽障碍患者的“湿润样嗓音”,犹如健康人含一小口水在说话的声音。往往在发现吞咽障碍之前,患者会出现不明原因的肺部感染,同时伴有反复清嗓子动作和吞咽时的“水泡音”^[11]。

临床医学家关注吞咽音的历史可以追溯到上世纪60年代,当时一些研究者报道了利用声学处理方法检查吞咽过程中产生的各种声音。Lear等^[12]利用吞咽时甲状软骨上抬而施加于颈部绑带的压力,测算成人在24h内的吞咽次数。Hollshwandner等^[13]利用接触式麦克风在喉部皮肤表面记录吞咽音,测量从最后一次咀嚼到产生第一声吞咽音的时间间隔。虽然这些先驱推动了吞咽声学分析的发展,但是只停留在吞咽声学分析起步阶段,关于吞咽音的生理学基础尚不清楚,食团特性也缺少控制,而且缺少吞咽的行为学数据。另外,受到数据处理能力的限制,很多与吞咽关联的声音无法探测,相关参数难以解析,从而限制了吞咽声学分析的发展。近年来,由于各种参数和建模系统的发展,使吞咽声学分析变得可行。借助吞咽音及呼吸音的研究成果,声学分析有可能成为吞咽障碍的快速筛查手段和治疗评估工具。

2 吞咽声学与吞咽生理的关系

从生理过程来看,吞咽音的主要成分常常按特定时序出现,并且很少有变化。虽然吞咽音的缺失并不是吞咽障碍的明确信号,但反复出现的异常声音成分可能预示着吞咽功能受损^[14]。利用工程学和生理学原理,以嗓音学分析为指导,可对吞咽障碍患者吞咽音和呼吸音进行病理分析。在整个咽喉期,喉部闭合,呼吸暂停。这种停息状态使喉部从功能上的开放性气道转变为功能上的闭合性食道。Mckaig^[15]把停息状态时的吞咽音分为5个部分:

①起始音,是呼吸暂停前,潮式呼吸音减弱的一个短暂时期。②首爆音:可以直接听到的第一声爆发性声音,它发生于食团刚进入咽喉部的瞬间。③爆音间期:在首爆音之后,出现一个非常短暂的声音减弱时期。④次爆音:在首爆音之后很短时间内再次出现的第二次爆发性声音,它标志着食团正在通过咽喉部。⑤结束音:从次爆音结束到潮式呼吸音再次出现之间,出现的一段静默期。它标志着食团已经全部进入食管,咽喉部已经清空。首爆音和次爆音依次出现时,意味着食团推送成功。它们在吞咽音图上显示为两个波峰。从首爆音开始到次爆音结束所经历的时间,就是食团推送的总时长。结束音在吞咽音图上呈现为“安静逃逸波”。当潮式呼吸音再次出现时,标志着一次吞咽的咽部期终止。

参照Mckaig的标准,Borr等^[16]制定了与吞咽生理过程对应的吞咽音评估方案(表1)。该方案从健康吞咽音中提取6个时间段(表1前6个参数)。其中最重要,而且所有类型的吞咽动作(进食、饮水或空吞咽)都是有首爆音长和次爆音长。这两个音有可能会因为间隔太短而合并为一个连续音。如果在一口吞咽过程中实施多次咽下食物的动作,则动作次数可作为另一项评价吞咽质量的指标。通常第一次吞咽动作是研究重点。

3 吞咽声学与吞咽病理的关系

要把吞咽声学分析应用于临床,首先必须知道这种方法筛查吞咽障碍的敏感性和特异性。Santamato等^[9]用吞咽

表1 吞咽生理与声学参数对照表

声学参数	简写	生理过程(加'表示结束)
1 首爆前时长	ON	从吞咽时呼吸暂停开始到第一次爆发音的开始(DA-1B)
2 停息时长	DA	吞咽时呼吸暂停的开始到呼吸暂停结束(DA-DA')
3 首爆音长	1B	第一次爆发音经历的时间(1B-1B')
4 次爆音长	2B	第二次爆发音经历的时间(2B-2B')
5 食团运送时长	BTS	第一次爆发音的结束到第二次爆发音结束(1B'-2B)
6 次爆后时长	OFF	第二次爆发音的结束至吞咽时呼吸暂停结束(2B'-DA')
7 吞咽次数	D	将食团咽完所用的总下咽次数

10ml液体的形式,测算了15例吞咽障碍患者和60例健康受试者的平均吞咽时间,发现其具有显著性差异,敏感度为0.67(95%置信区间0.24—0.94),特异度为1(95%置信区间0.56—1.00),因而认为吞咽音的时间具有诊断意义。Borr等^[16]通过在健康青年人、健康老年人和吞咽障碍患者(以吞咽造影诊断)之间,进行吞咽音图的上述7个参数比较,发现老年组的时间参数都有大于青年组的趋势,但有显著差异的是停息时长。另外,老年人的首爆音平均时长比吞咽障碍患者长0.06s。如果仅靠人工颈部听诊,很难分辨这种微小差异,从而可能会把正常老年人误诊为吞咽障碍。吞咽次数可能成为另一鉴别线索,吞咽障碍患者往往需要实施多次吞咽动作才能吞完一口量,而健康老年人则能一次吞完。利用采集到的青年、老年和患者3组数据,Borr等还进一步招募了非专业人员、临床语言学学生(无颈部听诊经验,但有吞咽障碍专业知识)和言语治疗师(有颈部听诊经验)作为评估者来听诊这些吞咽音,以评判听诊的信度和效度。要求各评估者判断所听吞咽音是健康青年人、健康老年人,还是吞咽障碍患者。结果发现,这三类评估者诊断吞咽障碍的敏感度平均为62%,特异度是66%。如果只统计每组中给出同一诊断意见的多数派,则敏感度可达到80%,特异度达到90%。虽然仅凭听诊容易把健康老年人误诊为吞咽障碍,但这已经提示吞咽听诊是不错的吞咽障碍筛查法。另外,Borr等还要求每位评估者说出到底是声音的哪部分特征(参数)让他们做出如此判断。结果发现,所有评估者都认为录制的吞咽音“质量”好坏是评判吞咽障碍的重要因素,但是7个参数中,没有哪个参数能够显著预测专家的听诊结果。这一方面提示仅凭时长参数难以评估吞咽结构,另一方面也提示吞咽音已经携带了足以诊断吞咽障碍的信息,只是还有待发掘而已。

4 吞咽声学的分析技术发展

近年来,随着数据采集和处理能力的提高,吞咽声学分析得到长足发展。Eyigör等^[10]将146例健康受试者按年龄分成3组,发现年龄、性别、食团体积和食物黏稠度是正常吞咽时声学信号的影响因素。高年龄组受试者在吞咽初始时的声学变异,要大于其他年龄组,而且吞咽间期延长,在男性受试者尤为明显。久保高明等^[17]采用小波变换分析方法,对5例健康成人和3例吞咽障碍患者的吞咽音(水泡音)和呼吸音(湿性呼吸音)进行了研究,发现正常吞咽音是一种全频率、短时相的咔嚓声,吞咽障碍时的水泡音频率范围为300—600Hz。与健康呼吸音相比,湿性呼吸音在350Hz以上,而且声波呈分散起伏波形。

除了分析时间参数以外,借助隐马可夫模型或小波分析法等模式识别技术,可以分析吞咽音图的波形,来诊断吞咽障碍^[18—19]。通过排除言语和噪音的干扰,目前的识别率可达

到93%^[19]。Lazareck^[20]采用波形分维参数对患者和健康人的吞咽声音进行了辨识,发现加入分维参数后的算法可以区分患者和健康人的吞咽声。虽然大多数吞咽音集中于声波范围内,但Esteves等^[21]和Souza等^[22]认为,在次声波范围内分析饮水时的吞咽声学信号,更能避免外界干扰。Fontana等^[23]则认为基于次声波的评估方法并不能显著提高辨识率,提出应该使用基于频域的新模型,对声音进行分类学层面的解析,提取吞咽音独有的特征,来帮助区分吞咽音和其他声音。Yagi等^[24]提出可以借助吞咽音的频率和呼吸气流量来探查吞咽特异性的频率特征。Hsu等^[25]提出采用表面肌电结合声学分析来判断吞咽障碍的严重程度。

有一些关于嗓音与吞咽障碍关系的声学实验研究,认为传统的嗓音声学分析方法可靠性差,且效果不明显。但是,这些研究往往只观察吞咽音的时域特征,例如吞咽平均时间及吞咽时呼吸暂停时间,而未能利用更精确的信号处理和模式识别方法来分析频域特征,例如吞咽音的频率和时间序列信息^[9]。在对吞咽声音、语音和呼吸音的辨识中,Aboofazeli和Moussavi采用时域波形的分形维度和均方根,以及150—450Hz频域范围的平均强度这三个指标,作为神经网络分析的参数,发现它们对吞咽音有良好的辨识作用^[6]。Sazonov等^[7]利用傅里叶频谱、小波包变换和支持定向机来测试分类精度,通过监测20例不同肥胖程度的受试者在24h中的吞咽次数,发现利用这些处理方法可以有效区分吞咽音、嗓音、头部移动、食物摄取和环境噪音。在此基础上,通过监测吞咽频次数来评价摄食行为,同时使用吞咽音来区分固体和流质,可以诊断和治疗吞咽障碍^[8]。Murugappan等^[26]对“湿润样嗓音”进行了分析,分别检测了稀薄、中等和黏稠三种程度的液体进入声门时的嗓音,分别采用相空间、相关维度和李雅普诺夫指数三种变量进行分析。他们发现,相关维度和李雅普诺夫指数可以用于区分稀薄和粘稠液体引发的嗓音,而李雅普诺夫指数还可以用来区分稀薄和中等黏稠的液体。这一方面提示非线性分析指标有助于区分不同程度的吞咽障碍,另一方面,还提示非线性指标可以用来作为吞咽障碍患者饮食黏稠程度的指导。

5 前景展望

吞咽声学研究主要有两方面的发展前景。从方法论方面,结合新型数据分析手段(例如熵分析、时间序列网络分析等),发掘与临床现象联系更密切的新指标。从实践论方面,结合具体操作来发掘新的临床应用模式。例如,发挥吞咽声学检查的非侵入、无痛苦和低成本优势,开发临床筛查手段,甚至可以植入智能终端供老年人实施居家自查。又如,研究不同黏度级别食物的吞咽声学特征^[9],指导患者在实际进食或接受吞咽治疗时,应该配备什么黏度级别的食物。

参考文献

- [1] Singh S, Hamdy S. Dysphagia in stroke patients[J]. Postgrad Med J, 2006, 82(968):383—391.
- [2] Clavé P, Rofes L, Carrión S, et al. Pathophysiology, relevance and natural history of oropharyngeal dysphagia among older people[J]. Nestle Nutr Inst Workshop Ser, 2012, (72):57—66.
- [3] 王洪兵,李佩珍.老年人吸入性肺炎的诊治难点和对策[J].中华老年医学杂志,2006,25(5):325—327.
- [4] 何高按,高兴林,陈竹君.老年吸入性肺炎40例分析[J].广东药学院学报,2004,20(2):184—185.
- [5] Nakamura T, Yamamoto Y, Tsugawa H. Measurement system for swallowing based on impedance pharyngography and swallowing sound; proceedings of the Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2000 IMTC 2000 Proceedings of the 17th IEEE, F, 2000 [C]. IEEE.
- [6] Aboofazeli M, Moussavi Z. Automated classification of swallowing and breath sounds; proceedings of the Engineering in Medicine and Biology Society, 2004 IEMBS'04 26th Annual International Conference of the IEEE, F, 2004 [C]. IEEE.
- [7] Sazonov ES, Schuckers SA, Lopez-Meyer P, et al. Toward objective monitoring of ingestive behavior in free-living population[J]. Obesity, 2009, 17(10):1971—1975.
- [8] Sazonov ES, Makeyev O, Schuckers S, et al. Automatic detection of swallowing events by acoustical means for applications of monitoring of ingestive behavior[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2010, 57(3):626—633.
- [9] Santamato A, Panza F, Solfrizzi V, et al. Acoustic analysis of swallowing sounds: a new technique for assessing dysphagia[J]. J Rehabil Med, 2009, 41(8):639—645.
- [10] Eyigor S, Perlman AL, He X. Effects of Age, Gender, Bolus Volume and viscosity on Acoustic Signals of Normal Swallowing[J]. Turk J Phys Med Rehab, 2007, 53(9):4—9.
- [11] Koji T. Cervical Auscultation: Clinical Tool for Detecting Dysphagia(in Japanese) [J]. The Journal of Showa University Dental Society, 2005, 25(3): 167—171.
- [12] Lear CS, Flanagan JB Jr, Moorrees CF. The frequency of deglutition in man[J]. Arch Oral Biol, 1965, 10(1):83—100.
- [13] Hollshwandner CH, Brenman HS, Friedman MH. Role of afferent sensors in the initiation of swallowing in man[J]. J Dent Res, 1975, 54(1):83—88.
- [14] Cichero J, Murdoch B. What happens after the swallow? Introducing the glottal release sound[J]. Journal of Medical Speech-Language Pathology, 2003, 11(1): 31—41.
- [15] Mckaig T. Methoden in der klinischen Dysphagiologie [M]// STANSCHUS S. Auskultation-Zervikal und Thorakal. 2002: 111—137.
- [16] Borr C, Hielscher-Fastabend M, Lücking A. Reliability and validity of cervical auscultation[J]. Dysphagia, 2007, 22(3): 225—234.
- [17] 久保高明,内藤正美,湯ノ口万友,等.嚥下音 呼吸音の wavelet 解析の試み-頸部聴診法の応用[J].日摂食嚥下リハ会誌, 2004, 8(1): 64—68.
- [18] Aboofazeli M, Moussavi Z. Analysis of swallowing sounds using hidden Markov models[J]. Med Biol Eng Comput, 2008, 46(4):307—314.
- [19] Aboofazeli M, Moussavi Z. Automated extraction of swallowing sounds using a wavelet-based filter; proceedings of the Engineering in Medicine and Biology Society, 2006 EMBS'06 28th Annual International Conference of the IEEE, F, 2006 [C]. IEEE.
- [20] Lazareck L, Moussavi Z. Swallowing sound characteristics in healthy and dysphagic individuals; proceedings of the Engineering in Medicine and Biology Society, 2004 IEMBS'04 26th Annual International Conference of the IEEE, F, 2004 [C]. IEEE.
- [21] Esteves G P, Silva Junior E, Nunes L G, Greco C S, Melo P L. Configurable portable/ambulatory instrument for the analysis of the coordination between respiration and swallowing; proceedings of the Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2010 Annual International Conference of the IEEE, F, 2010 [C]. IEEE.
- [22] Souza CS, Júnior JA, Melo PL. A novel system using the Forced Oscillations Technique for the biomechanical analysis of swallowing[J]. Technol Health Care, 2008, 16(5): 331—341.
- [23] Fontana JM, Melo PL, Sazonov ES. Swallowing detection by sonic and subsonic frequencies: A comparison; proceedings of the Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC, 2011 Annual International Conference of the IEEE, F, 2011 [C]. IEEE.
- [24] Yagi N, Takahashi R, Ueno H, et al. Swallow-monitoring system with acoustic analysis for dysphagia; proceedings of the Systems, Man and Cybernetics (SMC), 2014 IEEE International Conference on, F, 2014 [C]. IEEE.
- [25] Hsu CC, Chen WH, Chiu HC. Using swallow sound and surface electromyography to determine the severity of dysphagia in patients with myasthenia gravis[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2013, 8(3): 237—243.
- [26] Murugappan S, Boyce S, Khosla S, et al. Acoustic characteristics of phonation in "wet voice" conditions[J]. J Acoust Soc Am, 2010, 127(4):2578—2589.