

· 综述 ·

基于表面肌电技术的脑卒中吞咽障碍评估研究进展

赵博伦^{1,2} 周兰姝¹¹海军军医大学护理系临床护理教研室,上海 200433; ²大连大学护理学院临床护理教研室,辽宁大连 116011

通信作者:周兰姝,Email:zhoulanshu@hotmail.com

【摘要】 针对目前表面肌电(sEMG)技术在脑卒中后吞咽障碍(PSD)评估上缺乏统一的评估标准及操作指南且至今未能在临床广泛应用的现状,本文对基于 sEMG 技术的吞咽功能评估及 PSD 评估与诊断的研究进展进行综述,并对不同表面电极在吞咽肌电信号采集及参数解读方法学上的优缺点进行分析与总结,拟为 PSD 的 sEMG 评估及诊断相关研究的深入开展提供依据。

【关键词】 表面肌电; 脑卒中; 吞咽功能; 吞咽障碍; 评估

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2021.07.019

吞咽是一个复杂的肌肉活动过程,需要口腔、咽、喉、食管内 30 多块肌肉进行精确的协调^[1],不同类型脑卒中会导致这些吞咽肌肉部分或全部功能障碍,导致脑卒中后吞咽障碍(post-stroke dysphagia, PSD);而这些吞咽肌肉运动功能的改变使得肌肉收缩产生的肌电信号变化与吞咽功能障碍密切相关。表面肌电(surface electromyography, sEMG)技术可以无创采集并分析吞咽相关肌肉电活动的定量信息,信效度良好^[2],具有客观、无创、无辐射、快速、短时间可反复检查等优点,非常适用于作为吞咽障碍的筛查和诊断工具^[3-4],且能在床边进行,对行动不便的脑卒中患者尤为适宜。近年来,sEMG 吞咽功能评估相关研究取得了一定成果,但由于评估标准与相关指南的缺乏^[5],至今临床上 sEMG 仍然未常规用于 PSD 评估与诊断^[6]。本文对不同 sEMG 技术在吞咽功能及 PSD 评估上的研究进展进行综述,旨在为 sEMG 对 PSD 诊断价值的进一步提高提供线索。

基于双极型结构表面电极的吞咽功能肌电评估

一、双极型表面电极的吞咽功能肌电评估

国内外研究者采用双极型结构表面电极以健康人和 PSD 患者为对象进行吞咽 sEMG 波形以及时阈、频阈参数分析^[7-9],证实了 sEMG 是吞咽功能评估的有效和可靠的工具。

Gupta 等^[10]1996 年首次使用 sEMG 成功识别口咽期吞咽浅表肌群的特征性电活动。Zhu 等^[11]发现,sEMG 可区分正常吞咽和 Mendelsohn 手法吞咽,进一步明确 sEMG 在正常吞咽行为的识别功能。目前国内外均有构建正常吞咽肌群肌电持续时间、平均振幅的标准数据库的报道^[12-14],其中口腔咽期由于受到意识的控制,肌电信号个体变异非常大^[15-19],不能作为吞咽功能评估的参考值,而咽期吞咽肌群电信号稳定,可用来作为评价依据,为吞咽障碍的评估提供了一定的参考依据,但由于 sEMG 信号受到多种复杂外界以及个体因素的影响,sEMG 标准数据库对吞咽功能评价的效力较低。

1.年龄与性别对吞咽 sEMG 信号的影响:研究表明^[12,17,20],咽期吞咽的主要浅表肌群颏下肌群和舌骨下肌群的肌电活动持续时间随年龄增加呈递增趋势,且年龄 70 岁以上受试者的

吞咽肌电活动持续时间明显延长,可见年龄是影响吞咽肌电活动的重要因素。有研究结果显示,性别差异不影响吞咽肌电信号^[12,17],然而此研究只针对个别吞咽肌群,不能说明整体吞咽过程肌电信号是否存在性别差异。男女性别颈部第二性征差异是否会影响吞咽肌电信号,仍需在完善肌电信号采集技术的基础上进一步验证。

2.不同吞咽模式及食团性质对吞咽 sEMG 信号的影响:吞咽的量和食团性质是 2 个重要影响因素^[7,12,17,20-21]。刘玲玲等^[22]对健康人静息状态、干咽、吞咽 5 ml 和 20 ml 水过程中颏下肌群及舌骨下肌群肌电活动的平均肌电值进行比较,结果显示,吞咽 20 ml 水相比吞咽 5 ml 水和干咽显现更高的平均肌电值,认为吞饮量越大吞咽肌电活动越活跃^[21,23];随着食团黏稠度或坚硬程度的增加,肌肉活动的肌电振幅以及持续时间也逐渐增加^[24-26],说明费力吞咽比正常吞咽需要更多的肌电活动。一般来说,吞咽的食物温度、口味之间的差异不会对吞咽肌电信号产生影响^[27-28],然而酸性食团会导致自发性吞咽次数的增加^[29]以及食管远端食团转运和清除时间延长,吞咽时间延长^[30]。可见,吞咽量、食团性质、酸性口味会显著影响吞咽肌电信号,因此 sEMG 吞咽肌电信号采集过程中要免引起偏差。

3.不同体位对吞咽 sEMG 信号的影响:不同体位以及头部姿势对吞咽相关肌群肌电活动会产生较为复杂的影响^[31],其中影响较大的是舌骨上肌群,而颏下肌群受到体位影响较小^[32]。身体从仰卧位(0°仰卧)到端坐位(90°端坐)过程中的不同倾斜角度(30°、60°)较仰卧位和端坐位呈现更少舌骨上肌群活动,其中以倾斜 60°角为最佳^[33],原因是倾斜体位可使气道入口高于咽部入口,食团在重力作用下更加容易靠近咽后壁,吞咽更加容易,因此相应吞咽肌活动降低。然而,针对此问题,研究结论并不完全一致,如 Shiino 等^[34]的研究结果显示吞咽肌电活动持续时间和振幅随着身体倾斜而显著增加,因此,身体倾斜体位具体如何影响吞咽过程中舌骨上肌电活动仍需进一步验证。另外,侧卧位时,卧侧舌骨上肌群在吞咽时的肌电振幅和持续时间均显著高于站立以及坐位^[35-36],原因是舌骨上肌群在维持头部位置上发挥着重要作用,侧卧时需要其更多的参与卧侧头部姿势的保持。亦有研究结果提示,胸廓直立坐姿较慵懒坐姿

和腰椎骨盆直立坐姿产生更小的舌骨上肌群肌电活动^[23],更加有利于吞咽。在头部姿势上,低头与抬头相比,可有效促进会厌覆盖气道入口,延长吞咽呼吸暂停时间,促进食团在咽部转运,吞咽肌群电活动较小^[37];伸头姿势可导致舌骨上肌群动的持续时间延长同时降低活动强度,从而导致吞咽困难^[38]。总之,体位和头部姿势对吞咽 sEMG 信号的影响大且较为复杂,现有标准数据库的构建多基于坐位和头部中立姿势,而多数 PSD 患者在体位与头部姿势的变换和维持上存在一定困难,因此未来构建 sEMG 的 PSD 评估标准时应充分考虑 PSD 患者运动功能障碍的现实问题。

4. 其他因素对吞咽 sEMG 信号的影响: Vaiman 和 Eviatar^[13]研究表明,拔牙、颞下颌关节疾病、反复发作的扁桃体炎可影响吞咽肌电信号;不同呼吸模式^[35]、皮肤或电极阻抗、躯体运动等^[11]也会对吞咽肌电信号产生干扰,如躯体运动会带动吞咽肌群的活跃,产生肌电信号的尾影;头转向一侧时,对侧肌电活动更加活跃,皮肤油脂或皮屑过多可导致阻抗增加,在采集吞咽肌电信号前必须做好充分准备,要求受试者应完全配合,用酒精去除皮肤表面的死皮和油脂以减小阻抗,从而提高信号采集的质量。此外,在吞咽信号采集过程中应充分考虑操作者的能力和水平,提前做好培训以最大程度减少人为因素影响,从而保证信号采集的准确性^[9]。

二、双极型表面电极的 PSD 评估

2007 年 Vaiman^[39]提出 sEMG 可对 PSD 进行有效识别, PSD 患者在各种吞咽任务下均体现出吞咽肌活动时间延长、波幅增加^[8,14,40-43]以及吞咽肌之间协调性差^[4]的特征性变化, sEMG 与目前临床常用且可靠性较高的 PSD 评估工具洼田饮水试验、标准吞咽功能评估(standardized swallowing assessment, SSA)、吞咽造影检查法(video fluoroscopic swallowing study, VFSS)评估结果具有高度的一致性^[44]和相关性^[45], sEMG 在 PSD 的定量评估上更具优势。

近年来, sEMG 作为 PSD 评估工具被广泛用于相关研究^[6,46-47],然而基于 sEMG 的 PSD 评估均是同等条件下组间比较或自身前后比较,尚无采用正常吞咽 sEMG 基线值对 PSD 进行评价的报道。分析其原因,其一是吞咽 sEMG 信号采集影响因素较多,尚无公认的操作指南与评估标准;其二是不同部位脑卒中导致的吞咽障碍部位以及范围差异大,吞咽 sEMG 参数横向及纵向比较很难实现。有研究显示,右侧脑半球卒中较左半球卒中^[48-49]、幕下卒中较幕上卒中^[50]导致的吞咽障碍更加严重且更有可能形成长期的吞咽障碍。一侧延髓病变通常口腔控制功能正常,但有明显的咽期吞咽困难;桥脑卒中通常导致咽部吞咽肌张力增高,造成咽期吞咽延迟或消失、单侧痉挛性咽壁瘫痪,以及喉上抬不充分合并环咽肌功能异常;皮质下卒中破坏感觉和运动通路,可造成口、咽期吞咽困难。可见,不同部位脑卒中导致吞咽 sEMG 信号变化非常复杂,因此可在吞咽 sEMG 评估中密切结合卒中发生部位及机制进行分析,以提高 sEMG 在 PSD 上的评估效力。

三、双极型表面电极在吞咽功能肌电评估上的局限性

目前,吞咽肌电评估在世界范围仍然没有形成指南^[5],标准的缺乏大大限制了其临床应用^[13],这与双极型结构表面电极自身的技术局限性有关。有研究者提出, sEMG 肌电信号的振幅和频率受到探测电极的位置、大小和方向等因素的共同作

用^[51-52],而这些因素在实际操作中很难控制,是导致偏倚的重要因素。双极型电极所记录的是电极下表浅肌群肌电活动的总和^[52],而来自几个分散电极的 sEMG 信号无法充分的提供完整吞咽过程浅表肌群的动态电生理特征。另外,参与吞咽的肌肉具有数量多、肌纤维细等特点,传统的贴片电极较大对形态较小的肌肉无法准确分析^[44]。因此,由于双极型电极的局限性以及吞咽相关肌肉(群)的生理特点,限制了其在吞咽功能评估上的应用。

基于高密度表面电极的吞咽功能肌电评估

一、高密度表面电极的吞咽肌电评估

高密度表面肌电(high density surface electromyography, HD-sEMG)是采用二维阵列式、多通道表面微电极紧密排列并覆于较大范围体表区域,同步与连续采集多肌群肌电信号,获得体表肌电信号的时间和空间分布信息,全面了解不同肌肉活动在时间和位置上的协同作用^[11],为全面分析吞咽肌群电活动的时空特性提供了新方法^[53-54]。HD-sEMG 可经过肌电信号分解分析单个运动单位(MU)的电活动信息^[55-56],且能得到肌肉的中枢神经系统控制信息^[57];HD-sEMG 还可进行肌电信号盲源分离,得到较深层吞咽肌肉(群)的信号。HD-sEMG 可将检测到的肌电信号形成动态肌电势图^[58],直观观察肌电信号的分布情况及随时间变化^[59]。总之,HD-sEMG 在肌电信号深度、广度、连续性以及直观性等方面更具优势,是一个非常前景的吞咽功能评估技术。

国内外的学者利用 HD-sEMG 在运动医学、康复医学等领域进行了大量的肌肉功能评价的探索性研究^[60-72]。在前颈部肌肉(群)功能评估上,有研究者采用 HD-sEMG 进行构音功能评估,能够识别低、高音发声以及静息情况下前颈部肌肉活动肌电信号的差异^[73],说明 HD-sEMG 在喉部功能的诊断和监测中具有很大潜力。在吞咽功能评估上,有研究者以健康人为对象进行了初步探索,Zhu 等^[11]采用 96 通道[6(竖)×16(横)]2D 阵列式高密度电极(微电极直径 10 mm,微电极之间距离 15 mm)分别记录了 12 例健康人静息状态以及分别吞咽 5、10 和 20 ml 水及稀芝麻糊和稠芝麻糊时的颈部吞咽群肌 HD-sEMG 信号,形成 25 帧动态肌电电势图,不同的肌电能量强度在图中以不同颜色映射颈部肌肉的动态肌电活动,通过对 25 帧电势图进行全局分析可获取吞咽过程肌电能量的最大均方根值(root mean square, RMS),结果提示随着饮水量的增加和食团黏稠度的增加,吞咽肌肌电能量逐渐增强,说明越费力的吞咽行为吞咽相关肌群肌电信号越强。与双极型电极相比,HD-sEMG 在信号差异分辨能力上具有明显优势。HD-sEMG 不但可直观显示头部转动导致的左右两侧吞咽肌电活动的差异,还可通过比较左右各 48 通道肌电信号平均 RMS 量化双侧对比效果,这对脑卒中引起单侧吞咽障碍的评估和诊断具有重要意义。

另外,根据吞咽行为的发生归根于多个肌群的协调作用,有研究者采用非负矩阵分解法以及方差系数对吞咽过程中颈部肌肉协调作用模块的数量进行了提取,结果显示吞咽过程中左右颈部肌群各有 5 个协调作用模块,能够充分代表吞咽活动的生物力学特征^[74],吞咽障碍情况下协调作用模块数量将减少,这为有效评估和诊断吞咽困难提供了一种新的分析方法。

未来基于 HD-sEMG 的吞咽功能评估中,可将高度复杂的吞咽运动简化为低维度的肌群协调作用模块,探索辨识能力强的可操作性吞咽障碍评估标准。

二、高密度表面电极 PSD 评估相关研究的不足

以往 HD-sEMG 吞咽功能评估相关研究从技术层面、人群覆盖面均不够充分;现有相关研究中,所使用的高密度电极由不可拉伸的电极阵列或多个小型传统电极组成^[11],降低信号传导效果且与皮肤贴合性不佳,严重影响肌电信号的采集质量;目前已有文献报道了弹性可拉伸高密度电极^[75],可有效提高颈面部吞咽肌电信号的采集质量。

另外,现有相关研究的目标人群只限于对少数健康人,尚无对 PSD 患者的 HD-sEMG 分析与探索,不能为 PSD 评估与诊断提供实质性参数依据与方法学借鉴,距离 HD-sEMG 作为 PSD 评估工具在临床推广仍有很大差距,必须从技术改良、扩大研究对象数量与范围、建立标准评估体系与规范化方法学等层面推进相关研究进程,促进 HD-sEMG 的 PSD 评估工具的完善与成熟。

对未来开展 PSD 肌电评估相关研究的几点启示

一、改良技术促进 PSD 肌电评估多样化发展

PSD 病情复杂,根据实际情况不同,吞咽功能评估目标也有所差异,应根据不同评估需求选择适当的电极类型,如高密度电极适合整体吞咽情况评估,局部吞咽肌群功能评估可选择双极型表面电极,当需进行个别运动单元以及深层肌肉进行评估时,针电极则是不可替代的^[52]。因此,基于各类电极在吞咽肌电信号采集与分析上侧重点不同,应分别从患者安全、技术层面以及影响因素控制上不断完善,以满足多样化的 PSD 评估需求。

二、通过多种评估手段联合提高 sEMG 评估效力

PSD 的肌电评估虽然具有客观性强、操作简单等优点,但由于较难形成统一的评估标准,导致其单独应用于 PSD 的评估与诊断效力较低。目前,临床上常用于 PSD 评估的工具众多,如吞咽造影、洼田饮水实验以及标准吞咽功能评估等,均具有较高的敏感度和特异度,未来可探索如何将肌电评估与其他评估工具联合应用,互相弥补局限性以提高对 PSD 的评估效力。

三、多角度探索吞咽肌电评估的方法

PSD 肌电评估影响因素众多,较难实现 sEMG 时阈与频域参数上统一标准,但基于其量化吞咽肌电活动的电生理特性具有重要的临床意义。因此,可以从吞咽肌电参数的分析与解读方法学角度深入探索如何对 PSD 特异性功能变化的识别,如吞咽模式、喉部运动与咽腔压力、吞咽反射、肌群协调运动模块等。

总结

相对于其它评估而言,sEMG 可实现以无创的方式从电生理的角度同时定性和定量评估吞咽功能的目的,对怀疑存在吞咽障碍的患者进行一个简单的 sEMG 筛查和早期诊断非常有意义。然而,目前仍有一些技术问题降低了 sEMG 在吞咽肌电信号采集与分析上的稳定性,导致横向和纵向评价很难实现,需从电极技术、吞咽肌电信号采集手段、参数分析方法学上不断

完善,并通过通过大量临床病例验证,为 PSD 的 sEMG 评估在临床推广奠定基础。

参 考 文 献

- [1] Shaw SM, Martino R. The normal swallow: muscular and neurophysiological control [J]. *Otolaryng Clin N Am*, 2013, 46 (6): 937-956. DOI:10.1016/j.otc.2013.09.006.
- [2] Malone A, Meldrum D, Gleeson J, et al. Reliability of surface electromyography timing parameters in gait in cervical spondylotic myelopathy [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2011, 21 (6): 1004-1010. DOI: 10.1016/j.jelekin.2011.09.003.
- [3] Giannantonio NM, Minisci M, Brunetti V, et al. Evaluation of pharyngeal muscle activity through nasopharyngeal surface electromyography in a cohort of dysphagic patients with acute ischaemic stroke [J]. *Acta Otorhinolaryngol Ital*, 2016, 36 (4): 295-299. DOI: 10.14639/0392-100x-1124.
- [4] Wang YC, Chou W, Lin BS, et al. The use of surface electromyography in dysphagia evaluation [J]. *Technol Health Care*, 2017, 25 (5): 1025-1028. DOI:10.3233/thc-170892.
- [5] Bolton CF, Benstead TJ, Grand'Maison F, et al. Minimum standards for electromyography in Canada: a statement of the Canadian Society of Clinical Neurophysiologists [J]. *Can J Neurol Sci*, 2000, 27 (4): 288-291. DOI:10.1017/s0317167100001013.
- [6] Kim HR, Lee SA, Kim K, et al. Submental muscle activity is delayed and shortened during swallowing following stroke [J]. *PM R*, 2015, 7 (9): 938-945. DOI:10.1016/j.pmrj.2015.05.018.
- [7] 王珽,田丽,饶江,等.正常中老年人咽期吞咽功能的表面肌电图研究 [J]. *中国康复理论与实践*, 2016, 22 (8): 932-935. DOI:10.3969/j.issn.1006-9771.2016.08.011.
- [8] Vaiman ME, Gabriel CH, Segal S. Rectified and filtered surface electromyography of continuous drinking in healthy adults [J]. *Laryngoscope*, 2005, 115 (1): 68-73. DOI: 10.1097/01.mlg.0000150673.53107.20.
- [9] Crary MA, Carnaby Mann GD, Groher ME. Identification of swallowing events from sEMG signals obtained from healthy adults [J]. *Dysphagia*, 2007, 22 (2): 94-99. DOI:10.1007/s00455-006-9059-y.
- [10] Gupta V, Reddy NP, Canilang EP. Surface EMG measurements at the throat during dry and wet swallowing [J]. *Dysphagia*, 1996, 11 (3): 173-179. DOI:10.1007/bf00366380.
- [11] Zhu M, Yu B, Yang W, et al. Evaluation of normal swallowing functions by using dynamic high-density surface electromyography maps [J]. *Biomed Eng Online*, 2017, 16 (1): 133. DOI:10.1186/s12938-017-0424-x.
- [12] 刘玲玲,帅浪,冯珍.中国正常成人咽期吞咽的表面肌电图研究:建立肌电活动持续时间标准数据库 [J]. *中国康复医学杂志*, 2013, 28 (3): 220-223. DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2013.03.006.
- [13] Vaiman M, Eviatar E. Surface electromyography as a screening method for evaluation of dysphagia and odynophagia [J]. *Head Face Med*, 2009, 5: 9. DOI:10.1186/1746-160x-5-9.
- [14] Vaiman M, Segal S, Eviatar E. Surface electromyographic studies of swallowing in normal children, age 4-12 years [J]. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 2004, 68 (1): 65-73. DOI:10.1016/j.ijporl.2003.09.014.
- [15] Musto F, Rosati R, Sforza C, et al. Standardised surface electromyography allows effective submental muscles assessment [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2017, 34 (1): 1-5. DOI: 10.1016/j.jelekin.2017.02.

- 008.
- [16] Dellavia C, Rosati R, Musto F, et al. Preliminary approach for the surface electromyographical evaluation of the oral phase of swallowing [J]. *J Oral Rehabil*, 2018, 45 (7) : 518-525. DOI: 10.1111/joor.12641.
 - [17] Vaiman M, Eviatar E, Segal S. Surface electromyographic studies of swallowing in normal subjects; a review of 440 adults. Report 1. Quantitative data; timing measures [J]. *Otolaryngol Head Neck Surg*, 2004, 131 (4) : 548-555. DOI: 10.1016/j.otohns.2004.03.013.
 - [18] Vaiman M, Eviatar E, Segal S. Surface electromyographic studies of swallowing in normal subjects; a review of 440 adults. Report 2. Quantitative data; amplitude measures [J]. *Otolaryngol Head Neck Surg*, 2004, 131 (5) : 773-780. DOI: 10.1016/j.otohns.2004.03.014.
 - [19] Vaiman M, Eviatar E, Segal S. Surface electromyographic studies of swallowing in normal subjects; a review of 440 adults. Report 3. Qualitative data [J]. *Otolaryngol Head Neck Surg*, 2004, 131 (6) : 977-985. DOI: 10.1016/j.otohns.2004.03.015.
 - [20] Poorjavad M, Talebian S, Ansari NN, et al. Surface electromyographic assessment of swallowing function [J]. *Iran J Med Sci*, 2017, 42 (2) : 194-200.
 - [21] Huckabee ML, Butler SG, Barclay M, et al. Submental surface electromyographic measurement and pharyngeal pressures during normal and effortful swallowing [J]. *Arch Phys Med Rehab*, 2005, 86 (11) : 2144-2149. DOI: 10.1016/j.apmr.2005.05.005.
 - [22] 刘玲玲, 帅浪, 冯珍. 正常成人咽期吞咽相关肌群的表面肌电图研究 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2013, 35 (12) : 963-966. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2013.12.013.
 - [23] Moon IY, Yi CH, Park IW, et al. Effects of sitting posture and bolus volume on activation of swallowing-related muscles [J]. *J Oral Rehabil*, 2020, 47 (5) : 577-583. DOI: 10.1111/joor.12934.
 - [24] 赵达桑, 何熙彤, 叶志刚. 吞咽障碍老年人吞咽不同性状食物时表面肌电信号特征分析 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2019, 41 (12) : 916-919. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2019.12.008.
 - [25] Corti G, Ghiggi A, Murelli M, et al. Surface electromyography pattern of masseter, orbicularis oris and submental muscles during swallowing of different consistencies in healthy subjects [J]. *Ital J Physiother*, 2012, 2 (2) : 65-73. DOI: 10.1016/j.physio.2011.04.002.
 - [26] Inagaki D, Miyaoka Y, Ashida I, et al. Influence of food properties and body posture on durations of swallowing-related muscle activities [J]. *J Oral Rehabil*, 2008, 35 (9) : 656-663. DOI: 10.1111/j.1365-2842.2008.01866.x.
 - [27] Miyaoka Y, Haishima K, Takagi M, et al. Influences of thermal and gustatory characteristics on sensory and motor aspects of swallowing [J]. *Dysphagia*, 2006, 21 (1) : 38-48. DOI: 10.1007/s00455-005-9003-6.
 - [28] Alves LM, Secaf M, Dantas RO. Effect of a bitter bolus on oral, pharyngeal and esophageal transit of healthy subjects [J]. *Arq Gastroenterol*, 2013, 50 (1) : 31-34. DOI: 10.1590/s0004-28032013000100007.
 - [29] Gurgor N, Beckmann Y, Hassanzadeh N, et al. Activity of facial and swallowing muscles during water and sour bolus deglutition in healthy adult humans [J]. *J Neurol Sci Turk*, 2017, 34 (2) : 173-183. DOI: 10.24165/jns.9875.16.
 - [30] Alves LM, Fabio SR, Dantas RO. Effect of bolus taste on the esophageal transit of patients with stroke [J]. *Dis Esophagus*, 2013, 26 (3) : 305-310. DOI: 10.1111/j.1442-2050.2012.01366.x.
 - [31] Inagaki D, Miyaoka Y, Ashida I, et al. Activity pattern of swallowing-related muscles, food properties and body position in normal humans [J]. *J Oral Rehabil*, 2009, 36 (10) : 703-709. DOI: 10.1111/j.1365-2842.2009.01994.x.
 - [32] Barkmeier JM, Bielamowicz S, Takeda N, et al. Laryngeal activity during upright vs. supine swallowing [J]. *J Appl Physiol*, 2002, 93 (2) : 740-745. DOI: 10.1152/jappphysiol.00380.2001.
 - [33] Sakuma T, Kida I. Relationship between ease of swallowing and deglutition-related muscle activity in various postures [J]. *J Oral Rehabil*, 2010, 37 (8) : 583-589. DOI: 10.1111/j.1365-2842.2010.02084.x.
 - [34] Shiino Y, Sakai S, Takeishi R, et al. Effect of body posture on involuntary swallow in healthy volunteers [J]. *Physiol Behav*, 2016, 155 : 250-259. DOI: 10.1016/j.physbeh.2015.12.024.
 - [35] De Mayo T, Miralles R, Barrero D, et al. Breathing type and body position effects on sternocleidomastoid and suprahyoid EMG activity [J]. *J Oral Rehabil*, 2005, 32 (7) : 487-494. DOI: 10.1111/j.1365-2842.2005.01453.x.
 - [36] Miralles R, Gutierrez C, Zucchini G, et al. Body position and jaw posture effects on supra- and infrahyoid electromyographic activity in humans [J]. *Cranio*, 2006, 24 (2) : 98-103. DOI: 10.1179/crn.2006.016.
 - [37] Krishnan G, Goswami SP. The effect of chin-down position and bolus volume on swallow-induced respiratory measures in young healthy adults [J]. *SN Compr Clin Med*, 2019, 1 (12) : 981-991. DOI: 10.1007/s42399-019-00150-w.
 - [38] Hanamoto H, Kadono K, Boku A, et al. Both head extension and mouth opening impair the ability to swallow in the supine position [J]. *J Oral Rehabil*, 2014, 41 (8) : 588-594. DOI: 10.1111/joor.12175.
 - [39] Vaiman M. Standardization of surface electromyography utilized to evaluate patients with dysphagia [J]. *Head Face Med*, 2007, 3 : 26. DOI: 10.1186/1746-160x-3-26.
 - [40] Ertekin C. Electrophysiological evaluation of oropharyngeal dysphagia in Parkinson's disease [J]. *J Mov Disord*, 2014, 7 (2) : 31-56. DOI: 10.14802/jmd.14008.
 - [41] 庄任, 方罡, 贺颖超, 等. 表面肌电图技术在脑卒中后吞咽障碍评估中的应用 [J]. *中国临床研究*, 2019, 32 (4) : 493-496. DOI: 10.13429/j.cnki.cjcr.2019.04.014.
 - [42] 孙全义, 陈雪丽, 李春梅, 等. 颏下肌群表面肌电信号评定脑卒中患者吞咽障碍的价值 [J]. *广西医科大学学报*, 2019, 36 (7) : 1104-1107. DOI: 10.16190/j.cnki.45-1211/r.2019.07.016.
 - [43] 刘玲玲, 冯珍. 表面肌电图技术在卒中后咽期吞咽功能障碍评估中的应用研究 [J]. *中国康复医学杂志*, 2017, 32 (5) : 534-538. DOI: 10.7666/d.Y2427114.
 - [44] 韩婕, 阎文静, 戴玲莉, 等. 表面肌电图在脑卒中吞咽障碍患者康复疗效评估中的应用研究 [J]. *中国康复医学杂志*, 2013, 28 (6) : 579-581. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2013.06.019.
 - [45] 吴霜, 刘春风, 楚兰, 等. 肌电生物反馈联合低频电刺激和康复训练对脑卒中后吞咽功能障碍的影响 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2017, 39 (5) : 332-335. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2017.05.003.
 - [46] Sun D, Xu W, Chen N, et al. Clinical effectiveness of intradermal needle-embedding therapy for swallowing function in stroke patients with dysphagia [J]. *Zhen Ci Yan Jiu*, 2018, 43 (2) : 118-122. DOI: 10.13702/j.1000-0607.170179.

- [47] Zhao LP, Liu L, Zhang CS, et al. Effect of He's Santong Needling Method on dysphagia after stroke: a study protocol for a prospective randomized controlled pilot trial[J]. Evid Based Complement Alternat Med, 2018, 2018: 6126410. DOI: 10.1155/2018/6126410.
- [48] Wilmskoetter J, Martin-Harris B, Pearson WG, et al. Differences in swallow physiology in patients with left and right hemispheric strokes [J]. Physiol Behav, 2018, 194: 144-152. DOI: 10.1016/j.physbeh.2018.05.010.
- [49] Smithard DG, O'Neill PA, Martin DF, et al. Aspiration following stroke: is it related to the side of the stroke[J]. Clin Rehabil, 1997, 11(1): 73-76. DOI: 10.1177/026921559701100111.
- [50] Kim YK, Cha JH, Lee KY. Comparison of dysphagia between infratentorial and supratentorial stroke patients[J]. Ann Rehabil Med, 2019, 43(2): 149-155. DOI: 10.5535/arm.2019.43.2.149.
- [51] 李芳, 安丙辰, 郑洁皎. 表面肌电图在脑卒中患者手神经肌肉功能评定中的应用[J]. 中国康复理论与实践, 2015, 31(3): 280-283. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9771.2015.03.009.
- [52] Stepp CE. Surface electromyography for speech and swallowing systems: measurement, analysis, and interpretation[J]. J Speech Lang Hear Res, 2012, 55(4): 1232-1246. DOI: 10.1044/1092-4388(2011/11-0214).
- [53] Staudenmann D, Kingma I, Daffertshofer A, et al. Heterogeneity of muscle activation in relation to force direction: a multi-channel surface electromyography study on the triceps surae muscle[J]. J Electromyogr Kinesiol, 2009, 19(5): 882-895. DOI: 10.1016/j.jelekin.2008.04.013.
- [54] Rojas-Martinez M, Mañanas MA, Alonso JF. High-density surface EMG maps from upper-arm and forearm muscles[J]. J Neuroeng Rehabil, 2012, 9: 85. DOI: 10.1186/1743-0003-9-85.
- [55] Van Dijk JP, Blok JH, Lapatki BG, et al. Motor unit number estimation using high-density surface electromyography[J]. Clin Neurophysiol, 2008, 119(1): 33-42. DOI: 10.1016/j.clinph.2007.09.133.
- [56] Yun P, Jinbao H, Yao B, et al. Motor unit number estimation based on high-density surface electromyography decomposition[J]. Clin Neurophysiol, 2016, 127(9): 3059-3065. DOI: 10.1016/j.clinph.2016.06.014.
- [57] Enoka RM. Physiological validation of the decomposition of surface EMG signals[J]. J Electromyogr Kinesiol, 2019, 46: 70-83. DOI: 10.1016/j.jelekin.2019.03.010.
- [58] Wang WY, Sang WW, Jin D, et al. The prognostic value of the iScore, the PLAN score, and the ASTRAL score in acute ischemic stroke[J]. J Stroke Cerebrovasc Dis, 2017, 26(6): 1233-1238. DOI: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2017.01.013.
- [59] 赵曜楠. 基于高密度表面肌电的吞咽功能评价方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [60] 王东清. 基于肌肉协同的肌电模式识别方法研究与应用探索[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [61] 黄成君. 基于高密度阵列表面肌电的肌肉肌腱单元解析及肌力估计[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [62] Glaser V, Holobar A, Zazula D. Real-time motor unit identification from high-density surface EMG[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2013, 21(6): 949-958. DOI: 10.1109/tnsre.2013.2247631.
- [63] Xiaoyan L, Holobar A, Gazzoni M, et al. Examination of post-stroke alteration in motor unit firing behavior using high density surface EMG decomposition[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2015, 62(5): 1242-1252. DOI: 10.1109/TBME.2014.2368514.
- [64] Hogrel JY. Clinical applications of surface electromyography in neuromuscular disorders[J]. Neurophysiol Clin, 2005, 35(2-3): 59-71. DOI: 10.1016/j.neucli.2005.03.001.
- [65] Drost G, Stegeman DF, van Engelen BG, et al. Clinical applications of high-density surface EMG: a systematic review[J]. J Electromyogr Kinesiol, 2006, 16(6): 586-602. DOI: 10.1016/j.jelekin.2006.09.005.
- [66] Hu Y, Siu SHF, Mak JNF, et al. Lumbar muscle electromyographic dynamic topography during flexion-extension[J]. J Electromyogr Kinesiol, 2010, 20(2): 246-255. DOI: 10.1016/j.jelekin.2009.05.002.
- [67] Hegyi A, Csala D, Péter A, et al. High-density electromyography activity in various hamstring exercises[J]. Scand J Med Sci Sports, 2019, 29(1): 34-43. DOI: 10.1111/sms.13303.
- [68] Jordanić M, Rojas-Martínez M, Mañanas MA, et al. A novel spatial feature for the identification of motor tasks using high-density electromyography[J]. Sensors, 2017, 17(7): 1597. DOI: 10.3390/s17071597.
- [69] 夏春雨. 上肢高密度 sEMG 特征分类研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
- [70] Martinez-Valdes E, Laine CM, Falla D, et al. High-density surface electromyography provides reliable estimates of motor unit behavior[J]. Clin Neurophysiol, 2016, 127(6): 2534-2541. DOI: 10.1016/j.clinph.2015.10.065.
- [71] Kyranou I, Vijayakumar S, Erden MS. Causes of performance degradation in non-invasive electromyographic pattern recognition in upper limb prostheses[J]. Front Neurobot, 2018, 12: 58. DOI: 10.3389/fnbot.2018.00058.
- [72] Murillo C, Martinez-Valdes E, Heneghan NR, et al. High-density electromyography provides new insights into the flexion relaxation phenomenon in individuals with low back pain[J]. Sci Rep, 2019, 9(1): 15938. DOI: 10.1038/s41598-019-52434-9.
- [73] Bracken DJ, Ornelas G, Coleman TP, et al. High-density surface electromyography: a visualization method of laryngeal muscle activity[J]. Laryngoscope, 2019, 129(10): 2347-2353. DOI: 10.1002/lary.27784.
- [74] Zhu MX, Samuel OW, Yang ZJ, et al. Using muscle synergy to evaluate the neck muscular activities during normal swallowing[J]. Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc, 2018, 2018: 2454-2457. DOI: 10.1109/embs.2018.8512760.
- [75] Kim M, Gu G, Cha KJ, et al. Wireless sEMG system with a Microneedle-Based High-Density Electrode Array on a Flexible Substrate[J]. Sensors, 2017, 18(1): 92. DOI: 10.3390/s18010092.

(修回日期: 2021-04-13)

(本文编辑: 汪 玲)