

脑卒中偏瘫下肢表面肌电信号样本熵用于痉挛性肌张力量化评估的研究*

龙耀斌¹ 农飞玉¹ 黄雅琳¹ 郭施扬² 张学涛² 陈琳^{2,3}

摘要

目的:探讨表面肌电信号样本熵与脑卒中偏瘫下肢腓肠肌痉挛等级的相关性。

方法:随机选取53例脑卒中恢复期患者为受试者,对偏瘫下肢腓肠肌进行改良Ashworth量表(modified Ashworth scale, MAS)评估,采用单通道无线蓝牙肌电传感器记录被动牵伸状态时腓肠肌表面肌电信号(surface electromyography, sEMG);引入样本熵计算方法提取sEMG的特征信息,分析其与痉挛等级的相关性,并对结果进行验证。

结果:对采集的sEMG进行熵值分析,结果显示MAS评估为0级、I级、I⁺级、II级、III级的偏瘫下肢腓肠肌sEMG样本熵分别为:0.6947±0.169、0.7951±0.244、0.8249±0.145、0.8305±0.232、0.9489±0.371,对样本熵进行线性拟合,发现样本熵均值曲线随痉挛等级的升高呈上升趋势,且样本熵与MAS相关($r=0.745, P<0.05$),进一步验证发现样本熵符合肌电信号特征与痉挛等级的映射关系。

结论:sEMG样本熵可用于脑卒中偏瘫肢体痉挛性肌张力的量化评估,有望为病理性痉挛的精准康复提供有效的检测及评估手段。

关键词 脑卒中;痉挛;表面肌电信号;样本熵

中图分类号:R743.3,R493 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1242(2023)-10-1379-05

Study on sample entropy of lower limb surface electromyography signal quantifying spastic muscle tone in stroke hemiplegia/LONG Yaobin, NONG Feiyu, HUANG Yalin, et al./Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2023, 38(10): 1379—1384

Abstract

Objective: To investigate the correlation between the sample entropy of sEMG and the spasticity grade of gastrocnemius muscle in stroke hemiplegia.

Method: 53 convalescent patients with stroke were randomly selected as subjects. The gastrocnemius muscle of hemiplegic lower limbs was evaluated by modified Ashworth scale (MAS). The surface electromyography (sEMG) of gastrocnemius muscle in passive stretching state was recorded by single channel wireless bluetooth EMG sensor. The sample entropy calculation method is introduced to extract the characteristic information of sEMG, analyze its correlation with spasm grade, and verify the results.

Result: The sample entropy of sEMG was analyzed. The results showed that the sample entropy of sEMG of gastrocnemius muscle in stroke hemiplegia assessed by MAS as grade 0, grade I, grade I⁺, grade II and grade III were 0.6947±0.169, 0.7951±0.244, 0.8249±0.145, 0.8305±0.232 and 0.9489±0.371, respectively. The sample entropy was linearly fitted. It was found that the average curve of sample entropy showed an upward trend with the increase of spasm grade, the sample entropy was correlated with MAS ($r=0.745, P<0.05$). It was further verified that the sample entropy accorded with the mapping relationship between myoelectric signal

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2023.10.008

*基金项目:广西自然科学基金面上项目(2022GXNSFAA035511);广西壮族自治区医疗卫生重点学科建设(桂卫科教发[2022]4号);广西创新驱动发展专项(桂科AA17204017-5)

1 广西医科大学第二附属医院康复医学科,南宁市,530007; 2 广西大学机械工程学院; 3 通讯作者

第一作者简介:龙耀斌,男,博士,主任医师; 收稿日期:2021-07-28

characteristics and spasm grade.

Conclusion: sEMG sample entropy can be used for quantitative evaluation of spastic muscle tone in hemiplegic limbs after stroke, and is expected to provide an effective means for accurate detection and evaluation of pathological spasticity.

Author's address The Second Affiliated Hospital of Guangxi Medical University, Nanning, 530007

Key word stroke; spasm; surface electromyography; sample entropy

痉挛是肌张力增高的一种表现形式,常见于脑卒中、脊髓损伤等上运动神经元损伤的患者^[1-2]。约46%的脑卒中患者在发病第一年即出现痉挛^[1],而在伴有中重度运动损伤的慢性脑卒中患者中,97%均存在肢体痉挛^[2]。这种肌张力异常增高的状态不利于患者建立正常的运动模式,进而出现疼痛、关节挛缩畸形、肌肉萎缩、姿势异常等问题,严重影响患者日常生活及心理健康^[3-4]。脑卒中的痉挛治疗是一个系统的过程,而客观可靠的痉挛评定结果是医师准确评估疗效和制订康复计划的重要依据^[5]。目前临床上多通过各种量表对痉挛性肌张力进行半定量评定,包括快速 PROM 评定、CSI 临床痉挛指数、Ashworth 量表等,其中改良 Ashworth 量表(modified Ashworth scale, MAS)最为常用^[6]。这些方法主观性强,测量方法缺乏一致性和可靠性^[5-6],需要一种基于定量方法的客观测量来准确估计痉挛,使其更适合评估和监测症状的后续治疗和康复。

表面肌电图(surface electromyography, sEMG)是一种用于了解被检测肌肉功能状况的无创的检查手段^[4-5],逐渐被应用于痉挛等级检测。不少研究通过对痉挛肌表面肌电信号进行时域分析,证实了表面肌电信号能反映痉挛程度^[7-8]。这些研究多进行常规时域分析,而表面肌电信号常表现为高复杂度、非线性甚至混沌图形,对此,熵等非线性方法在肌电信号的分析中具备较大优势^[9-12]。因此,本研究拟采集脑卒中恢复期患者痉挛腓肠肌的表面肌电信号,通过熵谱对肌电信号特征提取与分析研究,探究其与肌张力等级的对应关系,为肌肉痉挛量化标准和制定科学治疗方案提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取2020年12月—2021年4月在广西医科大学第二附属医院康复科住院的脑卒中恢复期患者

53例。男性37例,女性16例,右侧偏瘫27例,左侧偏瘫26例,年龄32—72岁,平均 56.4 ± 14.0 岁, MAS 评估为0级10例, I 级19例, I⁺级11例, II 级10例, III 级3例。

纳入标准:①符合2019年中华医学会神经病学分会专家共识^[13]中各类脑卒中诊断标准;②病情稳定、首次发生脑卒中,病程半个月到6个月;③精神状态及认知正常,并且愿意配合本实验的操作流程;④皮肤无破损,被动活动无障碍;⑤偏瘫侧肢体Brunnstrom分期II期及以上水平。

排除标准:①意识欠清、病情不平稳;②此次为第二次患脑卒中或既往已经发生多次;③因关节挛缩、软组织损伤等原因导致关节活动障碍无法进行 MAS 评定;④双侧偏瘫、脑外伤患者以及多发性硬化等非脑血管意外导致肌张力异常患者;⑤近期服用肌肉松弛剂如巴氯芬等药物或者局部注射过肉毒素等药物以缓解肌痉挛的患者。

1.2 数据采集

1.2.1 MAS 评分:由一名经验丰富的医师对所有患者进行痉挛等级评定,根据 MAS 评分表,被动活动患者肢体对肌张力的等级进行评估^[6],操作前1h要求患者维持卧位或坐位等安静状态,避免剧烈活动影响实验结果。

1.2.2 sEMG 数据的采集:实验设备:实验设备(图1左侧图片)主要包括单通道sEMG传感器(型号:ZJE-20D 无线sEMG传感器)、医用电极片以及数据采集上位机系统。上位机系统与sEMG传感器通过无线蓝牙传输数据,传感器采样频率设置为1024Hz。

采集方法:为避免剧烈活动对实验结果造成影响,患者保持坐/卧位安静状态1h后开始采集患者表面肌电信号。采集时患者需充分暴露待测下肢,首先由康复医师帮助清洁患者待测肌肉表面皮肤;然后,使患者仰卧于检查床,呈人体解剖位,康复医师评估患者腓肠肌肌张力等级并记录;最后,将电极

片贴在患者腓肠肌肌腹的位置并开启传感器进行数据采集,待肌电信号基线平稳后,医师带动患者肢体进行被动活动同时在上位机系统保存采集的数据。

为控制实验变量,减少实验结果干扰因素,确定下肢被动运动方式为:医师一手固定患者踝关节,一手握其足部,被动拉伸踝关节做前后反复动作引起牵张反射,根据患者的情况尽可能进行匀速运动,每位患者进行3次被动运动,每次约3s,期间休息30s避免引起肌肉疲劳^[7]。

1.3 统计学分析

本研究主要采用Matlab、SPSS统计软件对数据进行统计分析。首先将采集保存的数据导入Matlab进行数据预处理,选取数据为三次被动运动时采集到的肌电信号,去掉无效数据并滤波、降噪处理。然后计算不同MAS等级患者表面肌电数据(预处理后的)的样本熵。采用相关分析法等统计方法,利用Matlab软件中的曲线拟合工具箱对实验数据(肌张力等级与预样本熵数据)进行拟合,得到肌张力等级与

样本熵的定量拟合关系。使用SPSS软件对数据进行方差分析、Spearman相关分析等,计量资料采用均数±标准差表示,检验水准 $\alpha=0.05$ 。

样本熵计算过程中,需要两个重要参数值预定,即相似容限 r 和嵌入式维数 m 。选择合适的 r 值不会丢失太多的信息,可以推测系统的统计特性。

2 结果

2.1 数据采集结果

实验获得的表面肌电信号原始数据是传感器采集设备的原始A/D值,换算前没有单位,并且肌电信号采集设备为单电源供电,故将信号抬升后才能采集到负端信号,所以数据基线不是0。为使得数据更加直观,将其换算为电压单位。采集到的表面肌电信号数值与电压值呈线性关系((参考电压3.3v *AD值/数据位宽1024)/放大倍数1000/单位换算1000),按照此公式换算为电压后纵坐标单位为mv。图2(a)、(b)、(c)、(d)、(e)依次为MAS评估为0

级、I级、I⁺级、II级、III级的肌电信号图形,均表现为非线性、混杂的图形,无明显规律性。

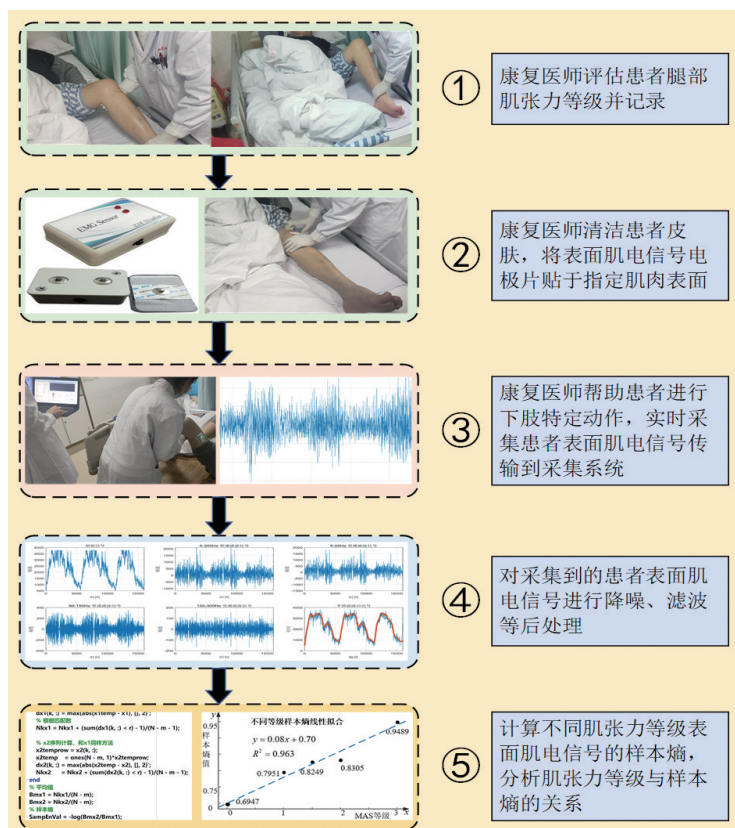
2.2 sEMG熵值分析

经计算,脑卒中偏瘫下肢腓肠肌MAS评估为0级、I级、I⁺级、II级、III级的sEMG样本熵分别为:0.6947 ± 0.169、0.7951 ± 0.244、0.8249 ± 0.145、0.8305 ± 0.232、0.9489 ± 0.371,见表1,相邻痉挛等级的标准差范围有部分重叠,但整体随痉挛等级的增加而增大,形成一定规律,且与MAS呈正相关($r=0.745, P<0.05$)。此外,相邻两组间进行了样本熵均值比较,发现I级与I⁺之间、I⁺级与II级之间的差异无显著性意义($P>0.05$),其余相邻两组间的样本熵均值具有显著性差异($P<0.05$)。

2.3 sEMG样本熵曲线拟合

对表1中各痉挛等级的样本熵进行线性、指数、多项式等类型的曲

图1 表面肌电信号采集及数据后处理流程图



线拟合,详见图3(a)、(b)、(c)、(d),反映了sEMG与痉挛等级的映射关系,横坐标x为MAS等级:0对应0级,1对应I⁺级,1.5对应I⁺级,2对应II级,3对应III级;纵坐标Y为样本熵。其中,图3(a)为对所有检测到的痉挛等级样本熵数据进行线性拟合结果,从线性拟合分析得到脑卒中偏瘫下肢腓肠肌样本熵与MAS等级的定量关系约为 $Y=0.08x+0.70$ 。图3(b)、图3(c)、图3(d)分别为去掉MAS为0级的样本熵数据后,进行指数函数曲线拟合、多项式曲线拟合、幂函数拟合结果,其中多项式曲线拟合中的残差 R^2 值最小,说明该曲线拟合的相关性相对较好,即 $Y=0.03x^2-0.06x+0.83$,从曲线及对应公式可看出样本熵随MAS的增大呈上升趋势。

2.4 样本熵验证

先计算出肌电信号的样本熵特征,再通过拟合的公式算出对应肌张力等级,最后与MAS比对进行算法验证。由于线性拟合简单而多项式曲线拟合残差 R^2 相对较小,故最终选择线性拟合及多项式曲线拟合进行实验验证。

选取偏瘫下肢腓肠肌MAS评估为0、I、I⁺、II的脑卒中患者各2例进行肌电信号采集,采用同上计算方式,求出相应样本熵,再通过线性拟合、多项式曲线拟合求出的x值对图3结果进一步验证,见表2。

3 讨论

sEMG利用放置在皮肤表面的电极片记录肌肉收缩时产生的电流,进而了解运动单位各种变化的

一种无创的检查手段。运动单位在单块肌肉中的数量、结构及放电特性,均可从表面肌电信号的不同变化形态反映^[4-5,14]。在此基础上,国内外学者提出了多种分析表面肌电信号的方法,并应用于神经肌肉疾病的临床评估和诊断。

谢平等^[7]主要通过反射肌电阈值对脑卒中偏瘫上肢痉挛肌sEMG进行分析,发现sEMG反射肌电阈值与MAS的相关具有显著性意义。Hui Wang等^[15]研究了基于sEMG和机械肌电图,使用支持向量机客观评估肘部痉挛的可行性,发现MAS与sEMG均方根振幅的相关性显著($P<0.05$)。谢平、Hui Wang等^[7,15]的研究表明sEMG特征提取包括如反射肌电阈值、均方根振幅等与MAS相关,均得出sEMG可用于量化评估痉挛性肌张力,此结论与本研究结果相一致。此外,刘莉等^[8]在通过sEMG技术研究小腿三头肌肌张力的过程中发现,小腿三头肌被动牵伸时sEMG均方根振幅值与MAS呈正相关,其中内侧腓肠肌的均方根振幅与MAS相关系数最高。通过前人的研究成果,发现将sEMG用于客观量化脑卒中偏瘫下肢腓肠肌痉挛等级具有一定可行性。而sEMG是一种非稳定性、非线性、低幅值信号,易被各种噪声和干扰波淹没。研究表明熵测度分析在对这类信号的分析处理方面,较肌电阈值、均方根振幅等分析方法具备更大的优势^[10-12]。

熵是动态系统复杂性和随机性的度量,描述了信息创建的速率,是一种检测生物医学信号复杂度的有效方法。而样本熵(sample entropy, SampEn)是熵测度分析的一种优化算法,能在保持近似熵优点的同时,较好地避免由于计入向量的自身匹配而引起的有偏性,具有更好的相对一致性^[10-12]。不少研究在通过SampEn分析包括sEMG在内的短生理时间序列方面具有较大进展^[11-12]。Zhang等^[12]将SampEn用于肌肉开始活动时表面肌电信号的检测,发现与传统振幅阈值或阈值扩展的方法相比,SampEn在有背景毛刺噪声的环境中具备良好的识别效果。Tang X等^[11]对采集到的表面肌电信号进行SampEn分析,发现样本熵分析法不仅简便、快捷,且能为医师提供脑卒中患者神经肌肉变化有价值的信息。因此,本研究通过表面电极片能无创、便捷地采集脑卒中偏瘫下肢腓肠肌sEMG,引入样本熵对sEMG进

表1 脑卒中患者腓肠肌不同痉挛等级肌电信号的样本熵

MAS 分级	例数	样本熵($\bar{x}\pm s$)	P 值
0级	10	0.6947±0.169	
I 级	19	0.7951±0.244	< 0.05
I ⁺ 级	11	0.8249±0.145	> 0.05
II 级	10	0.8305±0.232	> 0.05
III 级	3	0.9489±0.371	< 0.05

表2 样本熵痉挛等级实验验证结果

序号	样本熵(Y 值)	线性拟合 x 值	多项式曲线拟合 x 值	MAS
1	0.6576	- 0.53	-	0
2	0.7275	0.344	-	0
3	0.8049	1.311	1.403	I
4	0.7821	1.026	-	I
5	0.8487	1.859	2.274	I ⁺
6	0.8117	1.396	1.624	I ⁺
7	0.8650	2.063	2.472	II
8	0.8535	1.919	2.335	II

图2 不同痉挛等级的肌电信号

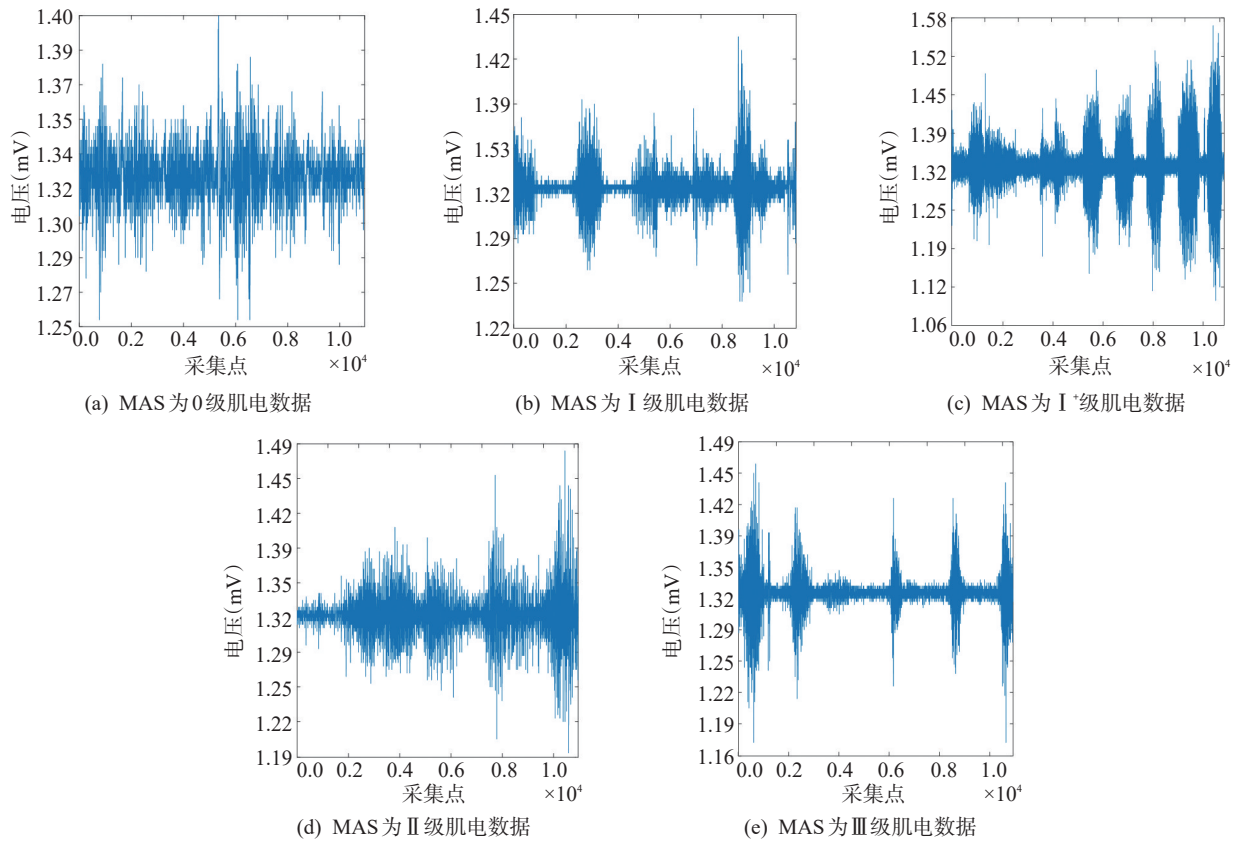
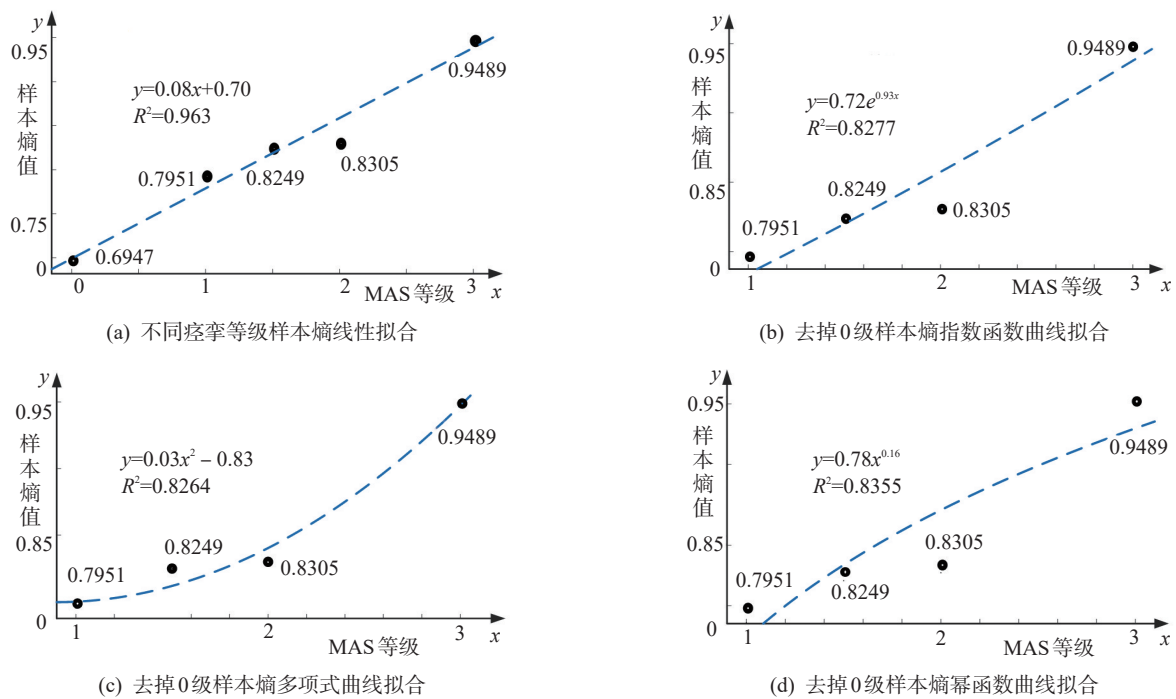


图3 sEMG样本熵曲线拟合



行分析,进而了解sEMG特征与痉挛等级的相关性。

在进行表面肌电信号采集过程中,研究者发现不同痉挛等级的sEMG图形表现为混杂、非线性的信号,无明显规律性(见图2)。经计算,脑卒中偏瘫下肢腓肠肌MAS评估为0级、I级、I⁺级、II级、III级的sEMG样本熵分别为:0.6947±0.169、0.7951±0.244、0.8249±0.145、0.8305±0.232、0.9489±0.371,样本熵值随痉挛等级的增加而增大,且与MAS相关($P<0.05$),相关系数为0.745表明样本熵与MAS等级呈中等程度的正相关。研究发现,I级与I⁺级、I⁺级与II级之间的样本熵差异无显著性意义,考虑与患者的年龄、性别、皮脂厚度以及进行操作时的噪音、电阻等因素相关^[14],同时不排除医师主观评估误差、患者情绪紧张等可能,后期研究需完善试验操作方法并进一步扩大样本量。在对样本熵进行线性拟合及曲线拟合后,从相应直线及曲线中均可发现样本熵与痉挛等级呈一定映射关系,样本熵均值曲线随痉挛等级的增加呈上升趋势(见图3)。通过进一步验证发现,经线性拟合求出的x值较多项式曲线拟合更能反映对应的MAS等级,说明线性拟合更具可靠性,但仍需扩大样本量进一步求证。

本研究结果表明,sEMG能反映脑卒中痉挛等级,可用于痉挛等级的量化评估,与其他学者的研究结论相一致,但在对sEMG分析处理方面,本研究所采用的熵测度分析较其他学者的分析更具优势、更可靠。实验采用单通道传感器设备,仅对腓肠肌进行检测,而一个被牵引动作的产生由多块肌肉共同参与,考虑单块肌肉的检测模式对结果产生一定影响,后续研究可采用对肌群sEMG进行检测分析的模式。此外,研究仅对痉挛肌肉sEMG样本熵进行分析,分析方法缺乏多元化,后续可采取多种分析方法综合验证肌电信号与痉挛等级的对应关系,建立痉挛等级量化常模,从而有望将之用于痉挛患者的诊断和疗效评估,促进精准康复的发展。

4 结论

sEMG样本熵与痉挛等级呈正相关,可用于脑卒中偏瘫肢体痉挛性肌张力的量化评估,有望为病理性痉挛的精准康复提供有效的检测及评估手段,具有临床实用价值。

参考文献

- [1] Urban PP, Wolf T, Uebele M, et al. Occurrence and clinical predictors of spasticity after ischemic stroke[J]. Stroke, 2010,41(9):2016—2020.
- [2] Pundik S, McCabe J, Skelly M, et al. Association of spasticity and motor dysfunction in chronic stroke[J]. Ann Phys Rehabil Med, 2019,62(6):397—402.
- [3] Gillard PJ, Sucharew H, Kleindorfer D, et al. The negative impact of spasticity on the health-related quality of life of stroke survivors: a longitudinal cohort study[J]. Health Qual Life Outcomes, 2015,13: 159.
- [4] Li S, Francisco GE. New insights into the pathophysiology of post-stroke spasticity[J]. Front Hum Neurosci, 2015, 9: 192.
- [5] Cha Y, Arami A. Quantitative modeling of spasticity for clinical assessment, treatment and rehabilitation[J]. Sensors (Basel), 2020,20(18):5046.
- [6] 李瑞青,任亚锋,吴明莉,等.脑卒中后肢体痉挛的评定研究进展[J].中国康复医学杂志,2018,33(6):742—725.
- [7] 谢平,宋妍,苏崇钦,等.脑卒中患者表面肌电信号与痉挛性肌张力关系分析[J].生物医学工程学杂志,2015,32(4):795—801.
- [8] 刘莉,高润,程欣欣,等.脑卒中患者小腿三头肌肌张力的表面肌电特征[J].临床神经病学杂志,2020,33(7):175—180.
- [9] Sun R, Song R, Tong KY. Complexity analysis of EMG signals for patients after stroke during robot-aided rehabilitation training using fuzzy approximate entropy[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2014,22(5):1013—1019.
- [10] 赵翠莲,马双驰,柳叶潇.基于样本熵和个体化阈值的表面膈肌肌电信号起点检测[J].生物医学工程杂志,2018,35(6):852—859.
- [11] Tang X, Zhang X, Gao X, et al. A novel interpretation of sample entropy in surface electromyographic examination of complex neuromuscular alternations in subacute and chronic stroke[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2018,26(9):1878—1888.
- [12] Zhang X, Zhou P. Sample entropy analysis of surface EMG for improved muscle activity onset detection against spurious background spikes[J]. J Electromyogr Kinesiol, 2012,22(6):901—907.
- [13] 中华医学会神经病学分会,中华医学会神经病学分会脑血管病学组.中国各类主要脑血管病诊断要点2019[J].中华神经科杂志,2019,52(9):710—715.
- [14] Chowdhury RH, Reaz MB, Ali MA, et al. Surface electromyography signal processing and classification techniques [J]. Sensors (Basel), 2013,13(9):12431—12466.
- [15] Hui Wang, Lei Wang, Yun Xiang, et al. Assessment of elbow spasticity with surface electromyography and mechanomyography based on support vector machine[J]. Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc, 2017,2017:3860—3863.