

· 临床研究 ·

网状脊髓束激活对上肢精细运动中预期性姿势调节的影响

夏楠¹ 何畅² 李颀安¹ 韩肖华¹ 徐江¹ 黄晓琳¹¹华中科技大学同济医学院附属同济医院康复医学科,武汉 430030; ²华中科技大学机械科学与工程学院数字制造装备与技术国家重点实验室,武汉 430030

通信作者:黄晓琳,Email: xiaolin2006@126.com

【摘要】 目的 观察不同难度的上肢精细任务中预期性姿势调节 (APA) 的特征变化,并探究网状脊髓束 (RST) 激活对其 APA 的影响。**方法** 本研究采用了双变量混合设计,包含 4 种不同测试任务和 3 中不同任务启动状态。共招募健康右利手男性 13 例进入测试。受试者须根据耳机中的声音提示随机完成前向触碰、杯状抓握、拇指夹卡片和小指夹卡片四种任务,各 10 次。每种任务测试中有一半的任务启动提示音为 114 dB 的白噪音,以诱发惊吓效应激活 RST;另一半为 80 dB 的嘟嘟声,作为常规对照。使用表面肌电记录受试双侧胸锁乳突肌、下斜方肌、背阔肌、腰段竖脊肌以及右侧三角肌、桡侧腕屈/伸肌的全程肌电。并在随后处理中,将肌电时域和频域指标转化为目标肌肉的启动反应时、达峰时间、激活延时、APA 或补偿性姿势调节 (CPA) 幅值等进行不同任务和刺激状态的对比分析。此外,研究中根据胸锁乳突肌 (SCM) 提前激活与否将 114 dB 测试任务分别归类为 SCM⁺ 和 SCM⁻ 作为不同启动态进行处理。**结果** RST 激活后,各任务中运动前反应时与肌肉收缩达峰时间均明显缩短 ($P < 0.01$)。SCM⁺、SCM⁻ 和普通状态下的三角肌反应时分别为 (106.89 ± 43.78) ms、(136.78 ± 48.74) ms 和 (168.60 ± 73.17) ms,且两两比较均存在显著区别 ($P \leq 0.01$)。同一状态下的对侧斜方肌下部和同侧背阔肌 APA 幅值显著增高 ($P < 0.05$),但肌肉启动时序和前臂肌肉 APA/CPA 幅值未见显著影响 ($P > 0.05$)。小指夹取任务中桡侧腕伸肌预期性肌肉激活延时较触碰任务显著缩短 [(-15.39 ± 5.02) ms 和 (4.45 ± 4.59) ms], 差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。**结论** 不同难度的上肢精细任务中仅桡侧腕伸肌表现出任务特异性的提前激活;RST 激活可以导致预期动作提前启动,并加速肌肉收缩和提高部分躯干肌 APA 幅值,但对前臂肌肉 APA/CPA 幅值没有显著影响。

【关键词】 网状脊髓束; 预期性姿势调节; 惊吓反应; 上肢精细运动**基金项目:**国家自然科学基金 (U1913601)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2023.01.007

The effects of activating the reticulospinal tract on anticipatory postural adjustments in fine motor movements of the upper extremities

Xia Nan¹, He Chang², Li Yangan¹, Han Xiaohua¹, Xu Jiang¹, Huang Xiaolin¹¹Department of Rehabilitation Medicine, Tongji Hospital, ²Institute of Rehabilitation and Medical Robotics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430030, China

Corresponding author: Huang Xiaolin, Email: xiaolin2006@126.com

【Abstract】 Objective To observe any dependence of anticipatory postural adjustment (APA) on the difficulty of fine upper limb tasks and to document any effect of reticulospinal tract (RST) facilitation on APAs during such tasks. **Methods** The study's bivariate mixed design involved 4 different tasks and 3 different priming states. Thirteen healthy, male, right-handed subjects were recruited. They were asked to complete the 4 tasks of reaching, grasping a cup, pinching a card using the thumb or using the little finger, respectively for 10 times 1 in response to two different starting cues delivered through an earphone. Half of the trials with each task were initiated with 114dB white noise to startle and activate the reticulospinal tract (RST), while the others were activated with 80dB beeps as a control. Electromyographic signals were recorded from the bilateral sternocleidomastoid (SCM), lower trapezius (LT), latissimus dorsi (LD), lumbar erector spinae and right anterior deltoid muscles and also from the right flexor and extensor carpi radialis muscles (ECR/FCR). In the subsequent processing the electromyographic time domain and frequency domain indicators were converted into a pre-motor reaction time, a time to muscle peak contraction, an activation latency, and APA or compensatory postural adjustment (CPA) amplitude of the tested muscles. These were compared among the different tasks and stimuli. In addition, the 114dB test tasks were classified as two different

priming status as SCM⁺ and SCM⁻ according to whether the sternocleidomastoid muscle (SCM) was activated in advance. **Results** After RST activation the pre-motor reaction time and the time to peak contraction of all of the muscles were significantly shortened in all of the tasks. The deltoid muscle reaction times in the SCM⁺, SCM⁻ and control states were (106.89±43.78) ms, (136.78±48.74) ms and (168.60±73.17) ms, respectively, and those differences are significant. The APA amplitudes of the contralateral LT and ipsilateral LD were significantly greater than normal, but the timing of muscle activation onset and the APA/CPA amplitudes of the ECR/FCR were not affected. The latency in the anticipatory muscle activation of the ECR in the little finger grip task was significantly shorter than that in reaching. **Conclusions** The extensor carpi radialis show task-specific early activation in fine tasks of the upper limbs with different difficulties. RST activation can lead to early starting of expected actions, accelerate muscle contraction and increase APA amplitude of some trunk muscles, but it has no significant effect on APA/CPA amplitudes in the forearm muscles.

[Key words] Reticulospinal tract; Anticipatory postural adjustment; Posture; StartleReact effect; Fine movement; Upper limb movement

Funding: National Natural Science Foundation of China (U1913601)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2023.01.007

预期性姿势调节 (anticipatory postural adjustments, APA) 和补偿性姿势调节 (compensatory postural adjustment, CPA) 作为最主要的两种中枢神经系统参与的姿势调节策略,共同发挥着维持平衡与运动表现的重要功能^[1]。相对于 CPA 而言,APA 发生于运动启动前,反应迅速,调节相对粗略,且模式固定,其代表着人体对预期扰动进行的提前响应^[1-3];APA 调节主动参与到活动调节中,能够根据不同扰动方向和幅度,调节全身预期性肌肉激活 (anticipatory muscle activation, AMA) 顺序,且呈固定模式^[4-5]。新近研究发现,AMA 的发生主要依赖网状脊髓束 (reticular spinal tract, RST)^[2],但也同时受到皮质脊髓束 (cortical spinal tract, CST) 的精细调控^[6]。前期研究提示,人体能够特异性地调节前臂桡侧腕伸肌 AMA 以应对不同前臂活动^[7]。然而,人体进行手部的精细操作和不熟练任务时,需要明确更多的 CST 支配控制。其中的 AMA 是否依然存在,模式是否改变尚不得而知。

以惊吓刺激诱导的惊吓反应 (startle-react effect, SE)^[8] 是典型 RST 激活特征的研究方法,为解析 RST 激活下 AMA 特征提供了可靠途径。既往研究表明,利用高分贝白噪音作为任务启动信号能够可靠地提高 RST 通路兴奋性^[8],且其诱发的胸锁乳突肌 (sternocleidomastoid muscle, SCM) 提前激活为 SE 特异性标志,与 RST 通路激活明确相关^[9]。本研究利用声音惊吓刺激作为任务启动信号,以 SCM 提前激活为 RST 激活唯一标志,旨在研究该通路激活下的前向够取物品精细活动中的躯干和上肢肌肉激活和 APA 特点,并同步观察手指精细操作与非熟练动作对上述指标的影响。本研究内容将有助于未来围绕 RST 通路启动或损伤修复的运动和康复治疗方案设计。

对象与方法

一、研究对象

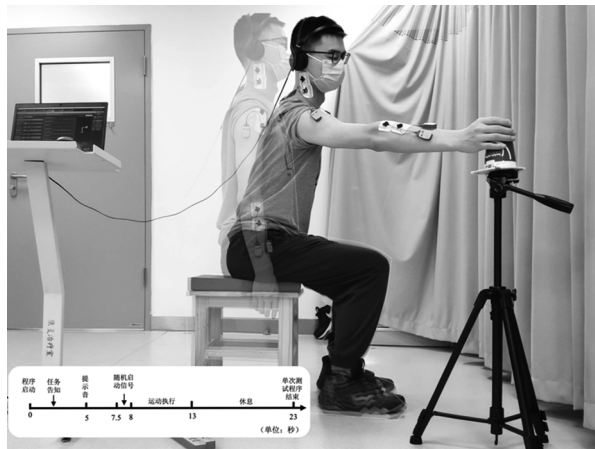
由不参与该研究数据采集的人员以海报形式招募在校男性研究生志愿者 13 例,均为右利手,平均年龄 (28.62±5.95) 岁,平均身体质量指数 (body mass index, BMI) 为 (23.79±3.14) kg/m²。要求近 1 个月内无明显运动损伤和其它身体不适,无明显皮肤过敏或破损,能够耐受间断性 114 dB 白噪音刺激。本研究方案通过同济医院伦理委员会审批 (批号 TJ-IRB20210648) 并完成预注册 (ChiCTR2100048222)。

二、实验过程

在温暖干燥的安静环境中,受试者着宽松衣裤坐于一高度可调节的无靠背及扶手的座椅上,并面向 1.5 m 外空白墙壁;调节座椅高度以保证受试者能够屈髋屈膝 90°维持自然舒适坐位,受试者双臂自然下垂置于体侧,掌心向内。将用于放置任务物品的置物架调节至 80% 受试者坐位下肩峰高度,放在受试者右外侧 45°方向,三脚架托盘距离肩峰 120% 臂长,用于摆放任务道具。受试者将根据耳机声音提示,尽量快速且准确地完成对应任务动作,包括指尖触碰托盘中心、杯状抓握纸杯、拇指对指夹取卡片、小指与环指夹取卡片;并使用运动相机全程记录 (如图 1 所示)。

受试者需根据任务前口头提示,按要求随机完成上述四种任务,每种重复 10 次,共计 40 次。40 次任务顺序为系统随机设置,每连续完成 10 次测试后休息 1 min。在每次测试启动的前 5 s 内,受试者会被口头告知即将开始的任务 (如抓杯子),并根据后续听到的连续三声嘟嘟声 (80 dB, 1000 Hz, 500 ms) 进入目标任务的运动准备。准备提示音后的 2.5~3.0 s 内,会随机发放运动启动指令 ‘Go’ 信号,以启动任务。‘Go’ 信

号有两种,一种是约 80 dB、40 ms 时长的嘟嘟声,一种则是 114 dB、40 ms 时长的白噪音^[10];两种声音信号分别出现 20 次,顺序随机,分别代表正常启动和声音惊吓刺激启动测试。每 2 次连续测试间设置有固定 15 s 休息,以保证受试者充分放松。所有测试前进行 5~10 次的任务熟悉和刺激耐受训练,以保证任务完成度。使用基于软件 Matlab(2017b 号 MathWorks 型,美国 Natick 公司)的 Psychtoolbox-3 组件进行实验程序设计。



注:图中人体的阴影部分为测试起始位置,非阴影部分为测试运动执行时位置(左下角白色方框内以时间轴方式展示了每次测试中单个任务的测试过程)

图1 任务测试演示(研究测试以杯状抓握为例)

三、表面肌电采集与处理

使用 Ultimu 表面肌电系统(Scottsdale,美国 Noraxon 公司)进行测试数据采集。局部皮肤酒精清洁后,将 4 对便携式无线表面肌电记录单元依次安置于双侧的 SCM、斜方肌下部、背阔肌、腰段竖脊肌肌腹处,并使用运动贴布将其固定于体表,以保证信号稳定;另 3 枚表面肌电单元被安置在右臂三角肌前束、桡侧腕伸肌和桡侧腕屈肌肌腹处。系统启动后,人工核对各肌肉随意收缩信号,确保稳定。

原始肌电数据导出后进行分割、数据滤波处理和 Teager-Kaiser 能量处理^[11]等。数据归一化后,使用阈值法获取肌肉激活启动时间点,阈值设定为启动信号发放时间点前的 250~500 ms 时间窗(基线窗)内的肌电信号幅值的均值加上 3 倍标准差^[7],并使用形态学检验^[12]进行最终数据验证。通过检查实验录像将任务执行错误和明显提前启动的测试剔除。将受试者右侧三角肌前束的肌肉激活时间点定义为 T_0 。进行后续处理并获取评价指标。

四、评估指标

阳性 SE 被定义为使用 114 dB 白噪音作为启动信号的‘Go’信号发生后 30~130 ms 内发生的任何一侧

SCM 激活启动^[7]。其对应的占有有效测试数的比例即为 SE 阳性反应率。对应的测试则标记为 SCM^+ 和 SCM^- 作为分组依据。

1.运动前反应时(premotor reaction time, PRT):为每次测试中启动信号‘Go’与对应三角肌前束启动 T_0 时间点之间的间隔时长。此外,如果该测试所获 PRT 短于 30 ms 或长于 400 ms,将被认定为不合格数据进行剔除。

2.激活达峰时间(time to peak, TP)^[13-14]:为每次测试中,右侧桡侧腕伸肌、桡侧腕屈肌和双侧的斜方肌下部、背阔肌及腰段竖脊肌从 AMA 激活到相应肌肉最大收缩幅值间的时间延迟。该指标能够直接反映运动中的肌肉收缩效率。

3.AMA 启动延时:为发生 AMA 的肌肉启动时间点与 T_0 间的时间延迟。AMA 发生被定义为 T_0 时间点的前 100 ms 至后 50 ms 时间窗(APA 时间窗^[15])内出现的对应肌肉激活启动。

4.APA 幅值与 CPA 幅值:分别为发生 AMA 的肌肉在对应 APA 时间窗和 CPA 时间窗^[16](T_0 时间点后 50~250 ms)内基于基线变化幅度的总积分(单位:倍)。

五、统计学方法

数据汇总后输入软件 SPSS 22.0 进行统计学分析处理,使用 Shapiro-Wilk 检验和 Q-Q 图评估定量数据的正态分布,非正态分布数据进行适当处理转换为正态分布数据纳入分析。采用一般线性模型进行数据分析,将 4 种测试任务和 3 种启动态作为固定因子纳入分析。初始模型包括上述两种固定因子的主效应、因子间交互效应和随机截距。因分析中未见两因子交互效应,随后将其剔除。事后比较采用 Bonferroni 矫正后输出结果。对于不满足方差齐性的数据进行单因素方差分析 Welch 矫正和 Tamhane's T^2 事后对比分析。显著性水平设置为 $P<0.05$ 。

结 果

所有受试者均完成全部 40 次测试,剔除异常启动和错误动作后受试者的平均有效测试数为 (35.77 ± 5.88) 次,其中 1 号受试者因三角肌记录单元松脱导致仅 20 次测试数据可用,共纳入 465 次测试数据进行分析(表 1)。

一、SE 阳性率及肌肉 AMA 发生率

13 例受试者的平均 SE 阳性率为 $(30.56 \pm 9.57)\%$,各待测肌肉 AMA 发生率由高到低依次为桡侧腕屈肌、桡侧腕伸肌、同侧下斜方肌、同侧背阔肌、对侧背阔肌、对侧下斜方肌、对侧腰段竖脊肌和同侧腰段竖脊肌。其中桡侧腕屈肌或伸肌与同侧下斜方肌的

表 1 受试者阳性 SE 比例及各肌肉预期性激活发生率

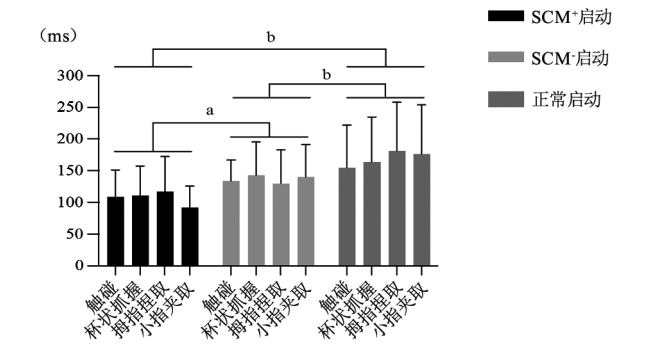
受试者 编号	有效测 试数(n)	阳性 SE 比例(%) *	肌肉预期性激活发生率(%)							
			桡侧腕伸肌	桡侧腕屈肌	同侧下斜 方肌	对侧下斜 方肌	同侧背阔肌	对侧背阔肌	同侧腰段 竖脊肌	对侧腰段 竖脊肌
1	20	30.00	90.00	80.00	85.00	55.00	90.00	60.00	85.00	80.00
2	40	27.50	95.00	95.00	77.50	42.50	45.00	27.50	22.50	25.00
3	31	51.61	64.52	64.52	54.84	41.94	38.71	54.84	3.23	29.03
4	39	33.33	56.41	51.28	33.33	35.90	30.77	20.51	30.77	23.08
5	40	27.50	60.00	77.50	52.50	45.00	65.00	52.50	37.50	52.50
6	33	30.30	66.67	69.70	72.73	30.30	45.45	51.52	24.24	54.55
7	38	36.84	68.42	71.05	76.32	50.00	55.26	55.26	47.37	42.11
8	39	35.90	76.92	82.05	82.05	53.85	82.05	79.49	23.08	30.77
9	40	27.50	85.00	92.50	80.00	40.00	70.00	30.00	30.00	35.00
10	39	38.46	87.18	84.62	79.49	58.97	51.28	30.77	53.85	53.85
11	37	13.51	89.19	72.97	89.19	48.65	37.84	43.24	45.95	51.35
12	30	16.67	73.33	73.33	90.00	40.00	50.00	43.33	33.33	20.00
13	39	28.21	84.62	84.62	64.10	10.26	82.05	41.03	23.08	28.21
均数	35.77	30.56	76.71	76.86	72.8	42.49	57.19	45.38	35.38	40.41
(标准差)	(5.88)	(9.57)	(12.68)	(11.73)	(16.56)	(12.59)	(19.00)	(15.99)	(19.88)	(17.25)

注: * 阳性 SE 比例是指在总有效测试中,惊吓刺激后任何一侧胸锁乳突肌出现提前激活表现的测试所占比例

AMA 发生率超过了 70%,同侧腰段竖脊肌和对侧的下斜方肌、背阔肌、腰段竖脊肌的 AMA 发生率低于 50%。双侧腰段竖脊肌因 AMA 发生率过低被排除在后续分析之外。详见表 1。

二、不同任务与不同启动态对 PRT 和各肌肉 TP 的影响

不同启动态对 PRT 存在显著的影响 ($F = 35.03$, $P < 0.001$),但不同任务间 PRT 并无区别 ($P > 0.05$)。基于不同启动态的事后分析显示,SCM⁺、SCM⁻和普通状态下的 PRT 分别为 (106.89 ± 43.78) ms、(136.78 ± 48.74) ms 和 (168.60 ± 73.17) ms,且两两比较均存在显著区别 ($P \leq 0.01$)。如图 2 所示。

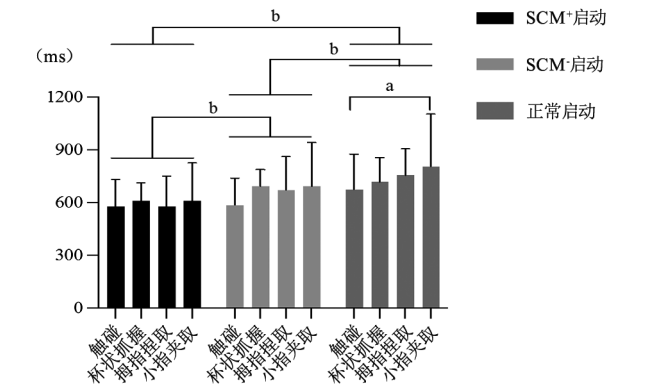


注: ^a $P < 0.05$, ^b $P < 0.01$; SCM⁺、SCM⁻和正常启动分别代表测试中使用惊吓刺激出现阳性反应、阴性反应和正常声音启动状态

图 2 四种任务中不同启动态下运动前反应时对比

三角肌前束 ($F = 11.18$, $P < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.11$)、同侧及对侧斜方肌下部 ($F = 8.76$, $P < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.12$; $F = 5.08$, $P = 0.006$, $\eta_p^2 = 0.05$) 的 TP 同时受到不同任务和不同启动态的明显影响。而桡侧腕屈肌和同/对侧

背阔肌仅受到启动态的明显影响 ($P < 0.001$)。桡侧腕伸肌的 TP 则仅受到不同任务的影响 ($F = 9.36$, $P < 0.001$)。SCM⁺、SCM⁻和普通状态下前臂及躯干所有待测肌肉的 TP 均呈现递增趋势,SCM⁺下的各肌肉的 TP 较普通状态均显著缩短 ($P < 0.05$)。图 3 列举了三角肌前束 TP 受不同启动态和任务的影响。



注: SCM⁺、SCM⁻和正常启动分别代表测试中使用惊吓刺激出现阳性反应、阴性反应和正常声音启动状态。 ^a $P < 0.05$, ^b $P < 0.01$

图 3 四种任务中不同启动态下三角肌收缩达峰时间对比

以上结果提示, RST 激活能够明显缩短 PRT, 且提高躯干及上肢肌肉的启动效率。三角肌前束、桡侧腕伸肌和双斜方肌下部的 TP 具有一定的任务特异性。

三、不同任务与不同启动态对各肌肉 AMA 启动延时的影响

肌肉 AMA 启动延时的分析结果提示, 仅桡侧腕伸肌的 AMA 启动延时存在显著的任务特异性 ($F = 3.23$, $P = 0.02$), 其中碰触任务中的桡侧腕伸肌 AMA 启动相较小指夹取卡任务显著延后 ($P = 0.04$), 如图

4a 所示。其他肌肉的 AMA 启动延时均未见显著区别 ($P>0.05$), 且未发现 SE 对 AMA 延时的显著影响 ($P>0.05$)。提示前臂的桡侧腕伸肌具有任务特异性 AMA 启动特征, 而 RST 激活对各肌肉 AMA 启动延时并不产生影响。

四、APA/CPA 幅值的任务特异性及不同启动态的影响

仅在桡侧腕伸肌 APA 幅值 ($F=3.01, P=0.03$) 和桡侧腕屈肌 APA ($F=3.15, P=0.02$) 及 CPA 幅值 ($F=6.84, P<0.001$) 上观察到显著任务特异性。进一步两两比较提示, 杯状抓握的桡侧腕伸肌 APA 幅值显著高于小指卡片夹取任务 ($P=0.02$), 如图 4b 所示; 而其桡侧腕屈肌 CPA 幅值则反而显著低于小指夹取任务 ($P<0.001$), 如图 4d 所示。且拇指夹取任务桡侧腕屈肌 APA 幅值显著高于触碰任务 ($P=0.02$), 如图 4c 所示。桡侧腕伸肌 APA 与桡侧腕屈肌 APA/CPA 幅值均存在显著相关性 ($r=0.32/-0.14, P<0.01$)。

且观察到不同启动态对对侧斜方肌下部和同侧背阔肌 APA 幅值存在影响 ($F=5.87, P=0.003; F=7.37, P=0.001$)。两块肌肉不同启动态下表现均提示惊吓启动能显著提高其 APA 幅度, SCM^{+/+} 较普通启动存在

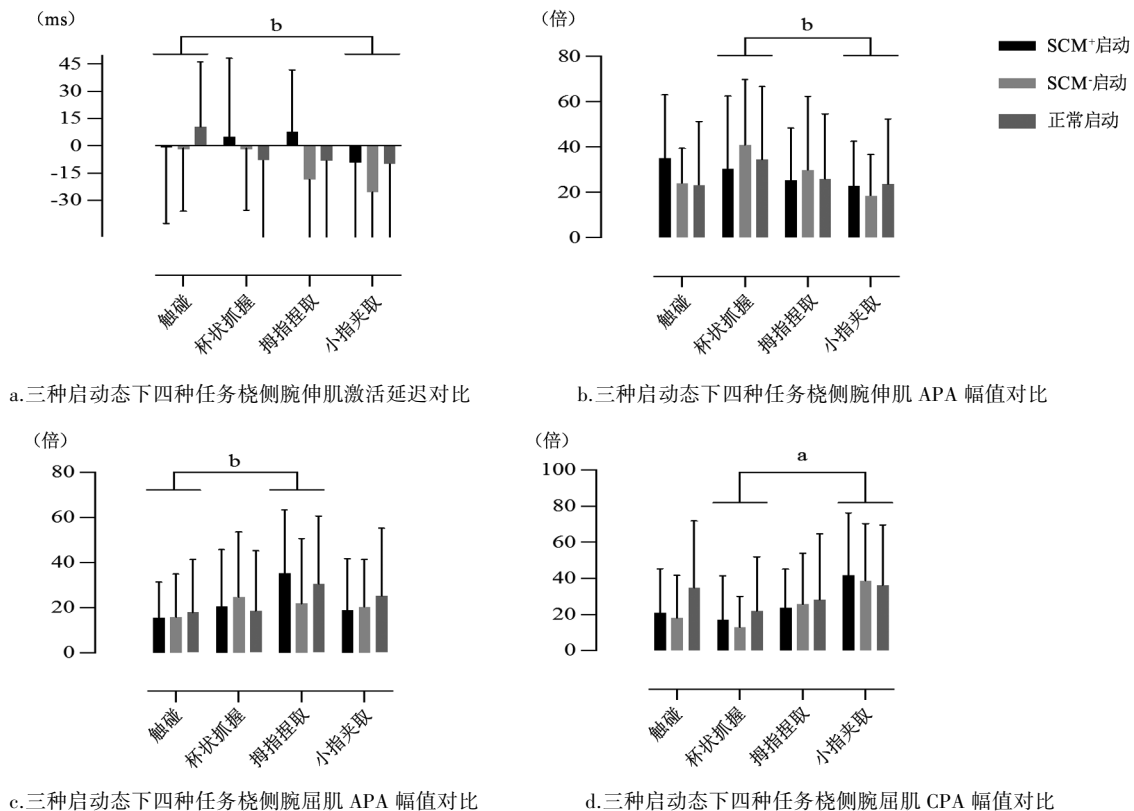
显著差别 ($P\leq 0.03$), 详见图 5a 和图 5b, 可以显著提高对侧斜方肌和同侧背阔肌 APA 幅值。

总之, 前臂桡侧腕屈伸肌 APA/CPA 幅值存在一定的任务特异性, 且 RST 激活对其影响较小。而躯干肌肉幅值变化对精细运动 AMA 调节并不敏感, 但受 RST 激活影响。

讨 论

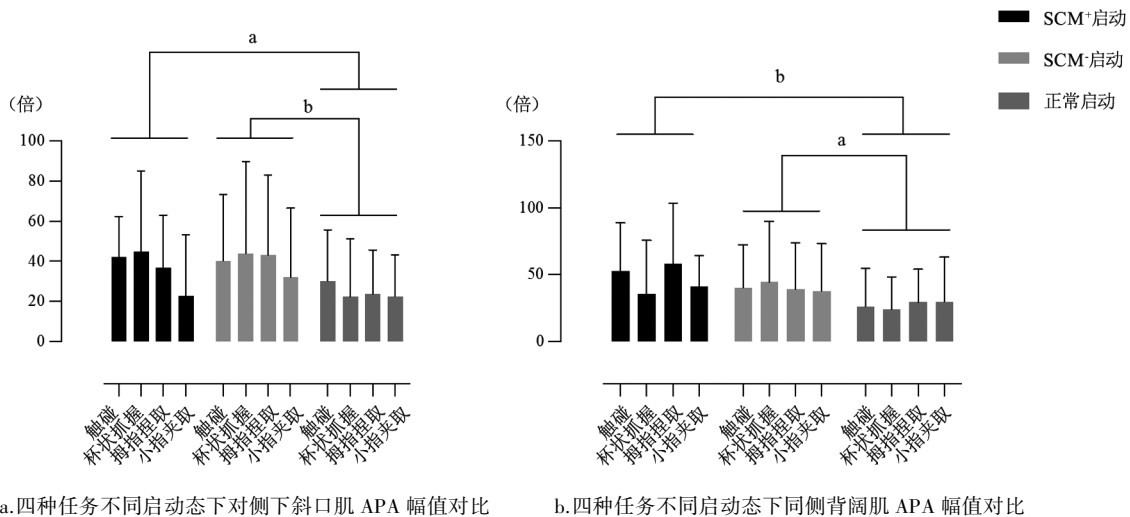
RST 是近期被关注的一个深度参与运动控制和平衡维持的神经通路。新近研究提示, RST 能在脑损伤后代偿 CST 功能, 与卒中后异常运动模式和痉挛密切相关^[17,18], 且对 APA 功能存在明显调节作用^[19]。研究中发现, RST 激活能够显著缩短运动前反应时, 导致预期动作提前发生, 并明显缩短躯干肌收缩达峰时间, 提高运动启动效率。尽管 RST 激活可以提高部分躯干肌 APA 幅值, 但对肌肉 AMA 时序和前臂肌肉 APA/CPA 幅值影响较小。此外, 前臂肌群对手指精细操作和非熟练任务的特异性 AMA 依然存在。

主流观点认为 APA 的下行神经调控涉及多个皮层结构^[20] 及脑桥延髓网状结构等^[21]。其主要利用 C/RST 进行外周表现调控, 且各自有所侧重^[2,17], RST 倾向于大致运动规划而 CST 倾向于精细运动调节。



注: ^a $P<0.05$, ^b $P<0.01$; SCM⁺, SCM⁻ 和正常启动分别代表测试中使用惊吓刺激出现阳性反应、阴性反应和正常信号启动状态

图 4 三种启动态下四种任务中桡侧腕屈/伸肌的 APA/CPA 幅值与桡侧腕伸肌激活延迟



a.四种任务不同启动态下对侧斜口肌 APA 幅值对比

b.四种任务不同启动态下同侧背阔肌 APA 幅值对比

注:SCM⁺、SCM⁻和正常启动分别代表测试中使用惊吓刺激出现阳性反应、不发生阳性反应和正常声音信号启动状态。^a $P<0.05$,^b $P<0.01$

图 5 四种任务中不同启动态下对侧斜方肌与同侧背阔肌 APA 幅值对比

损伤后以同侧支配为主的 RST 会充分参与到运动恢复过程^[22-23],对卒中后 APA 功能障碍的恢复有重要意义。惊吓刺激可以有效激活 RST 系统,为我们研究其在 APA 中的作用提供了可靠途径。然而,并非所有惊吓都能成功诱发明确的 RST 激活并表现在 AMA 上^[19],新近研究推荐将 SCM⁺作为 RST 充分激活的唯一标志^[24]。该研究采用同样处理,观察到相对于普通信号刺激,RST 激活下的三角肌启动提前了约 60 毫秒。这种在脑卒中患者身上同样存在的肌肉提前激活,有望成为改善卒中患者 APA 和运动表现的新技术手段。

该研究所涉及的上肢测试范式参考了基于 RST/CST 主导的上肢运动分类。躯干和上肢近端肌肉其 RST 支配成分较远端更多^[25],且更倾向于屈肌群控制^[17],而手指的某些肌群几乎不受 RST 影响^[26]。手指精细活动,特别是不熟练的手指精细活动,其 CST 支配比重更大。该研究在前向够物活动中设计不同 CST 支配比重的操作任务,以探究不同任务间的区别。结果提示,前臂水平的 AMA 在各种任务中广泛存在,且呈现一定的任务特异性。同时,我们观察到人体能够特异性调节桡侧腕伸肌的 AMA 激活提前发生以应对不同手部操作任务难度的提升,与先前研究结果保持一致^[7]。此外,不同手部任务中桡侧腕屈肌 APA/CPA 幅值也会产生变化,其与桡侧腕伸肌 APA 幅值变化存在显著耦联。这种屈伸肌群间 APA/CPA 耦联提示了存在于前臂的任务特异性 AMA 模式^[27]。

除了与前人研究结果一致的 RST 激活下肌肉提前激活和收缩效率提高外^[8],我们还观察到 RST 激活会导致躯干肌 APA 幅值升高,但对前臂肌肉 APA 幅值不产生影响,这种躯干与上肢肌肉间差异提示躯干

肌对 RST 激活更为敏感。出现这种现象的原因可能是由于 RST 对躯干和近端关节运动调控较强,而对末端精细运动调控较弱所致^[28]。因此,RST 可能在调节躯干肌 APA 幅值方面更占优势。

该研究也存在一定的局限性。首先,研究仅涉及了表面肌电采集分析,未能同步获取躯干重心摆动等运动学数据进行同步对比。其次,研究纳入样本较少且全部为男性右利手操作下的任务。但研究中将受试者视为随机区组因素纳入分析,相当于纳入分析的总样本量为 465,与既往类似研究要求测试重复数量相匹配^[29],能一定程度上避免个体差异带来的指标波动。未来将纳入合适的脑卒中患者以观察 CST/RST 损伤后神经重塑对 APA 调控的影响。

综上所述,该研究发现前臂肌肉存在针对手指精细活动和不熟练精细任务的特异性 AMA 调节。同时,RST 激活会导致预期动作提前启动,并提高肌肉启动效率,能够提高部分躯干肌 APA 幅值,但对肌肉 AMA 启动时序和前臂肌肉 APA/CPA 幅值没有影响。

参 考 文 献

- [1] Bouisset S, Do MC. Posture, dynamic stability, and voluntary movement[J]. Neurophysiol Clin, 2008, 38(6):345-362. DOI:10.1016/j.neucli.2008.10.001.
- [2] Cavallari P, Bolzoni F, Bruttini C, et al. The organization and control of intra-limb anticipatory postural adjustments and their role in movement performance[J]. Front Hum Neurosci, 2016, 10:525. DOI:10.3389/fnhum.2016.00525.
- [3] Yiou E, Caderby T, Hussein T. Adaptability of anticipatory postural adjustments associated with voluntary movement[J]. World J Orthop, 2012, 3(6):75-86. DOI:10.5312/wjo.v3.i6.75.
- [4] Chikh S, Watelain E, Faupin A, et al. Adaptability and prediction of anticipatory muscular activity parameters to different movements in the

- sitting position[J]. *Percept Mot Skills*, 2016, 123(1):190-231. DOI: 10.1177/0031512516656817.
- [5] Stamenkovic A, Hollands MA, Stapley PJ. Constancy of preparatory postural adjustments for reaching to virtual targets across different postural configurations[J]. *Neuroscience*, 2021, 455:223-239. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2020.11.009.
- [6] Honeycutt CF, Kharouta M, Perreault EJ. Evidence for reticulospinal contributions to coordinated finger movements in humans[J]. *J Neurophysiol*, 2013, 110(7):1476-1483. DOI: 10.1152/jn.00866.2012.
- [7] Xia N, He C, Li YA, et al. Startle increases the incidence of anticipatory muscle activations but does not change the task-specific muscle onset for patients after subacute stroke[J]. *Front Neurol*, 2021, 12: 789176. DOI: 10.3389/fneur.2021.789176.
- [8] Carlsen AN, Maslovat D. Startle and the StartReact effect: physiological mechanisms[J]. *J Clin Neurophysiol*, 2019, 36(6):452-459. DOI: 10.1097/WNP.0000000000000582.
- [9] Rangarajan V, Schreiber JJ, Barragan B, et al. Delays in the reticulospinal system are associated with a reduced capacity to learn a simulated feeding task in older adults[J]. *Front Neural Circuit*, 2022, 15: 681706. DOI: 10.3389/fncir.2021.681706.
- [10] Leow LA, Uchida A, Egberts JL, et al. Triggering mechanisms for motor actions: the effects of expectation on reaction times to intense acoustic stimuli[J]. *Neuroscience*, 2018, 393:226-235. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2018.10.008.
- [11] Solnik S, Rider P, Steinweg K, et al. Teager-Kaiser energy operator signal conditioning improves EMG onset detection[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2010, 110(3):489-498. DOI: 10.1007/s00421-010-1521-8.
- [12] Yang D, Zhang H, Gu Y, et al. Accurate EMG onset detection in pathological, weak and noisy myoelectric signals[J]. *Biomed Sign Proc Control*, 2017, 33:306-315. DOI: 10.1016/j.bspc.2016.12.014.
- [13] De Luca CJ, Adam A, Wotiz R, et al. Decomposition of surface EMG signals[J]. *J Neurophysiol*, 2006, 96(3):1646-1657. DOI: 10.1152/jn.00009.2006.
- [14] Haddas R, Cox J, Belanger T, et al. Characterizing gait abnormalities in patients with cervical spondylotic myelopathy: a neuromuscular analysis[J]. *Spine J*, 2019, 19(11):1803-1808. DOI: 10.1016/j.spinee.2019.06.005.
- [15] Smith JA, Ignasiak NK, Jacobs JV. Task-invariance and reliability of anticipatory postural adjustments in healthy young adults[J]. *Gait Posture*, 2020, 76:396-402. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2020.01.003.
- [16] Santos MJ, Kanekar N, Aruin AS. The role of anticipatory postural adjustments in compensatory control of posture: 1. Electromyographic analysis[J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2010, 20(3):388-397. DOI: 10.1016/j.jelekin.2009.06.006.
- [17] Smith V, Maslovat D, Drummond NM, et al. High-intensity transcranial magnetic stimulation reveals differential cortical contributions to prepared responses[J]. *J Neurophysiol*, 2019, 121(5):1809-1821. DOI: 10.1152/jn.00510.2018.
- [18] Ko SH, Kim T, Min JH, et al. Corticoreticular pathway in post-stroke spasticity: a diffusion tensor imaging study[J]. *J Pers Med*, 2021, 11(11):151-156. DOI: 10.3390/jpm1111151.
- [19] Yang CL, Creath RA, Magder L, et al. Impaired posture, movement preparation, and execution during both paretic and nonparetic reaching following stroke[J]. *J Neurophysiol*, 2019, 121(4):1465-1477. DOI: 10.1152/jn.00694.2018.
- [20] Palmer E, Cafarelli E, Ashby P. The processing of human ballistic movements explored by stimulation over the cortex[J]. *J Physiol*, 1994, 481(Pt2):509-520. DOI: 10.1113/jphysiol.1994.sp020459.
- [21] Yang CL, Gad A, Creath RA, et al. Effects of transcranial direct current stimulation (tDCS) on posture, movement planning, and execution during standing voluntary reach following stroke[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021, 18(1):5-8. DOI: 10.1186/s12984-020-00799-8.
- [22] Taga M, Charalambous CC, Raju S, et al. Corticoreticulospinal tract neurophysiology in an arm and hand muscle in healthy and stroke subjects[J]. *J Physiol*, 2021, 35:81-88. DOI: 10.1113/JP281681.
- [23] Senesh MR, Barragan K, Reinkensmeyer DJ. Rudimentary dexterity corresponds with reduced ability to move in synergy after stroke: evidence of competition between corticoreticulospinal and corticospinal tracts[J]. *Neurorehabil Neur Repair*, 2020, 34(10):904-914. DOI: 10.1177/1545968320943582.
- [24] Maslovat D, Sadler CM, Smith V, et al. Response triggering by an acoustic stimulus increases with stimulus intensity and is best predicted by startle reflex activation[J]. *Scient Rep*, 2021, 11(1):8-11. DOI: 10.1038/s41598-021-02825-8.
- [25] Jang SH, Choi BY, Kim SH, et al. Injury of the corticoreticular pathway in subarachnoid haemorrhage after rupture of a cerebral artery aneurysm[J]. *J Rehabil Med*, 2015, 47(2):133-137. DOI: 10.2340/16501977-1896.
- [26] Carlsen AN, Chua R, Inglis JT, et al. Differential effects of startle on reaction time for finger and arm movements[J]. *J Neurophysiol*, 2009, 101(1):306-314. DOI: 10.1152/jn.00878.2007.
- [27] Caronni A, Cavallari P. Anticipatory postural adjustments stabilise the whole upper-limb prior to a gentle index finger tap[J]. *Exp Brain Res*, 2009, 194(1):59-66. DOI: 10.1007/s00221-008-1668-2.
- [28] Tazoe T, Perez MA. Cortical and reticular contributions to human precision and power grip[J]. *J Physiol*, 2017, 595(8):2715-2730. DOI: 10.1113/jp273679.
- [29] Frykberg GE, Grip H, Murphy MA. How many trials are needed in kinematic analysis of reach-to-grasp? A study of the drinking task in persons with stroke and non-disabled controls[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021, 18(1):101. DOI: 10.1186/s12984-021-00895-3.

(修回日期:2022-10-20)

(本文编辑:汪 玲)