

· 临床研究 ·

腕关节等长屈曲和伸展肌力训练的交叉迁移现象及其机制研究

齐燕 师东良 曹龙军 田强 黄力平

【摘要】目的 观察右腕等长屈曲和伸展训练能否产生交叉迁移现象并研究及其机制。**方法** 将健康女性青年志愿者 20 例按随机数字表法分为训练组和对照组,每组 10 例。训练组进行 6 周的右腕等长屈曲和伸展训练,左腕不进行训练,对照组不进行任何训练。2 组受试者均于训练前和训练 6 周后(训练后)测定其腕屈、伸肌等长肌力(PT)及表面肌电变化。**结果** 训练后,训练组右腕关节最大等长屈曲和伸展 PT 与组内训练前和对照组训练后比较,均显著提高($P < 0.05$),且训练组左腕关节最大等长屈曲和伸展 PT 分别为(12.9 ± 2.0)Nm 和(6.4 ± 1.3)Nm,与组内训练前和对照组训练后比较,差异均有统计学意义($P < 0.05$)。训练后,训练组右腕关节经最大等长伸展测试,其尺侧腕伸肌的 AV 与组内训练前和对照组训练后比较,差异均有统计学意义($P < 0.05$);且训练组左腕关节经最大等长伸展测试,其尺侧腕伸肌的 iEMG 与组内训练前和对照组训练后比较,差异均有统计学意义($P < 0.05$)。**结论** 右腕等长屈曲和伸展训练后可改变前臂肌群募集策略,增强双侧前臂肌力,产生交叉迁移现象。

【关键词】 交叉迁移; 积分肌电值; 随意最大等长收缩; 力量训练

Inter-hand transfer of the effects of unilateral isometric resistance training for wrist flexion and extension Qi Yan*, Shi Dongliang, Cao Longjun, Tian Qiang, Huang Liping. * Department of Health and Exercise Science, Tianjin University of Sports, Tianjin 300381, China

Corresponding author: Huang Liping, Email: 13194664018@163.com

【Abstract】Objective To investigate the effects on one hand of training the other with isometric wrist extension and flexion training and its underlying mechanism. **Methods** Twenty healthy young girls were recruited and randomized into a training group and a control group with 10 subjects in each, using a random number table. The subjects in the training group were accepted isometric training of the wrist extensors and flexors on the right side once every other day, 4 days a week for 6 weeks according to a pre-programmed protocol, while those in the control group had no intervention. Peak torque and surface electromyography (sEMG) were recorded and assessed before and after 6 weeks of training. **Results** In the training group, the average peak torque of right wrist flexion and extension were both significantly higher than before training (within-group comparison) and higher than in the control group (between-group comparison) after 6 weeks of training. The average peak torques of the left wrist in the training group in flexion and extension were (12.9 ± 2.0) Nm and (6.4 ± 1.3) Nm after training, both significantly higher than before the training and stronger than the control group. In the sEMG traces during wrist extension, after training the ascend velocity of the right extensor carpi ulnaris and the integrated area of the left extensor carpi ulnaris in the training group were significantly smaller than before training and in the control group. **Conclusion** Unilateral isometric resistance training of the wrist muscles can transfer to the contralateral side, probably by altering muscle recruitment.

【Key words】 Contralateral recruitment; Electromyography; Maximal voluntary contraction; Muscle strength training; Wrist strength

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2015.02.005

基金项目: 中国教师发展基金会“关爱特教园丁”专项基金(2014GATJYD_Y06); 上海高校青年教师培养资助计划(ZZjdyx13073); 上海交通大学医学院“优秀青年教师”培养计划

作者单位: 300381 天津, 天津体育学院、天津市康复医学研究所、天津市运动生理学及运动医学重点实验室(齐燕、曹龙军、田强、黄力平); 上海市养志康复医院(上海市阳光康复中心)(齐燕); 上海交通大学医学院附属新华医院(师东良)

通信作者: 黄力平, Email: 13194664018@163.com

交叉迁移是指训练一侧肢体不仅可增强该侧肢体的肌肉力量, 同时也可增强未接受直接训练的对照侧肢体肌力的概念^[1,2]。目前, 与交叉迁移相关的研究主要集中于较大抗重力肌群, 如膝关节伸肌群、膝关节屈肌群、肘关节屈肌群和小腿肌群等^[3,4], 鲜见关于前臂肌群(日常生活和体育运动时常用)交叉迁移现象的研究。

肌力的增强主要受肌肉生理横截面积和神经系统支配肌肉能力的影响, 但研究发现交叉迁移所致

的肌力增长并未伴随肌肉体积的增大而增强。因此多数学者认为,交叉迁移现象的机制主要与神经适应有关^[5-6]。本课题组假设,单侧腕关节屈曲和伸展肌力训练不仅可以增长其本身肌力,同时存在交叉迁移现象。

本研究采用 Cybex 测力系统观察腕关节最大等长随意收缩(maximal isometric voluntary contractions, MIVC)屈曲和伸展训练对肌力的影响是否存在交叉迁移现象,并采用表面肌电图(surface electromyography, sEMG)技术对其机制进行初步的研究。

资料与方法

一、研究对象

入选标准:①均为右利手,且未经过专项体育训练,身体健康;②受试前无任何不适,过去一年无力量训练史及损伤史;③理解研究目的和要求,自愿参加并签署知情同意书。

排除标准:有神经系统、骨科、高血压及其它心血管系统疾病史。

选取符合上述标准的健康女大学生受试者 20 例,采用随机数表法分为右侧腕关节等长屈伸训练组(训练组)和对照组,每组 10 例。2 组受试者的年龄、身高、体重和双侧前臂最大围度的差异均无统计学意义($P > 0.05$)(表 1)。所有受试者在研究期间不参加剧烈体育运动。

表 1 2 组受试者一般资料($\bar{x} \pm s$)

组别	例数 (n)	身高 (cm)	体重 (kg)	年龄 (岁)	右前臂围度 (cm)	左前臂围度 (cm)
训练组	10	162 ± 3.9	48 ± 8.2	20 ± 1.5	23.25 ± 7.28	22.61 ± 1.41
对照组	10	163 ± 2.8	50 ± 7.0	24 ± 0.8	24.57 ± 5.24	23.61 ± 1.50

二、研究方法

(一) 训练方案

每周一、三、五、日的 18:00 ~ 21:00,训练组于 Cybex 测力系统(CSMI 公司,美国)上进行右侧腕关节最大等长屈曲和伸展肌力训练,连续训练 6 周(即每周 4 个训练日,共 24 个训练日)。训练方法:右侧腕关节最大等长屈曲或伸展 2 s 然后放松 2 s 为 1 组动作,重复 8 组为 1 次,每天屈曲和伸展分别训练 2 ~ 6 次(即第 1 ~ 2 个训练日训练 2 次,第 3 ~ 4 个训练日训练 3 次,第 5 个训练日训练 4 次,第 6 个训练日训练 5 次,第 7 ~ 21 个训练日训练 6 次,第 22 个训练日训练 5 次,第 23 个训练日训练 4 次,第 24 个训练日训练 3 次),每次训练间休息 30 s。对照组保持日常的生活和学习,不进行前臂肌力训练。

(二) 肌力测定方法

2 组受试者均于入组当天(训练前)和训练组训练

6 周后(训练后)采用 Cybex 等速肌力测试系统进行双侧腕关节 0° 位最大等长屈曲和伸展肌力的测试。测试前,受试者于熟悉实验环境和测试流程后先进行 5 min 上肢有氧操热身运动,然后在 Cybex 测力系统上进行 2 ~ 3 次腕关节低强度屈曲和伸展练习,休息 3 min 后开始正式测试。

受试者坐在测试椅上,座椅靠背呈 90°,上臂内收贴近肋部,肘关节保持 90°。前臂旋后位置固定在 Cybex 支撑架上,腕关节屈 0°、伸 0° 位。其转动中心与等速仪的转轴保持在一条直线上。测试开始,右侧腕关节尽最大力屈曲,保持 10 s,然后放松休息 1 min,同时按摩前臂肌肉使之放松;之后再最大力伸展,保持 10 s,放松休息 1 min,同时按摩前臂肌肉使之放松,屈曲和伸展分别重复 3 次。根据 Cybex 的报告和原始数据 Excel 表,找到测试过程中最大的峰值力矩(peak torque, PT),即代表受试者的最大肌力,单位为 Nm。间隔 30 min 后,采用同样的方法测试左腕屈曲和伸展时的肌力。为避免其他肌群的协同作用,要求受试者在测试中肩膀不能左右摆动,非测试侧前臂自然放松。由于每一个受试者的身体形态,上肢长度不同,测试过程中应记录每例受试者固定身体位置的参数数值,尽量保持每次身体位置一致。

(三) sEMG 的数据采集和处理

1. sEMG 检测设备和参数设置:2 组受试者均于训练前和训练后进行 sEMG 检测。sEMG 设备选用美国产 TeleMyo2400T 型 Noraxon 表面肌电图遥测系统和上海产 100-A 型银-氯化银电极片(直径 1 cm)。参数设置采用肌电图的前置放大,增益 1000,输入阻抗 $\geq 100 \text{ M}\Omega$,共模抑制比 $> 100 \text{ dB}$,通道采样频宽为 500 Hz,灵敏度 1 μV ,肌电信号数据采集频率为 1500 Hz。

2. 电极片的放置:以尺侧腕屈肌^[7](flexor carpi ulnaris, FCU)和尺侧腕伸肌^[8](extensor carpi ulnaris, ECU)肌腹最隆起处为中心确定电极位置;依次剃毛、细砂纸和 75% 医用酒精擦拭皮肤;沿肌纤维走行贴 2 枚电极片,中心间距 2 cm;无关电极片贴于尺骨鹰嘴^[9]。为保证训练前、后电极片位置相同,用硫酸纸标记尺骨鹰嘴、腕横纹及各电极片的位置。

3. 数据的采集和分析:先采集右上肢,间隔 30 min,再采集左上肢。在确认信号正常,描记基线后,于上述肌力测试的同时记录其尺侧腕屈肌和尺侧腕伸肌的 sEMG 变化。经过全正波化和平滑处理后,分析积分肌电值(integrated electromyogram, iEMG)和上升速率(ascend velocity, AV)。

三、统计学分析

采用 SPSS 13.0 版统计学软件包进行数据分析。

组间比较采用独立样本 t 检验,组内比较采用配对 t 检验,以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

一、2 组受试者训练前、后的肌力变化

训练后,训练组右腕关节最大等长屈曲和伸展 PT 与组内训练前和对照组训练后比较,均显著提高 ($P < 0.05$),且训练组左腕关节最大等长屈曲和伸展 PT 分别为 (12.9 ± 2.0) Nm 和 (6.4 ± 1.3) Nm,与组内训练前和对照组训练后比较,差异均有统计学意义 ($P < 0.05$),详见表 2。

表 2 2 组受试者训练前、后腕关节最大等长屈曲和伸展测试时的肌力比较(Nm, $\bar{x} \pm s$)

组别	例数	屈峰 PT		伸峰 PT	
		右侧	左侧	右侧	左侧
训练组					
训练前	10	10.1 ± 2.6	9.7 ± 1.4	6.0 ± 2.3	4.3 ± 2.1
训练后	10	13.5 ± 2.2 ^{ab}	12.9 ± 2.0 ^{ab}	7.2 ± 1.4 ^{ab}	6.4 ± 1.3 ^{ab}
对照组					
训练前	10	9.7 ± 1.6	10.4 ± 1.8	5.1 ± 1.9	4.8 ± 1.1
训练后	10	10.6 ± 1.3	10.8 ± 1.7	5.1 ± 1.7	5.4 ± 1.6

注:与组内训练前比较,^a $P < 0.05$;与对照组训练后比较,^b $P < 0.05$

二、2 组受试者训练前、后腕关节最大等长屈曲时尺侧腕屈肌的 sEMG 比较

训练后,训练组右腕关节经最大等长屈曲测试,其尺侧腕屈肌的 iEMG 和 AV 均有增高趋势,但与组内训练前和对照组训练后比较,差异均无统计学意义 ($P > 0.05$)。训练后,训练组左腕关节经最大等长屈曲测试,其尺侧腕屈肌的 iEMG 有降低趋势,AV 有增高趋势,但与组内训练前和对照组训练后比较,差异均无统计学意义 ($P > 0.05$),详见表 3。

表 3 2 组受试者训练前、后腕关节最大等长屈曲时主动肌 sEMG 的变化($\bar{x} \pm s$)

组别	例数	尺侧腕屈肌 iEMG($\mu V \cdot S$)		尺侧腕屈肌 AV($\mu V \cdot S^{-1}$)	
		右侧	左侧	右侧	左侧
训练组					
训练前	10	294.1 $\pm$ 78.0	287.0 $\pm$ 91.8	15.7 $\pm$ 8.4	14.2 $\pm$ 9.0
训练后	10	310.9 $\pm$ 76.0	278.2 $\pm$ 94.9	17.2 $\pm$ 9.3	16.1 $\pm$ 9.6
对照组					
训练前	10	278.7 $\pm$ 98.2	271.7 $\pm$ 73.9	16.5 $\pm$ 5.7	15.4 $\pm$ 7.1
训练后	10	270.6 $\pm$ 98.6	283.4 $\pm$ 79.4	17.3 $\pm$ 7.3	16.3 $\pm$ 8.6

三、2 组受试者训练前、后腕关节最大等长伸展时尺侧腕伸肌的 sEMG 比较

训练后,训练组右腕关节经最大等长伸展测试,其尺侧腕伸肌的 AV 与组内训练前和对照组训练后比较,差异均有统计学意义 ($P < 0.05$)。训练后,训练组左腕关节经最大等长伸展测试,其尺侧腕伸肌的 iEMG 与组内训练前和对照组训练后比较,差异均有统计学

意义 ($P < 0.05$),详见表 4。

表 4 2 组受试者训练前、后腕关节最大等长伸展时拮抗肌 sEMG 的变化($\bar{x} \pm s$)

组别	例数	尺侧腕伸肌 iEMG($\mu V \cdot S$)		尺侧腕伸肌 AV($\mu V \cdot S^{-1}$)	
		右侧	左侧	右侧	左侧
训练组					
训练前	10	149.4 $\pm$ 56.3	154.7 $\pm$ 51.7	7.9 $\pm$ 2.4	5.3 $\pm$ 2.9
训练后	10	129.2 $\pm$ 50.7	101.0 $\pm$ 49.8 ^{ab}	3.6 $\pm$ 2.7 ^{ab}	4.2 $\pm$ 2.7
对照组					
训练前	10	145.0 $\pm$ 46.0	159.3 $\pm$ 46.2	7.7 $\pm$ 2.2	5.9 $\pm$ 2.7
训练后	10	158.5 $\pm$ 48.0	163.5 $\pm$ 47.1	7.9 $\pm$ 2.4	5.1 $\pm$ 2.8

注:与组内训练前比较,^a $P < 0.05$;与对照组训练后比较,^b $P < 0.05$

讨 论

本研究结果显示,训练组受试者经 6 周右侧腕关节最大等长屈曲和伸展肌力训练后,其右腕关节最大等长屈曲和伸展 PT 与组内训练前和对照组训练后比较,均显著提高 ($P < 0.05$);且训练组左腕关节最大等长屈曲和伸展 PT 与组内训练前和对照组训练后比较,差异亦有统计学意义 ($P < 0.05$)。提示最大等长随意屈曲和伸展肌力训练,不仅能够提高训练侧的肌力,还能提高未经训练的对侧肢体同源肌肉的力量,证实右腕等长屈伸肌力训练的确能产生肌力的交叉迁移现象,且屈伸交替训练并不影响该效果。Lagerquist 等^[10]的研究发现,健康受试者经踝跖屈最大等长收缩训练 5 周后,双侧比目鱼肌最大等长收缩力量均有显著增强 ($P < 0.05$)。于俊海等^[11]的研究报道,健康受试者右胫骨前肌经过重复等长收缩训练 6 周后,未经训练的左胫骨前肌肌力亦显著增强 ($P < 0.05$)。关于前臂肌群,Farthing 和 Chilibeck^[12]的研究发现,健康右利手受试者经 6 周右侧腕关节最大等长收缩尺偏训练后,左侧腕关节最大等长收缩尺偏肌力亦显著增强 ($P < 0.05$)。上述研究结果均与本研究结果相似。

交叉迁移可能的中枢机制究竟在大脑还是在脊髓目前仍存争议^[13-14]。有研究指出,肌力训练在兴奋一侧肢体运动皮质的同时可诱导对侧皮质产生学习效果^[15-16]。Lagerquist 等^[11]参考了 H 反射和 M 波的测定结果,推测交叉迁移现象的中枢机制可能在脊髓。交叉迁移现象的发生可能是运动皮质的兴奋从大脑的一侧扩散到另一侧,或两侧大脑的运动皮质同时兴奋,也有可能两种情况都存在^[17-19]。周围神经系统的作用也不可忽略,有研究指出,电刺激周围神经肌肉也可增强肌力^[20];单侧肢体的痛觉感受器或感觉神经纤维兴奋可能会改变对侧肢体运动神经元之间的兴奋性^[21];人体为了维持姿势的稳定性和协调性,当单侧肢体位置改变时,对侧肢体会发生

相应的变化^[22]。本研究采用 sEMG 采集肌肉募集信号,主要反映中枢和外周神经最终作用于肌肉的情况,难以区分交叉迁移发生的具体神经节段。

本研究中,右侧腕关节经最大等长屈曲肌力测试,结果显示,训练侧尺侧腕伸肌的 AV 较组内训练前和对照组训练后显著减弱($P < 0.05$),说明肌力训练可改善肌肉运动单位的募集策略以及主动肌和拮抗肌之间的协调关系;而未接受训练的左腕关节经最大等长伸展测试,结果显示,其尺侧腕伸肌的 iEMG 与组内训练前和对照组训练后比较,均显著降低($P < 0.05$),提示尺侧腕伸肌 iEMG 的显著降低可能是力量增长的交叉迁移原因之一。Carolan 和 Cafarelli^[23]的研究也曾记录到拮抗肌表面肌电图振幅降低,这与本研究结果一致。目前,很多研究并未同时测定主动肌和拮抗肌,因此尚难以评价这种现象的普遍性。

综上所述,前臂肌群的肌力在单侧腕关节等长屈伸训练后,双侧前臂肌群的募集策略发生变化,不仅能够明显的提高训练侧前臂肌力,而且还能提高对侧未受训练前臂的肌力,产生交叉迁移现象。

参 考 文 献

- [1] Scripture EW, Smith TL, Brown EM. On the education of muscular control and power[J]. Stud Yale Psychol Lab, 1894, 2: 114-119.
- [2] Kidgell DJ, Stokes MA, Pearce AJ. Strength training of one limb increases corticomotor excitability projecting to the contralateral homologous limb[J]. Motor Control, 2011, 15(2): 247-266.
- [3] Housh DJ, Housh TJ, Johnson GO, et al. Hypertrophic response to unilateral concentric isokinetic resistance training[J]. J Appl Physiol, 1992, 73(1): 65-70.
- [4] Cabric M, Appell HJ. Effect of electrical stimulation of high and low frequency on maximum isometric force and some morphological characteristics in men[J]. Int J Sports Med, 1987, 8(4): 256-260.
- [5] Pearce AJ, Hendy A, Bowen WA, et al. Corticospinal adaptations and strength maintenance in the immobilized arm following 3 weeks unilateral strength training[J]. Scand J Med Sci Sports, 2013, 23(6): 740-748.
- [6] Lee M, Carroll TJ. Cross education: possible mechanisms for the contralateral effects of unilateral resistance training[J]. Sports Med, 2007, 37(1): 1-14.
- [7] 王震寰, 杨其云, 叶斌, 等. 尺侧腕屈肌肌电检测对尺神经卡压征定位的意义[J]. 颈腰痛杂志, 1996, 17(3): 138-140.
- [8] Hermens HJ, Freriks B, Disselhorst-Klug C, et al. Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures[J]. J Electromyogr Kinesiol, 2000, 10(5): 361-374.
- [9] Buchanan TS, Kim AW, Lloyd DG. Selective muscle activation following rapid varus/valgus perturbations at the knee[J]. Med Sci Sports Exerc, 1996, 28(7): 870-876.
- [10] Lagerquist O, Zehr EP, Docherty D. Increased spinal reflex excitability is not associated with neural plasticity underlying the cross-education effect[J]. J Appl Physiol, 2006, 100(1): 83-90.
- [11] 于俊海, 周石, 黄力平, 等. 单侧肢体电刺激或随意力量训练对双侧足背屈力量和肌肉动员能力的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2008, 23(9): 777-781.
- [12] Farthing JP, Chilibeck PD. Cross-education of arm muscular strength is unidirectional in right-handed individuals[J]. Med Sci Sports Exerc, 2005, 37(9): 1594-1600.
- [13] Zang YF, Jia FC, Weng XC, et al. Functional organization of the primary motor cortex characterized by event-related fMRI during movement preparation and execution[J]. Neurosci Lett, 2003, 337(2): 69-72.
- [14] Latella C, Kidgell DJ, Pearce AJ. Reduction in corticospinal inhibition in the trained and untrained limb following unilateral leg strength training[J]. Eur J Appl Physiol, 2012, 112(8): 3097-3107.
- [15] Muellbacher W, Facchini S, Boroojerdi B, et al. Changes in motor cortex excitability during ipsilateral hand muscle activation in humans[J]. Clin Neurophysiol, 2000, 111(2): 344-349.
- [16] Kristeva R, Cheyne D, Deecke L. Neuromagnetic fields accompanying unilateral and bilateral voluntary movements: topography and analysis of cortical sources[J]. Electroencephalogr Clin Neurophysiol, 1991, 81(4): 284-298.
- [17] Ziemann U, Ishii K, Borgheresi A, et al. Dissociation of the pathways mediating ipsilateral and contralateral motor-evoked potentials in human hand and arm muscles[J]. Physiol, 1999, 518(3): 895-906.
- [18] Carr LJ, Harrison LM, Stephens JA. Evidence for bilateral innervation of certain homologous motoneuron pools in man[J]. J Physiol, 1994, 475(2): 217-227.
- [19] 柏树令. 系统解剖学[M]. 7 版. 北京: 人民卫生出版社, 2008. 417-419.
- [20] Hortobagyi T, Scott K, Lambert J, et al. Cross education of muscle strength is greater with stimulated than voluntary contractions[J]. Motor Control, 1999, 3(2): 205-219.
- [21] Aziz-Zadeh L, Maeda F, Zaidel E, et al. Lateralization in motor facilitation during action observation: a TMS study[J]. Exp Brain Res, 2002, 144(1): 127-133.
- [22] Carolan B, Cafarelli E. Adaptations in coactivation after isometric resistance training[J]. J Appl Physiol, 1992, 73(3): 911-917.

(修回日期:2015-12-23)
(本文编辑:阮仕衡)