

超等长阻力训练对下肢各关节角动力学的影响

井兰香¹, 刘宇²

(1. 沧州医学高等专科学校 解剖教研室, 河北 沧州 061001; 2. 上海体育学院 运动科学学院, 上海 200438)

摘 要: 为测试超等长阻力训练前后原地垂直纵跳动作下肢各关节角速度及角加速度, 计算下肢各关节角刚度, 观察超等长阻力训练对下肢各关节角动力学的影 响。将 16 名青年男子篮球运动员随机分成超等长阻力训练组和常规训练对照组。采用 VICON 和三维测力台采集每个动作的运动学和动力学数据, 计算下肢各关节角速度及角加速度, 并经逆动力学方法计算下肢净关节力矩。结果可见, 超等长阻力训练组髋、踝关节角速度和角刚度明显高于对照组, 膝关节角速度及角刚度两组没有明显差异; 超等长阻力训练组髋、膝、踝关节角加速度均显著高于对照组。结果说明超等长阻力训练可降低拉长-缩短周期支撑时间、缩短摊还期、增强肌肉-肌腱复合体能量转换能力、提高下肢肌肉爆发力。适于需要关节角速度、角加速度及爆发力的项目。

关 键 词: 运动生物力学; 超等长阻力训练; 关节角速度; 关节角加速度; 关节角刚度

中图分类号: G804.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7116(2012)05-0140-05

Dynamic effects of super-isometric resistance training on the joints of lower limbs

JING Lan-xiang¹, LIU Yu²

(1. Department of Anatomy, Cangzhou Medical College, Cangzhou 061001, China;

2. School of Kinesiology, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China)

Abstract: In order to measure the angular velocities and angular accelerations of the joints of lower limbs making a vertical jumping move before and after super-isometric resistance training, to calculate the rigidities of the joints of lower limbs, and to observe the dynamic effects of super-isometric resistance training on the joints of lower limbs, the authors randomly divided 16 young male basketball players into a super-isometric resistance training group and a conventional training control group, collected kinetic and dynamic data of each move by using VICON and a 3D force measuring station, calculated the angular velocities and angular accelerations of the joints of lower limbs, and the net joint moment of lower limbs by means of inverse dynamics, and revealed the following findings: the angular velocities and angular rigidities of hip and ankle joints of players in the super-isometric resistance training group were significantly higher than those of players in the control group, while there was no significant difference in the angular velocities and angular rigidities of knee joints between players in the two groups; the angular velocities of hip, knee and ankle joints of players in the super-isometric resistance training group were significantly higher than those of players in the control group. The said findings indicated that super-isometric resistance training can reduce elongation, shorten cycle supporting time, shorten amortization period, enhance the energy conversion capacity of the muscle-tendon complex, and boost the explosive power of lower limb muscles, is suitable for events which require the angular velocity, angular acceleration and explosive power of joints.

Key words: sports biomechanics; super-isometric resistance training; angular velocity of joints; angular acceleration of joints; angular rigidity of joints

收稿日期: 2011-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30871210)。

作者简介: 井兰香(1972-), 女, 副教授, 博士, 研究方向: 运动生物力学。

强大的髌关节肌肉力量是弹跳力的基础,膝、踝关节肌肉力量是速度的保证,下肢肌肉力量和速度决定短跑、篮球、跳跃等具有拉长-缩短周期(stretch-shortening cycle, SSC)特征动作的爆发力。Komi等^[1]提出SSC包括3个重要阶段:离心收缩之前适时的肌肉预激活、肌肉-肌腱复合体被动拉长离心收缩储存弹性能、离心阶段向向心收缩及时转换释放弹性能。介于离心与向心阶段之间短暂的时间为摊还期,较短的摊还期比长摊还期能产生更多的功率输出^[2]。摊还期时间最短的SSC是最佳的状态,肌肉收缩爆发力会更强^[3]。

肌肉收缩产生净关节力矩(net joint moment, NJM),使关节转动产生角位移,单位时间内关节角位移即关节角速度直接关系到运动速度、关节角加速度以及爆发力,是决定运动成绩的重要因素,Rahman等^[4]的研究结果表明超等长阻力训练能够显著提高功率自行车运动的角速度。关节角刚度是反映关节转动弹性系数的变量,与关节周围肌肉-肌腱复合体这种黏弹性物质的回弹力量和收缩速度高度相关,下肢肌肉力量和爆发力降低,关节角刚度下降^[5]。下肢关节角刚度还与支撑时间呈负相关^[6-7],提示支撑时间短、关节角刚度较高的SSC动作具有更好的成绩。许多研究证明超等长阻力训练能提高下肢SSC成绩和爆发力^[8-11],但超等长阻力训练对下肢SSC运动各关节角动力学产生怎样的影响,还没有相关文献报导,故本研究测试超等长阻力训练后原地垂直蹲起跳(countermovement jump, CMJ)动作动力学及运动学数据,导出髌、膝、踝关节角速度及角加速度,根据弹簧-质量模型计算髌、膝、踝关节角刚度,从关节角动力学角度探讨超等长阻力训练对下肢肌肉爆发力的影响,为超等长阻力训练的实践应用提供科学的理论依据。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

某竞技学校16名男性篮球运动员自愿参与本实验并保证完成训练,其运动年限均在5年以上,运动等级为2级,无下肢关节肌肉损伤史。将受试者随机分为超等长阻力训练组(plyometrics weight training group, PWT)($n=8$ 人)和篮球运动员常规训练对照组(control group, CG)($n=8$ 人),年龄、身高、体重分别为:(17.25 ± 1.04)岁、(193.29 ± 5.83)cm、(87.85 ± 10.25)kg; (18.25 ± 2.36)岁、(188.90 ± 4.39)cm、(87.86 ± 12.60)kg。

1.2 实验方法

1) 仪器设备。

运动学数据使用VICON(英国, WORKSTATION 5.1)

采集,采样频率为120 Hz。8个红外摄像头感应标记点位于左侧髌结节、髌前上棘、大转子、膝关节内上髌、膝关节外上髌、内踝、外踝、第1跖指关节、第5跖指关节、指尖的标记,体表标记点参照Helen Hayes标记方法^[5]。动力学数据由KISTLER三维测力台(瑞士,9287B)与运动学数据同步采集,采样频率为1200 Hz。

2) 训练及测试方法。

训练前、后各1周内测试每位受试者下肢肌肉单次向心随意收缩最大值(Maximal Voluntary Contraction, MVC):以膝关节约 90° 位置双脚与肩同宽半蹲于测力台,肩抗杠铃,调节训练器械两端保险杠至适宜高度以限制杠铃杆上升,测试开始后受试者尽最大努力向上顶起,持续3s。测力台采样频率为1200 Hz,所测数据曲线峰值即为MVC。

在实验室对PWT组实施8周,每周3次的训练计划,力量房及场地训练日程同常规训练组,全程监控训练过程。训练开始前10次10%MVC负重CMJ,熟悉训练过程及热身。超等长阻力训练确定负荷为30%MVC,动作为肩抗杠铃做CMJ。训练组数为3组,每组10个,训练时间20s,组间休息2min。MVC值在训练4周后重新测定,训练负荷值随之调整。

于8周超等长阻力训练结束后测试两组CMJ下肢动力学及运动学参数。受试者热身后双手叉腰,足距与肩同宽站立于测力台,保持重心稳定,快速下蹲至膝关节约 90° 位置后迅速尽力向上垂直跳起。每个动作重复3次,对跳跃高度最高的动作进行分析。

3) 数据处理。

由VICON系统和测力台三维坐标系与受试者动作的方位关系,测得受试者运动学及动力学数据,根据V3-D系统设置本实验中坐标系定位为:冠状方向为 x 轴,矢状方向为 y 轴,垂直方向为 z 轴。由于CMJ动作要求只在垂直轴和矢状轴方向运动,后期数据处理过程中取V3-D运动轨迹数据和测力台动力学数据的 y 、 z 数据进行计算。

将髌结节-大转子-膝关节外上髌标记点夹角记为髌关节角度,大转子-膝关节外上髌-外踝夹角为膝关节角度,膝关节外上髌-外踝-第5跖趾关节为踝关节角度。由标记点运动轨迹计算关节角位移(angular displacement)、求关节角位移的微分得出关节角速度(angular velocity),对关节角速度求微分得关节角加速度(angular acceleration)。时间以动作周期做标准化,用Time(%)表示。

由V3-D图像分析系统导出mark点轨迹,根据各标记点的坐标值计算出髌、膝、踝关节中心轨迹坐标,结合测力台数据,采用标准逆向动力学方法计算下肢

各关节 NJM。地面反作用力(ground reaction force, GRF)在下肢 3 个关节处产生伸展关节的 NJM, 其中伸展髋关节、踝关节的 NJM 为负值, 伸展膝关节的 NJM 为正值。根据弹簧-质量模型计算下肢各关节角刚度: $K_j = M_j / \Delta \theta_j$, 其中 M_j 表示 NJM 峰值, $\Delta \theta_j$ 表示 CMJ 开始至关节最大屈曲时刻的角位移。NJM-关节角位移曲线斜率代表关节角刚度。动力学数据以体重做标准化。

4)数据统计。

采用 SPSS11.3 统计软件对数据进行单因素方差分析, 两组间各变量均数比较采用独立样本 t 检验, 结果以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 显著性水平为 0.05。

2 实验结果及分析

8 周实验结束后两组受试者 CMJ 动作从开始至脚尖离地阶段髋、膝、踝关节角速度及关节角加速度随

时间变化如表 1、图 1, 超等长阻力训练组的髋、踝关节角速度峰值明显高于对照组, 膝关节角速度峰值两组间差异没有显著性。超等长阻力训练组髋、膝、踝关节角加速度峰值均明显高于对照组。

表 1 髋、膝、踝关节角速度及关节角加速度峰值 ($\bar{x} \pm s$)

关节	组别	角速度/((°)·s ⁻¹)	角加速度/((°)·s ⁻²)
髋	CG	317.35±191.23	2213.64±334.87
	PWT	422.59±132.21 ¹⁾	10785.90±911.70 ²⁾
膝	CG	710.23±354.56	4378.94±575.54
	PWT	707.06±333.11	17860.60±809.11 ²⁾
踝	CG	608.48±54.67	802.92±53.44
	PWT	659.23±188.65 ¹⁾	10690.81±110.55 ²⁾

与 CG 组比较: 1)P<0.05; 2)P<0.05

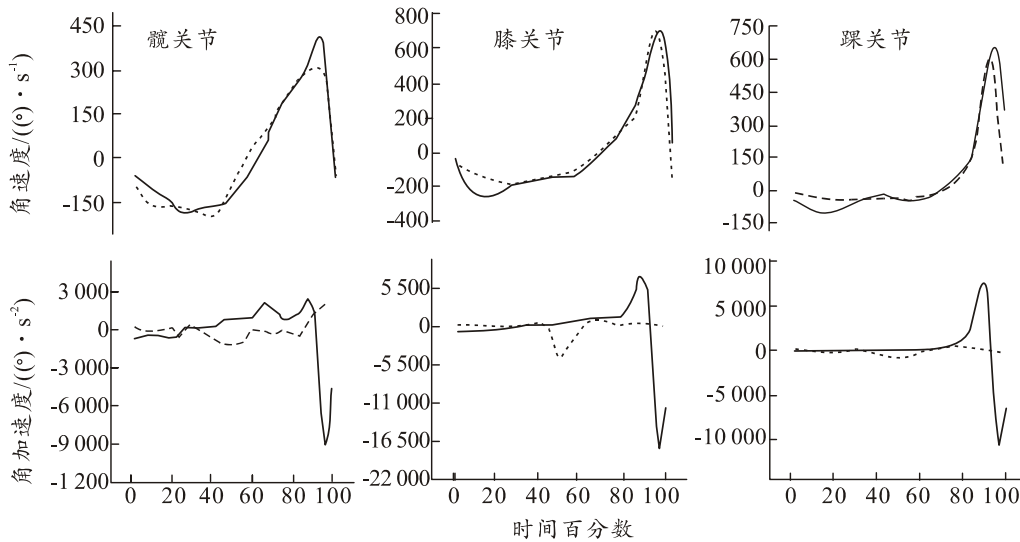


图 1 下肢各关节角速度和角加速度-时间百分数曲线

受试者 CMJ 动作过程中髋、膝、踝关节 NJM-角位移曲线见图 2。

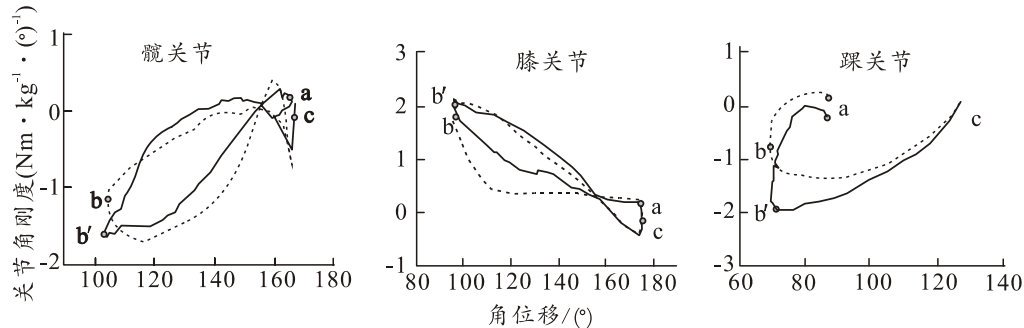


图 2 下肢各关节 NJM-角位移曲线

图 2 中 a 表示开始下蹲, a-b 段曲线表示肌肉拉长做离心收缩; b 表示髋关节到达最低点, 离心阶段结束开始转向向心阶段; b-c 段曲线表示肌肉缩短做

向心收缩; c 为脚尖离地腾空。a-b 线段斜率代表关节角刚度, NJM-角位移曲线 a-b 线段斜率越大, 表示关节角刚度越高。PWT 组髋关节 NJM-角位移曲线 a-b

' 线段斜率明显大于 CG 组 a-b 线段斜率, 表明 PWT 组髌关节角刚度明显高于 C 组。膝关节 NJM-角位移曲线 a-b 及 a-b' 线段斜率两组没有显著性差异, 表明膝关节角刚度两组没有显著差异。踝关节 NJM-角位移曲线 a-b' 线段斜率明显大于 a-b, 表明 PWT 组踝关节角刚度明显高于 CG 组(表 2)。

组别	髌	膝	踝
CG	0.03±0.01	0.03±0.00	0.05±0.01
PWT	0.04±0.01 ¹⁾	0.03±0.00	0.09±0.02 ¹⁾

1)与 CG 组比较 $P < 0.05$

3 讨论

为保证本实验结果的可靠性, 实验过程中对每个受试者 CMJ 动作髌、膝、踝关节角度进行监控, 去除不符合标准的动作, 以减少结果的误差。采用三元相图对髌、膝、踝关节角度分布情况进行分析发现 16 名受试者 CMJ 动作可变性较小, 下肢各关节角度集中、重叠。表明受试者在做规定实验动作时符合测试要求, 这就避免了个体之间因动作策略差异而影响测试结果可信度。在此基础上, 测得的角速度、角加速度以及角刚度可比性较高。

Van 等^[12], 指出 SSC 离心过程通过使个体有适宜的时间长度刺激关节周围相关肌肉组织, 提高横桥形成, 最大化整个向心过程中关节周围肌肉收缩速度和各关节的 NJM。肌肉收缩的直接结果是使关节转动产生角位移, 本研究在受试者 CMJ 动作策略较一致, 下肢各关节角位移相对恒定的条件下, 肌肉收缩速度越高, 所产生的关节角加速度就越大, 关节角速度也就越快, 表现出更强的下肢肌肉爆发力。关节角速度和角加速度二者分别是由角位移和角速度对时间变量的微分所得, 支撑时间的缩短不仅使关节角速度增加, 更是关节角加速度提升的关键。本研究中超等长阻力训练组支撑时间(0.25 ± 0.02 s)明显小于对照组(0.32 ± 0.11 s) ($P < 0.05$), 表明超等长阻力训练能显著降低 SSC 支撑时间, 缩短摊还期时长, 使下肢肌肉-肌腱复合体能量转换能力得到加强, 弹性利用率提高。

肌腱作为肌肉的串联弹性元在向心收缩前被拉长产生的势能决定着肌肉力量输出, 肌节更快的缩短速度要求横桥循环速度更快, 引起横桥接触点减少, 达到粗细肌丝最佳交叠位置, 利于肌肉力量的产生^[13]。肌肉-肌腱复合体的黏弹性特征和牵张反射是超等长阻力训练起主要作用的因素^[4]。Arampatais 等^[7]认为肌肉预激活之时的前馈控制影响关节角刚度。前馈控制过程中, α 和 γ 运动神经元都被激活。 γ 运动神经元

支配梭内肌纤维可收缩成分, 因此, γ 运动神经元活性提高导致梭内肌中间区域张力提高并被动牵张, 产生两种效果: 第一, 梭内肌牵张时, 去极化并直接与 α 运动神经元联系, 提高肌肉的固有活性; 第二, 梭内肌牵张引起兴奋增强位移增加。 γ 运动神经系统加强各种自发感觉引起快速 SSC 反射。前馈和反馈机制在 Kuitunen 等^[6]的文献中也有论述, 他们发现当跑速增加时, 跖屈肌和伸膝肌预激活提高了。这些肌肉的预激活可以提高肌肉-肌腱复合体的刚度, 促使其承受和吸收支撑开始阶段高冲击力带来的负担^[14]。显然牵张反射的激活, 是运动控制反馈功能的反映。

超等长阻力训练是以 CMJ 为基本动作, 肩扛杠铃完成下肢 SSC, 为了使躯干保持平衡并有效完成施加一定阻力后的 CMJ 动作, 受试者更多地动用髌、踝策略^[15-16]。本研究受试者经过 8 周训练后产生了有效的下肢神经-肌肉适应, 髌、踝关节角速度和角刚度两组差异具有显著性, 而膝关节角速度和角刚度两组间没有明显差异性, 表明超等长阻力训练对髌、踝关节周围肌肉-肌腱复合体牵张反射刺激较大, 更有利于髌、踝关节肌肉爆发力的发展。

实验设计的目标是提高下肢肌肉力量和爆发力, 训练方案是组数较少^[17]、适宜的重复次数^[18]、中等强度负重。超等长阻力训练过程中, 教练员要鼓励快速爆发力运动, 最小化摊还期时间长度, 通过减小支撑时间能达到这一目的。根据离心-向心收缩时间, Schmidtbleicher^[19]将 SSC 分成两类, 快速和慢速。慢速 SSC 动作特征是髌、膝、踝关节角位移大, 收缩时间长, 分类成支撑时间 > 0.25 s 者。快速 SSC 动作特征是小角位移和短的摊还期, 分类成支撑时间 < 0.25 s 者。力量与体能工作者要通晓并遵循这些原理, 可根据项目的触地支撑时间选择适宜的训练方法。快速 SSC 要求更大的拉伸速度、短的摊还期, 这些对肌肉-肌腱复合体牵张反射很重要。实践应用之时, 可以用跳起高度除以支撑时间这种最简单的方法作为反应力量的指标, 标志着离心快速向心阶段转换的能力。

超等长阻力训练能显著降低 SSC 支撑时间, 缩短摊还期时长, 提高肌肉-肌腱复合体由离心收缩至向心收缩能量转换能力, 增加下肢肌肉爆发力。超等长阻力训练适用于短跑、篮球、跳跃等需要下肢快速关节角速度、角加速度以及爆发力的运动项目。

参考文献:

[1] Komi P V, Gollhofer A. Stretch reflexes can have an important role in force enhancement during SSC exercise[J]. J Appl Biomech, 1997, 13(4): 452-460.

- [2] Luebbers P E, Potteiger J A, Hulver M W, et al. Effects of plyometric training and recovery on vertical jump performance and anaerobic power[J]. *J Strength Cond Res*, 2003, 17(4): 704-709.
- [3] Wilkm K E. Stretch-shortening drills for the upper extremities: theory and clinical application[J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 1993, 17(5): 225-234.
- [4] Rahman R, Parvin A, Naser B, et al. Evaluation of plyometrics, weight training and their combination on angular velocity[J]. *JPES*, 2006, 4(1): 1-8.
- [5] Wang Lingyi. The kinetics and stiffness characteristics of the lower extremity in older adults during vertical jumping[J]. *Journal of Sports Science and Medicine*, 2008, 7(3): 379-386.
- [6] Kuitunens S, Komi P V, Kryolainen H. Knee and ankle joint stiffness in sprint running[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2002, 34(1): 166-173.
- [7] Arampatais A, Shade F, Walsh M, et al. Influence of leg stiffness and its effects on myodynamic jumping performance[J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2001, 11(5): 355-364.
- [8] Daniel J D, Brent A A. Analysis of acute explosive training modalities to improve lower-body power in baseball players[J]. *J Strength Cond Res*, 2007, 21(4): 1177-1182.
- [9] Santos E J, Janeira M A. Effects of complex training on explosive strength in adolescent male basketball players[J]. *J Strength Cond Res*, 2008, 22(3): 903-909.
- [10] Miyaguchi K, Demura S. Relationships between stretch-shortening cycle performance and maximum muscle strength[J]. *J Strength Cond Res*, 2008, 22(1): 19-24.
- [11] 井兰香, 刘宇. 篮球运动员 8 周负重超等长训练后下肢及髋、膝、踝关节动力学和刚度的变化[J]. *中国运动医学杂志*, 2010, 29(4): 417-420.
- [12] Van Ingen Schenau G J, Bobbert M F, De Hann A. Mechanics discussion[J]. *J Appl Biomech*, 1997, 13(4): 484-496.
- [13] Fukunaga T, Kubo K, Kawakami Y, et al. In vivo behavior of human muscle tendon during walking[J]. *Proc Biol Sci*, 2000, 268(1464): 1-5.
- [14] Joshua T, Weinhandl J D, Smith E L, et al. The effects of repetitive drop jumps on impact phase joint kinematics and kinetics[J]. *J Appl Biomech*, 2011, 27(2): 108-115.
- [15] 井兰香, 刘宇, 田石榴. 不同负重超等长练习下肢各关节作用分析[J]. *体育科学*, 2009, 29(5): 50-53.
- [16] Sean P F, George J S. Lower extremity joint kinetic responses to external resistance variations[J]. *J Appl Biomech*, 2008, 24(1): 58-68.
- [17] Carpinelli R N. Berger in retrospect: effect of varied weight training programmes on strength[J]. *Br J Sports Med*, 2002, 36(5): 319-324.
- [18] Kaukab A, Rajesh K. Effects of weight training on power performance[J]. *JPES*, 2011, 11(2): 124-126.
- [19] Schmidtbleicher D. Training for power events. *Strength and Power in Sport*[M]. Oxford, UK: Blackwell, 1992: 169-179.

