

运动性疲劳对跳深动作结构影响的生物力学分析

邹晓峰¹, 陈民盛²

(1.吉林大学 体育学院, 吉林 长春 130024; 2.深圳大学 体育系, 广东 深圳 518060)

摘 要: 使用三维测力平台、Panasonic 摄像机和 MONARK 834E 型功率自行车对 20 名男学生疲劳前后跳深动作进行测试, 结果表明运动性疲劳引起跳深动作结构发生了显著性的变化, 表现为重心速度的下降、腾起距离减少, 以及与地接触时间显著性增加等特点; 膝关节功能不断下降, 膝关节角度变化范围明显增大, 膝关节峰值功率显著性降低, 最大横向和纵向的冲击力明显增大, 垂直蹬伸力显著性降低。这些生物力学参数的改变, 不但大幅降低了跳深训练的效果, 同时增大了关节和肌肉损伤的风险。

关键词: 运动生物力学; 运动性疲劳; 跳深练习; 增强式训练

中图分类号: G808.14; G804.16 文献标识码: A 文章编号: 1006-7116(2009)07-0089-04

Effect of fatigue on the biomechanics characteristics in drop-jumps

ZOU Xiao-feng¹, CHEN Min-sheng²

(1.School of Physical Education, Jinlin University, Changchun 130012, China;

2.Department of Physical Education, Shenzheng University, Shenzheng 518060, China)

Abstract: The aims of the study were to determine the structure change of drop-jump training and how it affect the lower joints and muscles when fatigued. Three-dimensional platform, Panasonic camera and MONARK 834E power-cycling was used to test 20 male athletes when unfatigued and fatigued. result indicated that the structure of the drop-jump is significant changed after fatigued. the center of gravity for the speed is Declined to reduce the flight distance, as well as access to significant increase in time, and other characteristics of declining knee function, changes in the scope of the knee point of view of the apparent increase, knee peak power significantly lower, the largest horizontal and vertical impact, Increased significantly, push the vertical stretch significantly less power. Biomechanics of these parameters change, we can see it not only significantly reduces the effect of jump training, while the muscles and joints increases the risk of injury.

Key words: exercise biomechanics; exercise-induced fatigue; drop-jump practice; plyometric training

运动性疲劳对骨骼肌活动能力的影响, 不但被生理学和训练学界广为关注, 同时也是运动生物力学研究领域的重点课题。通常认为, 在运动性疲劳状态下, 由于肌肉的贮存和分散能量的能力下降, 输出功率的降低, 肌肉不能承载原来的负荷, 必然导致动作技术的变形以及增大肌肉拉伤、应力性骨折、关节和软骨变性等损伤的风险^[1]。可见运动性疲劳不但对运动员的运动能力产生直接的影响, 而且也是导致运动性损伤的重要原因。因此, 揭示运动性疲劳后的生物力学参数的变化因素, 是探讨产生骨骼肌损伤机制的重要途

径之一。

以跳深为典型代表的 plyometric(增强式)练习, 其实质是一种利用机械撞击刺激, 迫使肌肉产生尽可能大肌张力的方法。这种短暂的冲击性活动, 能够有针对性地增强肌梭的长度-反馈成分的易化反射作用, 使肌肉既耐受更大的牵张负荷, 又储存了更多的弹性势能, 从而有效地促进动作速度和爆发力的发展, 提高神经系统的反应能力^[2]。目前, 国内对于跳深的研究主要集中在跳深高度、跳深负荷以及强度等方面^[3], 但是在运动性疲劳后跳深练习的训练效果, 是否存在潜

在的损伤风险等问题上还不明确。所以,研究疲劳后跳深练习动作结构的改变及对下肢关节肌肉的影响,对于 plyometric 训练具有十分重要的意义。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

受试者为吉林大学体育学院 20 名男生,平均年龄(20±2)岁,平均身高为(176±4) cm,平均体重(67±7) kg,身体健康,背部、髋关节和膝关节功能正常,无运动性疾病,均接受一段时间的跳深训练,以保证动作的准确性。

1.2 研究方法

每名受试者完成准备活动后,着装紧身高弹长裤,完成 50 cm 的跳深测试,要求所有测试动作均为两手叉腰,以减少手臂摆动对动作的影响。全部测试分 2 次进行,首先,在非疲劳状态下进行一次跳深测试,然后在疲劳诱发后立刻进行第 2 次跳深测试。

疲劳的诱发在 MONARK 834E 功率自行车上进行。在 5 min 的热身练习之后,采取功率自行车逐级递增负荷作为诱发肌肉疲劳的动力性运动。开始负荷的功率为 50 W,然后以 50 W 负荷功率递增,每级负荷运动时间为 3 min,保持其运动节奏为 55 r/min,直到受试者无法进行时停止实验^[4]。测试过程中,及时不

断地给予受试者鼓励,当受试者确实难于维持时,停止蹬踏自行车,再进行跳深的测试。

采用大连理工大学研制的 YDT—6461 型六分量压电晶体生物力学测力平台,记录足着台过程中地面反作用力,门限值 2 kg,采样时间 1 500 ms。同时使用二台日本 Panasonic DP200 摄像机同步进行三维拍摄,摄像机镜头高度约 1.2 m,拍摄频率为 50 Hz,采用美国艾里尔(Ariel Dynamics)公司生产的 The APAS System 录像解析系统对运动图像进行数字处理。应用 spss12.0 对数据进行统计学处理,本研究采用的统计检验显著水平为 $P<0.05$ 。

2 研究结果及分析

2.1 疲劳前后跳深练习表现

表 1 是疲劳前后跳深练习部分运动学参数的变化情况,可以发现,几乎所有的参数都发生了显著性变化。疲劳后腾起速度由(2.89±0.21) m/s 降到(2.70±0.37) m/s,显著性下降($P<0.05$);重心腾起的高度也显著性降低($P<0.05$);重心缓冲距离略有增大,但是变化不明显。在时间参数上,疲劳前后也有较大差异,疲劳后腾空时间明显缩短($P<0.01$),而与地面接触阶段的缓冲时间与蹬伸时间均显著性地增加($P<0.05$)。

表 1 不同状态下跳深练习部分运动学参数 ($\bar{x} \pm s$) 比较

状态	人数	重心腾起高度/m	重心缓冲距离/m	腾起速度/(m·s ⁻¹)	腾空时间/ms	缓冲时间/ms	蹬伸时间/ms
正常	20	0.41±0.04	0.22±0.04	2.89±0.21	508.5±40.2	88.4±27.1	126.7±24.4
疲劳后	20	0.36±0.06 ¹⁾	0.24±0.03	2.70±0.17 ¹⁾	486.7±35.2 ²⁾	92.5±22.5 ¹⁾	138.6±20.3 ¹⁾

正常与疲劳状态比较: 1) $P<0.05$; 2) $P<0.01$

2.2 下肢关节活动范围

疲劳后跳深练习,在由高处下落至着地瞬间,髋关节和膝关节角度没有明显变化,踝关节角度值略有下降。在随后的着地缓冲阶段,膝关节和踝关节角度变化范围都显著性增大($P<0.05$),但髋关节角度变化范

围疲劳前后差异无显著性。至最大缓冲时刻,明显可见疲劳后膝关节、踝关节角度被压低($P<0.05$)。在蹬伸阶段,膝关节角度变化范围仍旧明显增加($P<0.05$),而髋关节和踝关节变化范围不明显,无统计学意义(表 2)。

表 2 不同状态下跳深练习下肢关节角度 ($\bar{x} \pm s$) 比较

状态	着地缓冲			最大缓冲			蹬伸		
	髋	膝	踝	髋	膝	踝	髋	膝	踝
正常	9.6±4.2	36.0±5.4	40.7±12.4	138.1±18.6	125.4±12.5	84.1±11.6	24.7±6.7	41.0±7.3	44.8±6.0
疲劳后	11.3±4.4	44.0±6.7 ¹⁾	47.5±7.6 ¹⁾	134.9±12.4	113.8±9.4 ¹⁾	76.4±9.3 ¹⁾	27.6±5.2	47.0±8.5 ¹⁾	42.7±5.6

正常与疲劳后比较: 1) $P<0.05$

2.3 动力学参数特征

1) 三维力。

疲劳后跳深,缓冲阶段的最大垂直冲击力 F_z 没有

明显的下降,而前后方向作用力 F_x 和 F_y 则显著性增加($P<0.05$)。在蹬伸阶段,蹬伸力前后方向的分力 F_x 显著的增加($P<0.05$),而垂直蹬伸力值从(21.58±6.22)

N/kg 减少到 (19.46 ± 8.39) N/kg, 对其进行 T 检验, 发现差别具有显著性($P < 0.05$)。

表3 不同状态下跳深练习的三维力峰值 ($\bar{x} \pm s$) 比较

状态	最大冲击力			最大蹬伸力		
	F_x	F_y	F_z	F_x	F_y	F_z
正常	4.41±0.89	15.81±5.96	51.20±12.90	1.08±0.06	2.72±0.41	21.58±6.22
疲劳后	4.58±0.75	19.58±9.03 ¹⁾	49.07±9.12	1.12±0.09	3.41±0.39 ¹⁾	19.46±8.39 ¹⁾

正常与疲劳后比较: 1) $P < 0.05$

2) 关节功率。

关节功率定义为力矩与相应的环节角速度的乘积。从疲劳后的关节功率看, 缓冲阶段髋关节关节功率峰值上升显著($P < 0.05$), 而膝关节与踝关节的关节

功率峰值增加不明显, 无统计学意义。在随后的体现下肢做功能力的蹬伸阶段, 髋、膝、踝关节峰值功率均有所下降, 其中膝关节峰值功率下降非常显著($P < 0.05$)。

表4 不同状态下跳深练习下肢关节功率峰值 ($\bar{x} \pm s$) 比较

状态	着地缓冲阶段			蹬伸阶段		
	髋	膝	踝	髋	膝	踝
正常	-578±321	-3 376±822	-1 283±796	834±283	2 276±512	1 331±598
疲劳后	-752±370 ¹⁾	-3 401±764	-1 318±653	801±312	1 712±487 ¹⁾	1 247±508

正常与疲劳后比较: 1) $P < 0.05$

3 讨论

本文旨在探讨疲劳后跳深练习动作结构的改变及其对下肢关节肌肉的影响。通常认为, 在进行跳深一类的 plyometric 训练时要在其他力量训练前进行, 即在神经肌肉系统不疲劳情况下训练, 其理由是如果机体疲劳, 神经的适应性可能减少, 与地面接触阶段的时间增加, 这样有可能减少肌肉的工作效率^[5]。但实际上许多体育项目的功率输出是在疲劳状态下完成的, 有学者认为应该在疲劳状态下训练输出功率, 可以将一些 plyometric 训练在疲劳条件下进行, 以满足专项的适应^[6]。由于目前对疲劳状态下的跳深训练的动作结构变化以及影响机制还不是十分明确, 因此还不能判断其适用性。

研究中发现, 运动性疲劳引起跳深动作结构发生了显著性的变化。最直接的证据是重心速度的下降、腾起距离减少, 以及与地接触时间显著性增加(见表1), 这些运动学参数的改变, 说明疲劳后受试者的运动能力已经显著下降。生理学研究认为这是由于人体在从事连续性的运动过程中, 随着能源物质的不断消耗, 代谢产物的积累导致肌肉的疲劳, 致使肌肉牵张反射敏感性降低、刚性调节减弱、运动中肌纤维募集的类型改变, 从而减弱肌肉收缩活动的的能力, 不能维持原有的练习强度与输出功率^[7-8]。因此, 疲劳后跳深

练习效果下降是必然的。

疲劳前后下肢关节角度的变化也说明动作结构的改变。在本研究中, 要求运动员上肢相对固定, 这就减少了上肢的摆动对跳深练习动作结构的影响, 动作质量的好坏主要由下肢各关节肌肉的工作能力来决定。在着地缓冲阶段, 下肢受到瞬间的冲击力作用, 髋、膝、踝关节进行屈曲缓冲, 下肢伸展肌群收缩方式为离心收缩; 而在蹬伸阶段, 通过积极的伸展下肢关节, 释放离心收缩时储存的弹性能。疲劳后, 在缓冲阶段最明显的变化是膝关节和踝关节角度都有显著性的下降, 重心更低, 关节运动范围、缓冲时间都显著性增加。有研究认为, 这是下肢关节为降低地面垂直反作用力的一种补偿策略, 人主要依靠关节屈曲时活动肌的伸长和骨骼的变形来减小和传递触地时所受到的作用力, 以确保安全地与地面接触^[9]。但增大缓冲的幅度, 不利于跳深的耦合作用和随后拉伸的速度, 肌肉韧带的承载能力也增加, 增大损伤的风险。同时缓冲时间的增加, 也会导致肌肉的弹性形变力下降, 弹性能将有一部分以热能的形式释放, 使向心收缩时可利用的部分减少, 肌张力下降。在蹬伸阶段膝关节的角度变化范围虽然显著性地增大, 髋关节、踝关节也积极伸展, 但是蹬伸时间也明显延长, 造成输出功率降低(见表4)。

关节功率代表了人体不同部位做功的能力,这种能力的下降可反映人体疲劳的程度。通过检验疲劳前后关节功率的变化发现,疲劳后跳深,着地缓冲阶段的下肢关节功率峰值都较正常跳深有所增加,尤其髌关节功率峰值增加更加显著($P<0.05$),这说明疲劳后下肢关节受到冲击作用后做负功有所增加,伸展关节肌群的工作能力下降明显。在蹬伸阶段,最明显的变化是膝关节功率峰值显著性降低,而踝关节和髌关节的功率峰值也略有下降,这意味着在此阶段的关节输出功率明显减少。可见,运动性疲劳导致跳深动作的这些结构性改变对跳深训练效果的影响是十分明显的,教练员应根据运动员的机能状况,选择跳深适宜的的负荷量与强度。

从跳深动作前后冲击力的变化情况来看,疲劳后最大横向和纵向的冲击力,明显增大($P<0.05$),而垂直冲击力增幅没有统计学意义,这和部分研究结果不一致^[10]。前后方向作用力的增加,是由于着地时刻踝关节角度下降所致,这容易导致跟腱产生极大的应变。如果受试者能够有意识地通过更为竖直的脚姿触地以减小最大反作用力时,则达到最大垂直作用力的时间将延迟。触地时较为竖直的脚姿态,也能够提供给运动员更长的时间来减小脚跟触地前的垂直速度,降低损伤的几率。而横向作用力的增加,可能是着地时刻关节的转动与踝关节的内翻或者外翻造成的,说明疲劳后踝关节着地稳定性能的下降,这也增加了踝关节损伤的风险。由于跳深时下肢受到垂直的冲击力的作用较大(本研究中最大近4 000 N),这意味着较大的冲击载荷会使伸展关节肌群受到较大的牵拉作用,当出现疲劳时,人体肌肉骨骼系统应对足跟触地振动波的调节能力下降,强烈的冲击和扭转负荷将增加正常关节退化的危险;当关节结构存在异常、关节或肌肉出现神经支配障碍、肌肉力量或耐力不足时,发生退化性关节疾病的可能性更大^[11]。因此疲劳后,跳深动作可能会造成除代谢疲劳之外的肌肉和关节损伤。

运动性疲劳引起跳深动作结构发生了显著性的变化,表现为重心速度的下降、腾起距离减少,以及与地接触时间显著性增加等特点,膝关节功能不断下降,膝关节角度变化范围明显的增大,膝关节峰值功率显著性降低,最大横向和纵向的冲击力明显增大,垂直蹬伸力显著性降低。这些生物力学参数的改变,不但

大幅降低了跳深训练的效果,同时增大了关节和肌肉损伤的风险。因此,教练员应根据运动员的机能状况、力量基础和训练水平,选择跳深适宜的负荷量与强度。

参考文献:

- [1] Yoshikawa T S, MoRi. The effects of muscle fatigue on bone strain[J]. *J Exp Biol*, 1994, 188: 217-233.
- [2] Kyrolainen H, Komi P V, Kim D H. Effects of power training on neuromuscular performance and mechanical efficiency[J]. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*(in press), 1991: 78-87.
- [3] 罗炯. 超等长练习机制与跳深训练法研究述评[J]. *天津体育学院学报*, 2005, 20(2): 21-23.
- [4] 张立, 宋高晴. 划船运动员静力及动力性肌肉运动疲劳时肌氧含量的变化特征及对参数的影响[J]. *体育科学*, 2006, 3(26): 53-57.
- [5] Siff M C, Verkoshansky Y V. *Supertraining*[M]. 4th ed. Denver, CO: Supertraining International, 1999: 500.
- [6] Kieran A M, Brendan M M. Effect of fatigue on tibial impact accelerations and knee kinematics in drop jumps[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2006(10): 1836-1842.
- [7] Komi P V, Micol C. Stretch-shortening cycle fatigue. In: *Biomechanics and biology of movement*[M]. Human Kinetics Publishers, Champaign, IL. (in press). 2000.
- [8] Takaishi T, Yamamoto T, Ono T, et al. Neuro-muscular, metabolic, and kinetic adaptations for skilled pedaling performance in cyclists[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1998(30): 442-449.
- [9] Elvin N G, Elvin A A. The correlation of segment accelerations and impact forces with knee angle in jump landing[J]. *J Appl Biomech*, 2007(23): 203-212.
- [10] 扎齐奥尔斯基. 运动生物力学——运动成绩的提高与运动损伤的预防[M]. 北京: 人民体育出版社, 2004: 100.
- [11] Buckwalter J A, Mankin H J. Articular cartilage: degeneration and osteoarthritis, repair, regeneration, and transplantation[J]. *Instructional Course Lectures*, 1998, 47: 487-504.

[编辑: 周威]