

## 恒功率运动性疲劳的生理生化指标

蒋炳宪, 周健生

(衡阳师范学院 体育系, 湖南 衡阳 421008)

**摘 要:** 比较恒功率不同阻力下运动性疲劳的生理、生化特点, 探寻恒功率不同阻力下运动性疲劳的发生和恢复规律。选取 15 名健康男生, 用功率自行车进行 5 次 300 W 恒功率运动测试, 每次测试采用不同运动阻力, 运动后即刻记录运动时间, 测试心率、血压、血红蛋白(Hb)、尿素素(BU)以及血液肌酸激酶(CK), 次日晨再次测试 Hb、BU、CK。结果表明: 在预定功率的恒功率运动中, 阻力过低或过大都不利于延长运动时间, 适宜的阻力才可以维持较长的运动时间; 工作肌收缩频率增加易导致心率增加和血红蛋白损伤, 工作肌收缩阻力增加易导致血压升高和 BU、CK 恢复减慢。

**关 键 词:** 运动生理学; 运动生物化学; 恒功率; 运动性疲劳

中图分类号: G804.7 文献标识码: A 文章编号: 1006-7116(2009)08-0105-04

### Characteristic study on physiological and biochemical indexes of isopower cycling-induced fatigue

JIANG Bing-xian, ZHOU Jian-sheng

(Department of Physical Education, Hengyang Normal University, Hengyang 421008, China)

**Abstract:** To analyze physiological and biochemical character after isopower cycling, and to look for the law of emergency and recovery of isopower cycling-induced fatigue. Methods: 15 male students were subjected to 5 cycling tests with isopower 300W and different resistance. Duration, heart rate and blood pressure were documented immediately after every test, hemoglobin (Hb), bloody urine (BU) and creatine kinase (CK) were detected immediately after exercise and the next morning. Results and conclusion: In emergency and recovery of isopower cycling-induced fatigue, the contractive frequency of working muscle is in contrast to the contractive force. The increase of contractive frequency of working muscle is prone to induce increase in heart rate and injury of hemoglobin, the increase of contractive force of working muscle is prone to induce increase in blood pressure and delay of BU and CK recovery.

**Key words:** exercise physiology; exercise biochemistry; isopower; exercise-induced fatigue

研究表明, 衰老骨骼肌输出功率的下降比力量下降快, 通过运动维持老年人骨骼肌的输出功率比维持肌力更重要<sup>[1]</sup>。Metter 等<sup>[2]</sup>也有类似的发现, 衰老过程中肌肉输出功率比肌力下降快, 肌肉输出功率随着衰老下降的部分特征在肌肉萎缩时也发生。原因在于: II 型肌纤维比 I 型肌纤维有较高的功率输出能力, 而且 II 型肌纤维随衰老萎缩较快<sup>[2]</sup>。骨骼肌的输出功率是其收缩速度与收缩力(或运动时骨骼肌所受阻力)的乘积( $P=F \cdot v$ , 希尔方程)。因此, 功率是综合评价肌

肉收缩速度和肌力的重要指标<sup>[3]</sup>。理想状态是最大肌力时发挥最大收缩速度, 输出最大功率; 但由希尔方程可知, 骨骼肌的收缩速度与其收缩力是成反比的, 骨骼肌只在特定的收缩速度和收缩力下才可能发挥最大功率。适宜的运动强度是身体锻炼、体育教学与科学训练的最基本原则。因此, 执行运动方案时必须在收缩速度和收缩力之间做出一种适宜的选择。

在社区、学校的健身房, MONARK 功率自行车已广泛用于身体锻炼、体育教学或训练。我们经常碰到

的问题是:在预设功率和时间后,运动方式在速度(飞轮转速)和阻力(阻力砝码)之间该如何进行选择呢?不同的选择可能有着不同的疲劳特点和运动效果,从医务监督角度讲也需要不同的监控策略。本研究将利用 MONARK 功率自行车进行恒功率测试,比较恒功率不同阻力条件下运动性疲劳的生理、生化特点,探寻恒功率不同阻力下运动性疲劳的发生和恢复规律,旨在为身体锻炼、体育教学或训练过程中运动方式的选择以及医务监督提供科学依据。

## 1 研究对象和方法

### 1.1 测试对象

体育系 15 名男生,年龄 20~24 岁,身高(174.0±2.8) cm,体重(69.0±5.7) kg,身体健康、无病史、下肢肌肉未受过伤,每次测试前 24 h 内未从事剧烈运动,无疲劳感。

### 1.2 测试仪器

功率自行车: M 894E 型、腕式脉搏血压计、欧姆龙(OMRON)、BT-224 型半自动生化分析仪。

### 1.3 测试程序

#### 1) 预定功率及实验方案。

正式实验前让所有受试者预适应功率自行车的骑行姿势,调节座椅和扶手高度。根据受试对象的机能状况、最大蹬车速度、最大蹬车力确定适宜的预定功率以及阻力砝码的加重范围。制定方案如表 1。

表 1 恒功率运动性疲劳测试方案

运动轮次	预定功率/W	转速 (r·min <sup>-1</sup> )	阻力砝码/kg
第 1 次	300	200±5	1.5
第 2 次	300	100±5	3.0
第 3 次	300	60±5	5.0
第 4 次	300	50±3	6.0
第 5 次	300	30±3	10.0

#### 2) 检测指标。

正式实验前 1 周的星期一晨(7:00~7:30),所有受试者在安静状态下测试心率、血压、血红蛋白(Hb)、血尿素(BU)以及血液肌酸激酶(CK)。Hb 采用高铁氰化钾法测定,CK 和 BU 的测定采用酶学方法,试剂盒由南京建成生物工程有限公司提供。

正式实验的第 1 周至第 5 周,每周日晚(19:00~21:30)按表 1 方案进行 1 次急性运动测试。要求受试者戴好腕式脉搏血压计,根据功率自行车液晶屏上的转速变化,自动调整腿部动作,使转速迅速达到并控制在指定范围内,尽最大努力延长运动时间,

直至受试者不能维持预定转速持续超过 10 s,即认定运动性疲劳。即刻记录运动时间,测试心率、血压,采指尖血测试 Hb、BU 及 CK。次日晨(7:00~7:30),再次采指尖血测试 Hb、BU 及 CK。

### 1.4 数据统计

借助 Excel 软件对结果进行统计学处理,各次实验结果以平均值±标准差( $\bar{x} \pm s$ )表示,运动后即刻与运动后次晨比较采用配对 *T* 检验;不同阻力下指标的比较用单因素方差分析,以  $P < 0.05$  为差异显著性标准。

## 2 结果及分析

### 2.1 不同阻力恒功率运动性疲劳时的运动时间、心率和血压

运动时间、心率和血压随运动阻力的变化趋势如图 1 所示:在 300 W 恒功率运动负荷下,运动所能持续的时间在阻力为 5.0 kg 时最长,阻力过低(1.5 kg)或过大(10.0 kg)时运动时间都显著缩短(与阻力 5.0 kg 比较,  $P < 0.01$ )。不同阻力运动疲劳时的心率均显著高于安静值(与安静值比较,  $P < 0.01$ ),在阻力 1.5~6.0 kg 范围内,运动疲劳时的心率差异无显著性,但它们均高于阻力 10.0 kg 运动疲劳时的心率(与阻力 10.0 kg 比较,  $P < 0.01$ )。运动疲劳时的收缩压随阻力增加而增加,但舒张压在阻力 1.5~3.0 kg 无显著变化,在阻力 5.0~10.0 kg 才显著增加(与阻力 1.5、3.0 kg 比较,  $P < 0.01$ ),在阻力 10.0 kg 时,收缩压和舒张压均达到最大。

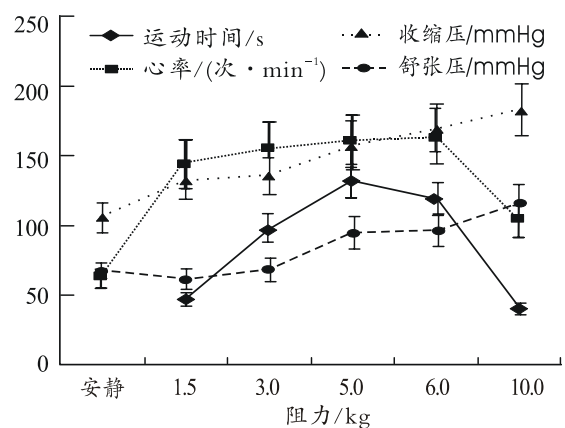


图 1 不同阻力恒功率运动性疲劳时的运动时间、心率和血压

### 2.2 不同阻力恒功率运动性疲劳后的 Hb、BU 及 CK

血红蛋白随运动阻力的变化趋势如图 2 所示:在 300 W 恒功率运动负荷下,运动后及次日晨的 Hb 均在生理正常值范围内波动,尽管阻力 1.5 kg 运动后即刻的 Hb 值显著降低(与安静值比较,  $P < 0.05$ )。从该

指标来看, 在阻力 3.0~10.0 kg 范围内, Hb 对不同阻力恒功率运动的即刻反应没有表现出差异性, 但运动后的恢复在阻力 1.5 kg 时表现较明显(与阻力 1.5 kg 运动后即刻比较,  $P<0.05$ )。

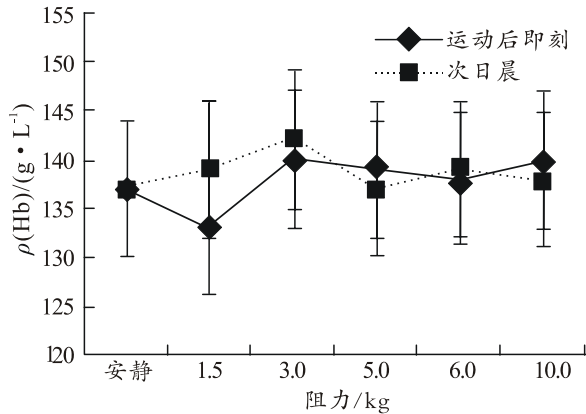


图2 不同阻力恒功率运动性疲劳后的血红蛋白变化

血尿素随运动阻力的变化趋势如图3所示: 在 300 W 恒功率运动负荷下, 运动后即刻的 BU 水平均高于安静值(与安静值比较,  $P<0.01$ ), 运动后即刻的 BU 水平基本上随阻力增加而增加, 阻力 10.0 kg 时达到最大; 在阻力 1.5~3.0 kg, 次日晨 BU 有较明显的恢复迹象(与同阻力条件下运动后即刻比较,  $P<0.05$ ); 但在阻力 5.0~10.0 kg, 次日晨 BU 没有明显的恢复迹象。

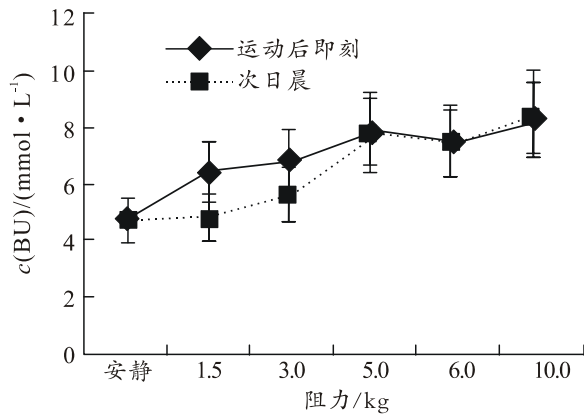


图3 不同阻力恒功率运动性疲劳后的血尿素变化

血液肌酸激酶随运动阻力的变化趋势如图4所示: 在 300 W 恒功率运动负荷下, 运动后即刻的 CK 水平均高于安静值(与安静值比较,  $P<0.05$ ), 在阻力 1.5~6.0 kg 范围内, 运动后血液 CK 水平随阻力增加而增加, 但在阻力 10.0 kg 时运动后血液 CK 水平骤减(与阻力 6.0 kg 比较,  $P<0.01$ ); 在阻力 1.5~6.0 kg, 次日晨血液 CK 水平都有明显的恢复迹象(与同阻力条件下运动后即刻比较,  $P<0.05$ ), 但阻力 10.0 kg 时次日晨

血液 CK 水平没有明显的恢复迹象。

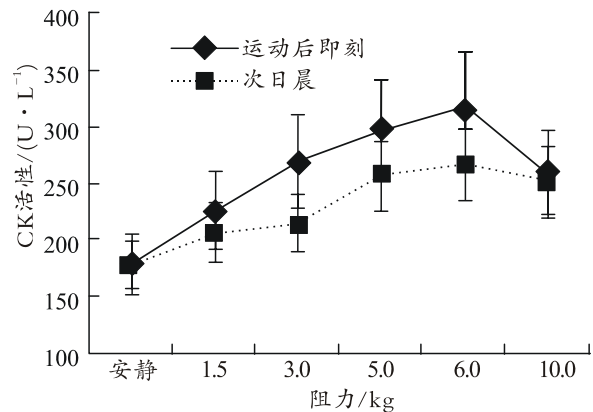


图4 不同阻力恒功率运动性疲劳后的血液肌酸激酶变化

### 3 讨论

MONARK 894E 型功率自行车的液晶显示屏能实时显示运动时间、转速、功率和总热能消耗, 且蹬车阻力可由砝码调节, 本实验依据 MONARK 894E 型功率自行车实时显示特点设计了一个近似的恒功率测试试验(实验中的功率只能控制在 300 W 上下的指定范围内, 但不可能保持功率绝对恒定)。结果显示, 在 300 W 恒功率运动负荷下, 运动所能持续的时间在阻力为 5.0 kg 时最长, 阻力过低(1.5 kg)或过大(10.0 kg)时运动时间都显著缩短。这一结果与希尔方程的基本原理是一致的。因为阻力过低时要求工作肌维持较高的收缩速度和收缩频率, 阻力过高时要求工作肌维持较大的收缩力, 这对工作肌而言都难以持久。本研究选取 300 W 恒功率测试, 受试者运动时间最长没有超过 3 min。所以, 300 W 恒功率运动属于一种短时间、大强度的运动方式, 其疲劳主要体现为外周疲劳, 导致神经肌肉不能维持预定转速<sup>[4]</sup>。由于运动功率是近似恒定的, 所以运动时间越长, 总热能消耗越多。在以消耗热量为目的的运动中, 在设定运动功率后, 应选择一个适宜的阻力负荷执行运动方案。心率的观测结果表明, 在恒功率前提下, 蹬车阻力过大时, 心率增幅反而下降; 说明工作肌收缩频率增加更容易导致心率的增加。血压的观测结果表明, 在恒功率前提下, 蹬车阻力过大时, 收缩压和舒张压的增幅非常显著, 说明工作肌收缩力增加更容易导致血压的增加。

Hb 是评定机能状态的经典生化指标之一。血红蛋白的生理功能是运输氧和二氧化碳, 对酸性物质有缓冲作用, 参与体内的酸碱平衡调节。研究表明血红蛋白为  $1.6 \times 10^{-3}$  g/mL、红细胞压积为 45% 左右, 是运动员表现出良好有氧能力的最佳值<sup>[5-6]</sup>。本实验结果显示, 运动后的 Hb 恢复在阻力 1.5 kg 时表现较明显,

表明工作肌收缩频率过大对血红蛋白可能有损伤,次日晨血红蛋白的修复性回升可能是超量恢复的一种表现。

血尿素可以综合反映机体蛋白质代谢水平及其承受负荷的能力<sup>[7]</sup>。我国正常人晨空腹安静时血尿素范围在4.65~6.64 mmol/L。大负荷的运动训练才会动用蛋白质作燃料,使血尿素生成明显增多,因而依此可作为推测承受运动负荷的大小及疲劳监测的指标。大运动量训练后血尿素明显增加,被认为是蛋白质或氨基酸代谢剧烈的结果,这种现象不仅发生于运动员不适应训练负荷时,而且还会延续到运动后的恢复期<sup>[8]</sup>。当运动员运动后次日晨血尿素大于基础值两个单位时或次日晨及第三日血尿素值持续维持在高水平,说明运动员身体机能下降,对运动负荷不适应<sup>[9]</sup>。本实验观察到,在阻力1.5~3.0 kg范围内次日晨BU有较明显的恢复迹象,但在阻力5.0~10.0 kg范围内次日晨BU没有明显的恢复迹象;表明工作肌收缩阻力较大时,血尿素的恢复较慢,次日晨的蛋白质代谢水平可能还处于氮负平衡状态。

肌酸激酶(CK)也是反映骨骼肌能量代谢、肌肉承受负荷和运动员恢复状况的较好指标。血液CK增加由肌膜通透性增加,肌纤维CK释放入血所致<sup>[10]</sup>。运动员机能下降时,安静时血清CK活性上升,定量负荷后,如果血清CK活性上升幅度减小或者恢复加快,说明对负荷适应,并且高水平运动员的肌肉损伤较一般运动员恢复得更快。血清CK“训练值”主要反映机体对运动负荷大小的应激程度,“恢复值”更能反映机体对训练负荷的适应和训练后的恢复状况<sup>[11]</sup>。本实验结果显示,在阻力1.5~6.0 kg范围内次日晨血液CK水平都有明显的恢复迹象,但阻力10.0 kg时次日晨血液CK水平没有明显的恢复迹象,表明阻力较低时血液CK水平容易恢复。值得注意的是,CK的“训练值”并不一直随阻力增加而增加,阻力10.0 kg恒功率运动后即刻的血液CK并不是最高,表明机体对运动负荷的应激程度不仅与工作肌收缩阻力有关,还与运动时间有关。阻力10.0 kg时CK“训练值”低于阻力6.0 kg,与阻力10.0 kg时运动时间过短有关,但阻力10.0 kg时CK恢复的迟滞性表明工作肌在对抗高阻力时肌膜可能存在较大的损伤,导致血液CK在次日晨没有恢复迹象。

总之,在300 W恒功率运动疲劳及恢复期,运动

阻力对运动时间、心率、血压、Hb、BU、CK等常见指标有着不尽相同的影响,表明收缩阻力和收缩频率对工作肌及机体而言是两种完全不同的生理刺激,机体在不同的运动阻力下各具疲劳特点和恢复特点。在指导身体锻炼、体育教学或训练时,应关注不同阻力运动时的疲劳特点和恢复特点,在收缩阻力和收缩频率之间作出适宜的选择,并给予相应的医务监督。

### 参考文献:

- [1] Young A, Skelton D A. Applied physiology of strength and power in old age [J]. *Int J Sports Med*, 1994, 15(3): 149-151.
- [2] Metter E J, Laura A. Arm-cranking muscle power and arm isometric muscle strength are independent predictors of all-cause mortality in men [J]. *J Appl Physiol*, 2004, 96(2): 814-821.
- [3] Hruda K V, Hicks A L, McCartney N. Training for muscle power in older adults: effects on functional abilities [J]. *Can J Appl Physiol*, 2003, 28(2): 178-189.
- [4] 冯连世,冯炜权,冯美云. 优秀运动员身体机能的评定方法[M]. 北京:人民体育出版社,2004.
- [5] 李秋萍,杨海平,张宏缓,等. 优秀足球运动员赛前训练的机能指标监测与分析[J]. *沈阳体育学院学报*, 1997(2): 32-35.
- [6] 李宗涛. 优秀皮划艇运动员机能评定的研究现状和思考[J]. *山东体育科技*, 2007, 29(2): 88-91.
- [7] 郑小萍,陈灵芝. 大负荷训练对青少年男子篮球运动员生理生化指标的影响[J]. *体育学刊*, 2000, 7(2): 435.
- [8] 陈汉华. 优秀足球运动员的身体机能评定[J]. *北京体育大学学报*, 2004, 27(6): 790-792.
- [9] 孙文新. 中国国家足球队备战16届世界杯科学训练探索[J]. *广州体育学院学报*, 2000, 20(6): 65-69.
- [10] 丁丽萍,徐烈. 血清肌酸激酶、血尿素氮对武术套路运动员赛前训练监控的应用研究[J]. *中国体育科技*, 2003, 39(10): 37-39.
- [11] 袁青. 血清肌酸激酶的运动训练负荷监控作用研究述评[J]. *体育学刊*, 2007, 14(6): 40-44.

[编辑:郑植友]