

· 运动生理 ·

摄氧量动力学的指数函数方程及对工作能力的影响

EXPONENTIAL FUNCTIONAL EQUATIONS OF $\dot{V}O_2$ KINETICS AND ITS INFLUENCE ON WORK CAPACITY

刘洵* 张淑霞 Liu Xun ZHANG Shuxia

摘要 摄氧量动力学反映的是运动开始后摄氧量逐渐增加至稳定状态过程的变化情况,其曲线在小于无氧阈强度时呈单因素指数函数方程特征,在大于无氧阈强度时呈双因素指数函数方程特征,即包含了乳酸成分。

关键词 摄氧量动力学 单因素指数函数方程 双因素指数函数方程

Abstract: Objective of the research project of $\dot{V}O_2$ kinetics is the changes of $\dot{V}O_2$ during unconstant work rate. $\dot{V}O_2$ increases with characteristic of one-component exponential function at the onset of exercise when intensity is below anaerobic threshold. Whereas the curve of $\dot{V}O_2$ shows the characteristic of two-component exponential function at the same time when intensity is above anaerobic threshold because of lactic acid getting involved. By undergoing the investigation on the $\dot{V}O_2$ kinetics we can deeply understand physiological changes of the body which can directly influence work capacity. So, as far as the question of how to improve work efficiency is concerned, it is necessary to do research on this field.

Key words: $\dot{V}O_2$ Kinetics one-component exponential functional equation two-component exponential functional equation

恒定负荷运动的摄氧量动力学($\dot{V}O_2, KNT$)反映的是运动开始后 $\dot{V}O_2$ 逐渐增加至稳定状态过程的变化情况,即机体进入工作状态时的 $\dot{V}O_2$ 反应。

70年前 Krogh 等就注意到次最大负荷工作的开始阶段的 $\dot{V}O_2$ 低于稳定状态时的 $\dot{V}O_2^{[1]}$ 。动力性肌肉活动开始后心血管和肺脏最初的再调节不能使活动肌肉氧化反应所需的全部氧都由大气得来,在这非稳态阶段,为了活动的继续,附加的能量需由氧储的空亏,高能磷酸物质的分解及无氧酵解的增加来满足。之后,随着心血管和肺脏调节能力的不断加强,由大气获得氧的比例逐渐增加直至稳定状态。此时全部能量均由有氧代谢供给。

* 男 40岁 副教授 天津体育学院 300381

1 $\dot{V}O_2$ KNT 的单因素指数函数方程

关于运动开始阶段 $\dot{V}O_2$ 的变化趋势 Henry 首先对此问题进行了详细的报导。他提出:在小、中及中上强度运动的初期非乳酸时相, $\dot{V}O_2$ 与时间成非线性相关的概念, 具数学模型为单因素指数函数方程 $\dot{V}O_{2(t)} = \dot{V}O_{2(ss)}(1 - e^{-kt})$ 。 $\dot{V}O_{2(t)}$ 为 t 时的 $\dot{V}O_2$ 与安静时 $\dot{V}O_2$ 之差; $\dot{V}O_{2SS}$ 为稳定状态 $\dot{V}O_2$ 与安静时 $\dot{V}O_2$ 之差; K 是 $\dot{V}O_{2(ss)}$ 反应的时间常数单位为秒⁻¹[2]。据此, $\dot{V}O_2$ 半时反应时间($T_{1/2\dot{V}O_2}$ 即 $\dot{V}O_2$ 达到稳定状态一半所需要的时间)为 $0.693K$; 氧亏(O_2D)为 $\dot{V}O_{2ss}/k$ 。故用此方程可估计静脉氧储备的变化, 以及氧转运过程中与产生乳酸(LA)相当的氧量。公式确定肌肉中摄取氧变化与肺部摄取氧的变化同步, 而静脉氧储备的变化贯穿于整个非稳态阶段。之后, 其化学家也对 $\dot{V}O_2$ KNT 变化进行了不同的研究^[34]。但他们发现此方程应用于强度小于无氧阈的运动较为适宜。

2 LA 成分的介入

关于 LA 的生成 Holloszy 认为从细胞代谢的调节来看, 线粒体呼吸被活动开始后增加的 ADP、Pi 和 NADH 激活。ADP 增加不但可激活有氧 ATP 的产生, 而且可通过肌酸激酶反应使 PCr 分解放出 Pi^[5]、Pi、ADP 和 AMP(通过腺苷酸激酶反应产生)的增加可激活糖原分解和糖酵解使 LA 生成率增加。无氧能量利用增加减少了有氧能量利用(如能量需要是常量), 结果使运动开始阶段 $\dot{V}O_2$ 相对降低。当 ADP、Pi 和 NADH 结集到一定程度, 线粒体呼吸将与 $\dot{V}O_2$ 保持平衡。故无氧能量利用和 O_2D 在线粒体呼吸被激活后是必需的。Mercier 等人也认为运动中非乳酸供能与乳酸供能是并存的, 既使是在轻负荷时亦是如此^[6]。因此, 在 $\dot{V}O_2$ KNT 的研究领域里 LA 成分是不容忽视的。

3 $\dot{V}O_2$ KNT 的双因素指数函数方程

dipramero 在其研究中指出: 在强度为 50~70% $\dot{V}O_{2max}$ 的有氧活动开始阶段, 总氧亏 $(\frac{\dot{V}O}{K}) = \frac{\dot{V}O_2}{k} + \Delta s + \dot{V}O_2 LA$ 。其中 $\frac{\dot{V}O_2}{k}$ 为非 LA 部分, $\dot{V}O_2 LA$ 为 LA 部分, Δs 为来自体内的氧储^[7]。考虑到 LA 成分在恒定负荷运动非稳态阶段所起到的作用, Henry 等人提出了运动中 $\dot{V}O_2$ 的曲线是双因素体系的概念, 即 $\frac{dO_x}{dt} = a_i(1 - e^{-k_i t}) + a_{ii}(1 - e^{-k_{ii} t})$ 。其中 $\frac{dO_x}{dt}$ 为 t 时的 $\dot{V}O_2$, a_i 相当于非乳酸部分, a_{ii} 相当于乳酸部分。即小强度运动, O_2D 可由非乳酸部分来承担。此时, 肌肉和血中 LA 的积累较少, 故方程近似的呈单因素指数特征; 而强度加大时, 糖酵解供能占据了无氧能量供应的较大比例, LA 产生增多故方程显双因素指数函数特征, 此时的 O_2D 包括: 1. 相当于 ATP、Pcr 分解的氧量; 2. 产生出血 LA 的氧当量。3. 体内氧储的下降。Astrand 认为: LA 的生成与组织缺氧有关。如组织的可得氧(从肌肉血流中获取)和利用氧增多, 即双因素指数函数方程的斜率 k_i 加大, 那么在恒定负荷工作时其能量则主要由在线粒体内进行的 krebs 氏循环来提供。此时 ADP、Pi 和 NADH 集结较少, 因此 LA 生成不多^[9]。Karlsson 等

Saltin 等也有相同的报导。Hagberg 认为大强度活动时,由于需氧量增多、呼吸、循环及代谢均需较大的变化。但由于内脏器官惰性所致, $\dot{V}O_2$ 增加的半时反应时间延长,故缺氧程度加大,LA 生成增多^[2]。katz 等指出:以氧利用率为基准的氧可得性降低导致了 $NAD^+/NADH$ 的减小,后者使丙酮酸/乳酸也随之变化,且二者成比例^[13]。显然,LA 的增加量在一定程度上可以反应出组织的缺氧状况。

4 $\dot{V}O_2KNT$ 与工作能力的关系

从事中等以上恒定负荷工作时,如在其开始阶段氧投递能够迅速增加,线粒体在得到充足的氧后也能有效地利用它(即接受通过电子传递体系逐步传递的作用物脱下的氢,同时进行氧化磷酸化)此时便可放出大量的能量。这样消耗较少的能源物质就能满足工作中的能量需要,且无氧酵解供能比例相对较小,LA 生成也较少。由于能源物质消耗少故工作后疲劳程度轻、恢复也快。从提高工作效率角度考虑,此时既可延长工作时间又可加大工作强度。反之,如工作开始阶段 $\dot{V}O_2$ 增加慢,则无氧酵解供能比例加大,LA 生成增多。肌肉中 H^+ 的增多不但可抑制磷酸果糖激酶(PEK),从而抑制糖酵解使 ATP 再合成速度减慢;而且也可从原宁蛋白中置换 Ca^{2+} 阻碍肌肉收缩;同时还能阻碍神经—肌肉接点的兴奋传递及抑制脂肪酶活性,限制自由脂肪酸(FFA)释放而降低脂肪氧化供能,这些不良作用将会导致肌肉工作能力的降低。因此,研究 $\dot{V}O_2KNT$ 变化特点可深入地了解机体进入工作状态时的生理变化,这对探讨如何提高工作效率则是必需的。

参考文献

- 1 Krogh A and Lindhard J. The changes in respiration at the transition from work to rest. *J. Physiol. lond.* 1920;53: 431~439
- 2 Henry FM. Aerobic oxygen consumption and alactic debt in muscular work. *J. Appl. Physiol.* 1951;3:427~438
- 3 Donald KW, Cumming G and Wade OL. The effect of exercise on cardiac output and circulatory dynamics of normal subjects. *Clin. Sci.* 1955;14: 37~73
- 4 Whipp BJ. Rate constant for the kinetics of oxygen uptake during light exercise. *J. Apl. Physiol.* 1971;30;2:261~263
- 5 Holloszy JO. Biochemical adaptation to exercise, aerobic metabolism. In: *Exercise and Sport Sciences Reviews*, edited by J. Wilmore. New York, Academic, 1973;5:45~71
- 6 Mercier J, Mercier B and Prefaut C. Blood lactate increase during the force velocity exercise test. *Int. J. Sports Med.* 1991;12: 1: 17~20
- 7 Diprampero PE, Davies CTM, Cerretelli P and Margaria R. An analysis of O_2 debt contracted in submaximal exercise. *J. Appl. Physiol.* 1970;29;5:547~551
- 8 Henry FM and Demoor JC. Lactic and alactic oxygen consumption in moderate exercise of graded intensity. *J. Appl. Physiol.* 1957;8: 608~614
- 9 Astrand PO and Rodahl K. *运动生理学*. 北京:人民体育出版社. 1982

(收稿:1994-09-24)

本文责任编辑 杨有为