

·运动人体科学·

## 正常和低氧环境下递增负荷运动时通气阈、乳酸阈的变化

张琴, 肖国强, 许小辉

(华南师范大学 体育科学学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 通过测试10名体育专业学生在正常与模拟1000、1500 m低氧环境下进行递增负荷运动中气体代谢、血乳酸等指标变化, 观察低氧对机体乳酸阈和通气阈的影响。结果显示: 1) 三种环境下, 通气阈分别是: (720.0±71.8) s、(631.1±60.1) s、(616.0±40.0) s; 乳酸阈时间是(826.67±72.11) s、(816.00±94.66) s、(744.00±94.66) s。2) 随着氧分压的降低, 通气阈均早于乳酸阈出现, 通气阈和乳酸阈时各指标的绝对值下降, 但其百分比值变化不大。3) 正常环境下, 乳酸阈和通气阈的相关性系数 $r>0.65(P<0.05)$ , 但模拟1000 m与模拟1500 m相关性系数 $r<0.60(P>0.05)$ 。结论: 1) 通气阈和乳酸阈的指标及其百分比值可以用来衡量或评价运动训练效果、指导运动训练; 2) 进入较高海拔后, 应当适当调整运动强度, 以适应环境的变化。

**关键词:** 运动生理学; 低氧; 气体代谢; 通气阈; 乳酸阈

中图分类号: G804.2 文献标识码: A 文章编号: 1006-7116(2009)07-0105-05

### Changes of ventilation threshold and lactic acid threshold during load gradually increased exercising in normal and hypoxic environments

ZHANG Qin, XIAO Guo-qiang, XU Xiao-hui

(School of Physical Education, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** By measuring the changes of such indexes as gas metabolism and blood lactic acid of 10 students majoring in physical education during load gradually increased exercising in normal and simulated 1,000m and 1,500m hypoxic environments, the authors observed the effects of hypoxia on the body's lactic acid threshold and ventilation threshold, and revealed the following findings: 1) in the three environments, the ventilation thresholds are (720.0±71.8) s, (631.1±60.1) s and (616.0±40) s respectively; the lactic acid threshold times are (826.67±72.11) s, (816.00±94.66) s and (744.00±94.66) s; 2) with the decrease of partial oxygen pressure, the ventilation threshold appeared earlier than the lactic acid threshold, and the absolute value of such indexes as ventilation threshold and lactic acid threshold decreased, but their percentage changed little; 3) in a normal environment, the coefficient of correlation between lactic acid threshold and ventilation threshold  $r>0.65(P<0.05)$ , but in simulated 1,000m and 1,500m hypoxic environments,  $r<0.60(P>0.05)$ . Conclusions: 1) such indexes as ventilation threshold and lactic acid threshold as well as their percentage can be used to measure or evaluate sports training effects and to guide sports training; 2) for training in a place at a higher altitude, the exercise intensity should be appropriately adjusted, so that the athletes can adapt to the change of environment.

**Key words:** sports physiology; hypoxia; gas metabolism; ventilation threshold; lactic acid threshold

随着社会经济的发展, 人们对健康的认识提高, 意识到运动休闲对健康的促进作用很大, 所以选择假期出外旅游, 登山也就成了时尚的选择。登山不仅锻炼身体, 舒展心情, 解脱工作压力, 而且可以享受大

自然的美景, 享受挑战自我、战胜自然的自豪。登山过程中, 随着海拔的升高, 气压减小、氧分压降低、机体运动能力下降, 若以相同的速度继续登山, 则越来越困难, 因为机体的缺氧一方面是因为运动需氧量

保持或者增加,另一方面是由于外界氧分压降低,机体摄氧减少或更加困难。

本实验从模拟低氧的角度对登山运动进行研究,其意义主要是为大众健身、平民体育、生活体育服务。同时也希望能够为登山运动训练提供参考。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

本实验的对象为 10 名本校体育科学学院本科学学生,身体健康,经询问无代谢和心肺系统疾病史。年龄( $20.8 \pm 1.03$ )岁、身高( $177.2 \pm 7.37$ ) cm、体重( $68.27 \pm 7.40$ ) kg、脂肪百分比( $14.31 \pm 3.63$ )%、BMI( $21.71 \pm 1.43$ )  $\text{kg}/\text{cm}^2$ 。所有受试者均为自愿参加。

### 1.2 研究方法

实验地点在体育科学学院呼吸代谢实验室,分别为正常环境、模拟 1 000 m、模拟 1 500 m 环境。模拟 1 000 m、模拟 1 500 m 环境在低氧帐篷里进行,开动低氧发生器使氧气体积分数降低,氧气体积分数分别控制在 18.5%、17.4%,气压与外界正常大气压一致。

根据参考文献,我们采用递增负荷方法进行测定;首先在功率自行车上 0 W 蹬踏 4 min,然后以每 min 递增 20 W 功率继续进行运动,直至力竭,转数控制在 60 r/min。测试指标为:VE、 $V(\text{CO}_2)$ 、血乳酸。

### 1.3 数据处理

实验结果采用 Excel2003 和 SPSS14.0 进行统计学处理,数据结果采用  $\bar{x} \pm s$  表示,显著性采用 SPSS14.0 进行  $T$ -test 来检验,显著性差异水平  $\alpha$  取 0.05。

## 2 结果及分析

### 2.1 通气量(VE)的变化

由图 1 所示,模拟 1 000 m 环境各个时段的 VE 均高于正常环境,并且在第 6、8、9、11、12、14 min 点处的差异具有显著性。模拟 1 500 m 环境,VE 在运动前 6 min 通气量与正常环境下接近,且稳定在 20 L/min 附近。第 6 min 以后,模拟 1 500 m 环境下的 VE 逐渐增加,增加幅度大于正常环境,第 9 min 时差异具有非常显著性( $P < 0.01$ ),其他时段的差异均无显著性。模拟 1 000 m 与模拟 1 500 m 相比,模拟 1 000 m 在各个时段的 VE 均要高于模拟 1 500 m 环境,并且在第 2、3、5、6、8 min 处差异具有显著性( $P < 0.05$ )。最大通气量分别为( $102.8 \pm 12.6$ )、( $102.6 \pm 18.2$ )、( $93.2 \pm 11.1$ ) L,模拟 1 500 m 与前两者相比,差异具有显著性( $P < 0.01$ )。

### 2.2 血乳酸浓度的变化

安静血乳酸(BLa)约为 1.50 mmol/L 上下。运动中前 12 min BLa 增加缓慢,通过曲线图(图 2)可以看出呈线

性变化,但 12 min 后, BLa 迅速增加,偏离了原来的线性曲线。12 min 时,正常环境与模拟 1 000、1 500 m 环境下 BLa 值分别为( $3.18 \pm 0.48$ )、( $3.05 \pm 0.75$ )、( $3.90 \pm 1.20$ ) mmol/L,模拟 1 500 m 与模拟 1 000 m 之间差异具有显著性( $P < 0.05$ )。14 min 时分别为( $4.39 \pm 0.76$ )、( $4.54 \pm 0.97$ )、( $5.22 \pm 1.48$ ) mmol/L,模拟 1 500 m 与模拟 1 000 m 相比较,差异具有显著性( $P < 0.05$ )。

运动后即刻 BLa 值分别为( $9.58 \pm 1.40$ )、( $7.22 \pm 1.38$ )、( $6.57 \pm 1.50$ ) mmol/L;运动后 3 min 的值分别为( $11.31 \pm 2.09$ )、( $8.03 \pm 1.53$ )、( $7.53 \pm 1.70$ ) mmol/L,达到峰值。与正常环境下相比, BLa 值呈现逐渐下降趋势,且具有非常显著性差异( $P < 0.01$ )。

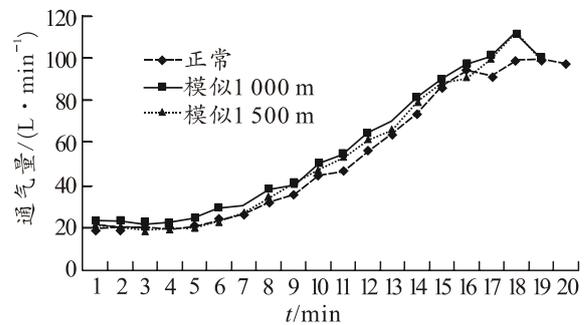


图 1 通气量-时间变化曲线

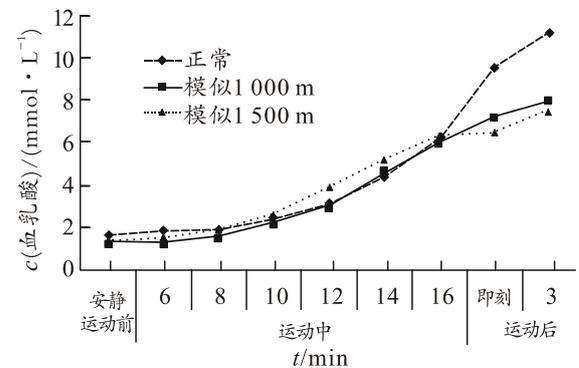


图 2 血乳酸浓度-时间变化曲线

### 2.3 通气阈与乳酸阈时各指标的变化及相关性

如表 1 所示,通气阈出现时间呈现下降趋势,与正常环境相比,模拟 1 000 m 的差异具有显著性( $P < 0.05$ ),模拟 1 500 m 的差异具有非常显著性( $P < 0.01$ )。但其百分比值是先降后升。通气阈时的通气量呈现逐渐降低的趋势,其中模拟 1 500 m 与正常环境和模拟 1 000 m 相比,差异具有显著性( $P < 0.05$ )。其百分比也呈现下降趋势,但变化不明显。通气阈时功率逐渐下降,与正常环境相比,模拟 1 000 m 时的差异具有显著性( $P < 0.05$ ),模拟 1 500 m 时的差异具有非常显著性( $P < 0.01$ )。

与正常环境相比,模拟 1 500 m 乳酸阈出现时间和功率的差异都具有显著性( $P<0.05$ ),而与模拟 1 000 m

相比,差异具有非常显著性( $P<0.01$ )。乳酸阈时通气量、 $V(\text{CO}_2)$ 呈现逐渐降低趋势,但差异没有显著性。

表 1 三种环境下通气阈和乳酸阈各指标测试结果 ( $\bar{x} \pm s$ )

测试环境	$t/s$		$t$ 百分比/%		VE/L		VE 百分比/%	
	通气阈	乳酸阈	通气阈	乳酸阈	通气阈	乳酸阈	通气阈	乳酸阈
正常	720.0±71.8	826.67±72.11	69.54±3.57	78.91±7.25	51.4±7.8	70.55±13.14	50.6±5.9	68.99±9.28
模拟 1 000 m	631.1±60.1 <sup>1)</sup>	816.00±94.66	59.20±4.95 <sup>2)</sup>	75.86±9.11	48.0±5.5	72.97±12.25	46.0±6.5 <sup>1)</sup>	72.51±14.43
模拟 1 500 m	616.0±40.9 <sup>2)</sup>	744.00±94.66 <sup>14)</sup>	64.04±3.93 <sup>13)</sup>	77.45±10.47	44.2±4.0 <sup>13)</sup>	63.87±11.61	47.8±5.3	68.75±11.17

测试环境	$P/W$		$P$ 百分比/%		$V(\text{CO}_2)/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$		$V(\text{CO}_2)$ 百分比/%	
	通气阈	乳酸阈	通气阈	乳酸阈	通气阈	乳酸阈	通气阈	乳酸阈
正常	174.0±23.2	215.56±24.02	62.4±5.6	76.40±8.36	1 765.0±193.2	2 345.89±430.60	56.32±4.33	73.69±12.42
模拟 1 000 m	144.4±21.9 <sup>1)</sup>	212.00±31.55	49.6±6.2 <sup>2)</sup>	72.36±11.09	1 612.9±240.3	2 384.00±395.44	52.3±16.78 <sup>1)</sup>	80.13±12.69
模拟 1 500 m	138.0±14.8 <sup>2)</sup>	188.00±31.55 <sup>14)</sup>	54.1±5.4 <sup>1)</sup>	73.87±13.10	1 500.1±129.7 <sup>1)</sup>	2 115.90±377.93	52.24±6.83	73.85±12.69

1)与正常比较,  $P<0.05$ ; 2)与正常比较,  $P<0.01$ ; 3)与 1 000 m 比较,  $P<0.05$ ; 4)与 1 000 比较,  $P<0.01$

表 2 是 3 种环境下通气阈和乳酸阈的相关性系数  $r$  的数值,在正常环境下相关性系数  $r$  都在 0.65 以上,  $P<0.05$ , 统计学上差异具有显著性,但是在模拟 1 000 m、1 500 m 条件下时两者的相关性系数  $r$  值降低,  $r$  值均在 0.60 以下,  $P>0.05$ , 统计学上差异均无显著性。

表 2 三种环境下通气阈和乳酸阈相关性系数 ( $r$ )

测试环境	时间 ( $t$ )	VE	功率 ( $P$ )	$V(\text{CO}_2)$
正常	0.71 <sup>1)</sup>	0.68 <sup>1)</sup>	0.65 <sup>1)</sup>	0.75 <sup>1)</sup>
模拟 1 000 m	0.60	0.56	0.52	0.58
模拟 1 500 m	0.49	0.57	0.52	0.55

1) $P<0.05$

### 3 讨论

#### 3.1 正常与模拟 1 000、1 500 m 递增负荷运动时通气量 (VE) 变化

VE 是非常重要的心肺功能指标之一,反映有氧运动能力的大小。肺活量与运动中最大通气量呈高度正相关<sup>[1]</sup>,通常采用测定肺活量来间接衡量心肺功能。研究表明在不同低氧环境下运动时,VE 会随着氧分压的降低而升高,且差异具有显著性<sup>[2]</sup>,刘弢<sup>[3]</sup>通过实验证实,在低氧条件下运动时,通气量明显增加,均与本研究结果一致。相同时间段内,模拟 1 500 m 时的 VE 略低于模拟 1 000 m 时的 VE,这可能与氧分压降低有关,有文献报道当缺氧刺激严重时,可引起中枢抑制作用,使呼吸频率和深度减弱<sup>[2]</sup>。

低氧环境下通气量增加机制是<sup>[4]</sup>:在低氧环境时,外界氧分压( $p(\text{O}_2)$ )降低导致血管内  $p(\text{O}_2)$ 降低,同时伴

随  $p(\text{CO}_2)$  的升高, pH 降低和  $[\text{H}^+]$  升高等现象,这些变化均引起外周中枢神经兴奋,发放神经冲动,使呼吸中枢兴奋,反射性引起呼吸加深加快,VE 增加。

$p(\text{O}_2)$  降低对呼吸中枢的作用是双重的:一是  $p(\text{O}_2)$  降低可以刺激外周感受器,引起呼吸加深加快,二是  $p(\text{O}_2)$  降低可直接作用于呼吸中枢,抑制中枢神经系统<sup>[5]</sup>,即低  $p(\text{O}_2)$  使中枢神经元得不到充足的氧,从而降低呼吸中枢的机能反应,引起呼吸减弱。即轻微的缺氧可以使呼吸加深、频率加快,此时外周调节占主导,而缺氧严重时,超低  $p(\text{O}_2)$  对中枢的抑制加强,引起呼吸减弱。

实验中,模拟 1 000 m、模拟 1 500 m,由于低  $p(\text{O}_2)$  的刺激引起呼吸加深加快,相同时间段内,与正常环境下相比,VE 都出现增加,部分点差异具有显著性。模拟 1 500 m 时,  $p(\text{O}_2)$  进一步降低,这时低  $p(\text{O}_2)$  对中枢的抑制作用加强,故 VE 要低于模拟 1 000 m。

$\text{VE}_{\text{max}}$  在模拟 1 500 m 环境下显著下降,主要是因为低  $p(\text{O}_2)$  使受试者呼吸困难,摄入氧气不足,有氧供能系统还未全部动用时就已经大量采用糖酵解无氧供能系统进行供能,产生大量乳酸,不利于维持高强度运动,力竭时间提前出现,因此表现出  $\text{VE}_{\text{max}}$  下降。

#### 3.2 正常与模拟 1 000、1 500 m 递增负荷运动时血乳酸浓度的变化

在不同的环境下运动,相同负荷时血乳酸浓度(BLa)会发生变化<sup>[6-8]</sup>。在高原低氧环境下,多数研究表明高原训练时同级负荷运动时或者相同强度运动时,BLa 增加,乳酸阈 LT 时间提前,血乳酸速度曲线左移<sup>[6, 8-9]</sup>,与本研究结果一致。正常、模拟 1 000、1 500 m 时在相同

时段的价值逐渐升高,且在某些点的差异具有显著性。引起 BLa 升高的主要原因是由于低氧  $p(O_2)$ , 机体需氧与供氧矛盾提前, 无氧糖酵解供能提前, 故相同时间段的 BLa 值升高, 且随着  $p(O_2)$  降低而升高。

本实验测得运动后即刻和运动后 3 min BLa, 正常、模拟 1 000、1 500 m 呈现下降趋势, 即刻分别为  $(9.58 \pm 1.40)$ 、 $(7.22 \pm 1.38)$ 、 $(6.57 \pm 1.50)$  mmol/L; 运动后 3 min 分别是  $(11.31 \pm 2.09)$ 、 $(8.03 \pm 1.53)$ 、 $(7.53 \pm 1.70)$  mmol/L, 差异具有非常显著性 ( $P < 0.01$ )。运动后 3 min 的 BLa 值反映了运动中最高水平, 因为运动中乳酸由肌肉释放到血液中, 需要一段时间。其值出现下降, 可能是因为低  $p(O_2)$  使运动能力下降, 有学者认为这是机体进行自我保护, 防止机体因过度疲劳而损伤。而且力竭时间的缩短, 总的运动量也减少, 乳酸积累减少, 故 BLa 值降低。

### 3.3 正常与模拟 1 000、1 500 m 递增负荷运动中通气阈与乳酸阈时各指标的变化及其相关性

#### 1) 通气阈。

通气阈(VT)随  $p(O_2)$  降低而提前已得到证实<sup>[2, 10-11]</sup>, 表现为通气阈时间提前, 通气量、功率降低等。目前关于低氧环境下 VT 时 VE 减小、功率降低的研究, 国内尚未报道。本实验通过比较 3 种环境下的通气阈时各指标发现: 通气阈出现时间、VE、功率和  $V(CO_2)$  均下降, 且差异具有显著性。而对应的通气阈出现时间、VE、功率和  $V(CO_2)$  的百分比则是正常环境最高, 模拟 1 500 m 次之, 模拟 1 000 m 最低。

通气阈机制是: 在递增负荷运动中, 气体代谢指标均随着负荷强度的增加而发生变化, 当负荷强度达到一定的水平时, VE、 $V(O_2)$  和  $V(CO_2)$  等指标突然出现非线性增长。VT 出现是因为肌肉无氧代谢增强, 导致大量乳酸和  $H^+$  扩散入血液, 诱发血液  $CO_2$  增加和代谢性酸中毒刺激颈动脉所致<sup>[7, 12]</sup>。但 VT 并不依赖于血乳酸增加, 研究表明 VT 与骨骼肌神经原性刺激有关, 已知肌纤维中有大量 III、IV 类感觉传入纤维, 其发放的神经冲动可影响心血管和呼吸系统的活动, 这些神经纤维可被大量的体液性因素如  $H^+$ 、乳酸、儿茶酚胺及  $p(O_2)$  下降所激活<sup>[13]</sup>。

VT 在不同环境下会发生变化, 低  $p(O_2)$  刺激机体提前动用糖酵解进行供能, 导致乳酸增加, 血液 pH 值下降,  $H^+$  增加,  $p(O_2)$  下降和儿茶酚胺升高引起神经变化引起肌肉神经元兴奋, 产生神经冲动或者神经冲动的频率和幅度增加, 从而引起 VE 等通气代谢指标提前发生非线性变化, 表现在 VE、 $V(O_2)$ 、 $V(CO_2)$  的急剧增加提前, 而在通气阈出现时的值出现降低。

实验中发现, VT 的时间、VE、功率、 $V(CO_2)$  的百

分比出现先降后略有升高, 其可能是模拟 1 500 m 的峰值较前两种环境显著降低, 所以 VT 的出现时间、VE、功率、 $V(CO_2)$  的绝对值降低。

#### 2) 乳酸阈。

乳酸阈(LT)在低氧环境下出现提前现象, 出现 LT 的时间分别是  $(826.67 \pm 72.11)$ 、 $(816.00 \pm 94.66)$ 、 $(744.00 \pm 94.66)$  s, 其中模拟 1 500 m 时差异具有显著性。可能是低  $p(O_2)$  促使机体提前动用糖酵解供能有关, 而时间百分比却变化不明显, 主要是低氧抑制运动能力, 力竭时间缩短引起的。

LT 功率呈现下降的趋势, 且模拟 1 500 m 与前面相比, 差异具有显著性。对应的功率百分比也有下降的趋势, 但是变化不大, 结果差异没有显著性, 可能与最大功率下降有关。

引起 LT 功率变化的原因主要是因为 LT 时间提前, 故 LT 功率也减小。VE 在乳酸阈时先略有升高, 后又下降。模拟 1 000 m VE 升高主要是因为低氧刺激引起的 VE 增加, 而 LT 出现时间接近。模拟 1 500 m VE 下降是因为  $p(O_2)$  降低引起 VE 增加, 但同时也对呼吸中枢产生抑制, 同时 LT 出现时间明显提前, 故 LT 时 VE 下降。LT 的时间、功率、VE 百分比变化不明显, 可能提示: LT 时指标的相对值变化不大, 所以在不同环境下运动时, 需要考虑环境的影响, 采用相对指标来评价运动员的能力和训练成效。

LT 时  $V(CO_2)$  先是略有增加, 然后下降。模拟 1 500 m 时  $V(CO_2)$  下降明显, 可能与 LT 时间提前有很大关系, 那时运动强度与正常、模拟 1 000 m 相比, 功率小, 有氧代谢的水平低于前两者, 代谢产生的  $CO_2$  减少, 具体机制尚不清楚。

#### 3) 通气阈乳酸阈的相关性。

在 3 种环境下, VT 时指标的值要明显低于 LT 时的值, 提示 VT 出现要早于 LT, 这已经得到学者的认同<sup>[14-15]</sup>。常环境下、模拟 1 000 m、模拟 1 500 m 运动时的 VT 时间分别提前 106.67、184.89、128.00 s, VE 分别要低 19.14、24.97、19.70 L。可能是运动时有氧代谢增强,  $CO_2$  增加, 同时由于无氧代谢产生的乳酸增加, 置换出碳酸盐中的  $CO_2$ , 使血液中  $[H^+]$  增加, pH 值下降, 故  $p(O_2)$  降低,  $p(CO_2)$ 、 $[H^+]$  升高, 而这些变化均可以引起 VE 升高加速, 出现通气阈。VT 时的乳酸虽然有所增加, 但是未达到出现阈的水平。

随着环境的改变, VT 与 LT 仍然保持较高正相关, 肖国强等<sup>[7, 16]</sup>通过在常温、高温、热脱水和非脱水等环境中对血乳酸、气体代谢等指标的研究, 发现环境的改变, 两者之间仍然存在较高的相关性, 但相关系数发生了改变。虽然实验环境不同, 与我们研究的结果

是一致的。

在正常环境下 VT 与 LT 的相关性较高,相关系数  $r$  均在 0.65 以上,差异具有显著性( $P < 0.05$ ),与前人的研究结果一致<sup>[17]</sup>。但是在模拟 1 000 m、1 500 m 下差异没有显著性,其相关性系数  $r$  均在 0.60 以下。与前人研究结果相比, $r$  值偏低,Caesser 等研究表明,LT 与 VT 在训练前后相关性系数都很高,训练前  $r=0.96$ ,训练后  $r=0.86$ , $P$  值均小于 0.01,差异具有非常显著性<sup>[14]</sup>。Caiozzo 等<sup>[17]</sup>研究以不同的 VT 指标来判断的 VT 与 LT 时,以  $VE/V(O_2)$  为判别标准的 VT 与 LT 相关性系数最高, $r$  为 0.93,其  $P$  值小于 0.001,而且重复性很高, $r$  为 0.93, $P < 0.001$ 。

本次实验得出 VT 和 LT 相关系数值偏低,可能是受试者为在校体育系本科学生,也可能与采血时间(每次采血间隔 2 min)和部位(指尖末梢血)不同有关,另外 VT 判断也存在一定的误差,还可能与其他的因素有关。此外环境也是影响因素之一,本实验模拟 1 000 m、1 500 m 时 VT 与 LT 的相关性系数出现降低趋势,提示两阈受不同的因素影响, $p(O_2)$  高低对两种阈的影响系数不一样,从而引起两阈之间相关性系数降低。究竟低氧对 VT 和 LT 的影响系数如何,本实验研究尚不能够证明,需要进一步验证。

本实验通过模拟不同  $p(O_2)$  环境(正常、模拟 1 000 m、1 500 m)下进行递增负荷运动, $VE_{max}$  下降,VT、LT 时间提前,相同负荷下 BLa 上升,最大 BLa 下降。提示有氧运动能力随着  $p(O_2)$  的降低而下降。建议进入海拔高于 1 000 m 区域以后,需要考虑环境变化对运动能力的影响,适当调整运动强度以适应环境的变化。

在低氧环境下运动,运动能力下降是整体性的,VT 和 LT 时间、VE、功率、 $V(CO_2)$  等指标的百分比值变化不大,提示可用百分比来评价运动能力和成绩。

VT 出现早于 LT,并随着  $p(O_2)$  的改变也保持这种关系,变化幅度稳定在一定的范围内,时间分别提前 106.67、184.89、128.00 s,VE 分别低 19.14、24.97、19.70 L。两者在正常环境下较高相关( $P < 0.05$ ),差异具有显著性,但模拟 1 000 m、1 500 m 的低氧环境下  $r$  下降,差异不具显著性,提示低氧可能对 VT、LT 的影响系数不一样,故  $r$  降低。

## 参考文献:

[1] 李晓芸. 高校不同专业性别学生肺活量通气量与最大摄氧量的比较研究[J]. 吉林体育学院学报, 2005, 21(2): 82-83.  
[2] 赵之光. 不同模拟海拔高度急性低氧暴露运动时优秀运动员有氧代谢运动能力的变化[D]. 苏州: 苏州

大学, 2005: 52.

[3] 刘弢. 吸气肌训练对常氧和低氧条件下运动呼吸功能的影响[J]. 体育科学, 2007, 27(3): 38-42.  
[4] 王瑞元. 运动生理学[M]. 北京: 人民体育出版社, 2000: 130-133, 269.  
[5] Beaver W L. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange[J]. J Appl Physiol, 1986, 60: 2020-2027.  
[6] 刘海平. 中日竞走运动员高原训练期间递增负荷运动实验和运动能力的研究[J]. 北京体育大学学报, 1997, 20(1): 70-77.  
[7] 肖国强. 运动与能量代谢[M]. 北京: 人民体育出版社, 1998: 95-176.  
[8] 王宗兵. 甘肃男子皮划艇运动员赛前高原训练部分生理生化指标监测与分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2006: 34-37.  
[9] 赵晋. 通过血乳酸变化曲线对我国优秀女子赛艇运动员高原训练成效的分析[J]. 中国运动医学杂志, 1997, 16(2): 139-142.  
[10] 缪素堃. 高原训练对优秀自行车运动员有氧能力的影响[J]. 体育科学, 1992, 12(1): 47-50.  
[11] 刑华城. 吸入常氧和低氧时通气无氧阈和呼吸模式的变化[J]. 中国运动医学杂志, 1990, 9(3): 167-170.  
[12] 邓树勋. 运动生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 155-168, 133-135.  
[13] Shou Guo-chiang, Toshihiro ISHIKO. The effect of different environmental conditions on blood lactate accumulation, LT and OBLA during incremental exercise [J]. Jpn J Phys Fitness Sports Med, 1994, 43(1): 125-128.  
[14] 王健. 无氧阈理论与检测方法研究进展[J]. 人类工效学, 1998, 4(3): 52-60.  
[15] 陈俊民. 高原女子公路自行车运动员有氧运动能力的研究[J]. 青海师范大学学报: 自然科学版, 1995(4): 58-62.  
[16] Shou Guo-chiang, Toshihiro ISHIKO. The effect of dehydration on lactate threshold and onset blood lactate accumulation under hot dry [J]. Japan of Exercise and Sports Physiology, 1998, 5(2): 137-144.  
[17] Caiozzo V J. A comparison of gas exchange indices used to detect the anaerobic threshold [J]. J Appl Physiol, 1982, 53(5): 1184-1189.

[编辑: 郑植友]