

·运动人体科学·

# 有氧代谢能力与耐力项目训练中运动强度的选择

陆绍中, 李开刚

(国家体育总局 科研所 北京 100061)

**摘 要** 全面阐述了有氧代谢能力的概念, 提出了最大摄氧量、无氧阈、最大摄氧量平台的持续时间都应是耐力训练的目标。在此基础上讨论了发展此3项目标应采用的训练强度。

**关键词** 最大摄氧量; 无氧阈; 最大摄氧量平台的持续时间; 有氧能力; 训练强度

中图分类号: G804.7 文献标识码: A 文章编号: 1006-7116(2002)06-0041-04

## The study of aerobic capacity and the choice of exercise intensity during endurance training

LU Shao-zhong, LI Kai-gang

(National Research Institute of Sports Science, Beijing 100061, China)

**Abstract** The conception of aerobic capacity is discussed in this paper. All of  $VO_{2max}$ , anaerobic threshold and  $VO_{2max}$  plateau duration should be the target of endurance training. It is also discussed that what kind of training intensity may promote the three indexes mentioned above.

**Key words**  $VO_{2max}$ ; anaerobic threshold;  $VO_{2max}$  plateau duration; aerobic capacity; training intensity

### 1 有氧代谢能力与运动强度

长期以来, 运动生理学家们把最大摄氧量( $VO_{2max}$ )作为衡量人体有氧能力水平的唯一指标。最大摄氧量是指人体在递增强度的运动过程中, 各种生理机能充分动员时, 单位时间内所能摄取、消耗的最大数量的氧气, 通常以“升/分”或“毫升/(分·公斤)”表示(L/min, mL/min·kg<sup>-1</sup>)。

许多学者<sup>[1-3]</sup>研究了不同项目运动员的最大摄氧量时发现, 运动持续时间长的运动项目, 例如滑雪、长跑、自行车、划船、游泳等项目的运动员的  $VO_{2max}$  要比其它项目的大, 耐力项目运动员的  $VO_{2max}$  可达到 6.3 L/min 和 85 mL/min·kg<sup>-1</sup>, 这是非常合乎逻辑的, 因为有氧代谢是耐力项目运动的主要能量来源, 运动的持续时间愈长, 依靠有氧供能的比重愈大。例如: 10 000 m 跑时有氧代谢供应的能量可达到 90%, 马拉松跑时可达 98%<sup>[4]</sup>。不仅如此, 更深入的研究表明在耐力运动项目中  $VO_{2max}$  水平愈高, 运动成绩愈好。H. И. ВолкоB 早在 1967 年就报导了  $VO_{2max}$  与 100~10 000 m 跑成绩之间的相关系数, 发现 5 000~10 000 m 的成绩与  $VO_{2max}$  的相关系数( $r$ )处于 0.79~0.82, 而在 800~1 500 m 项目中  $r$  在 0.47~0.48, 在 100~400 m 的项目中  $r$  处于 -0.05~0.14, 充分证明  $VO_{2max}$  在决定耐力项目运动水平中的重要作用。但是 H. И. ВолкоB 没有说明各项目运动员的  $VO_{2max}$  和运动成绩的范围, 也没有提供运动成绩与  $VO_{2max}$  之间的回归方程<sup>[5]</sup>。我们曾对国家集训队 21 名运动员 5 000 m 跑的运动

成绩在 14 min 46.4 s~15 min 26 s,  $VO_{2max}$  在 60.4~73.2 mL/min·kg<sup>-1</sup> 的数据进行了相关分析, 其相关系数  $r = -0.487$ ,  $P < 0.05$ , 负相关显著, 表明  $VO_{2max}$  愈大, 跑速愈快, 并可以回归方程式表示两者的关系。

$$Y(s) = 1162 - 3.768X(\text{mL}/\text{min} \cdot \text{kg}^{-1})^{6.1}$$

我国第三届全运会马拉松第 1 至 26 名的比赛成绩在 2 h 26 min 55.6 s~3 h 21 min 35.4 s, 比赛前一周测定的  $VO_{2max}$  在 53.2~78.6 mL/min·kg<sup>-1</sup>, 两者相关系数  $r = -0.476$ ,  $P < 0.06$ <sup>[6]</sup>。

按照上述的回归方程式, 把运动员的  $VO_{2max}$  代入, 可以预测其应达到的运动成绩; 反之, 把设想要达到的运动成绩代入, 就可算出其应具备的  $VO_{2max}$  水平。

按 Margaria 列线图<sup>[7]</sup>, 一个  $VO_{2max}$  只有 50 mL/min·kg<sup>-1</sup> 的运动员, 其 10 000 m 跑的成绩必然在 44 min 以上, 创造 1969 年 10 000 m、5 000 m、1 500 m 世界纪录相应为 28 min 3 s、13 min 29.5 s、3 min 37 s 的人, 其  $VO_{2max}$  相应地不低于 74、75、70 mL/min·kg<sup>-1</sup>。对世界优秀长跑运动员  $VO_{2max}$  的实际测定表明, 其数据远远超过 Margaria 列线图的预测值, 例如, 世界纪录保持者 K. 凯诺  $VO_{2max}$  为 85.1 mL/kg·min<sup>-1</sup>, 著名马拉松运动员尤·巴帕夫  $VO_{2max}$  为 86.2 mL/kg·min<sup>-1</sup>, 其马拉松成绩为 2 h 15 min 17 s, 10 000 m 成绩 27 min 31 s, 英国的贝德福特 10 000 m 成绩 27 min 30.8 s, 其  $VO_{2max}$  为 5.5 L/min 和 84.6 mL/kg·min<sup>[8,9]</sup>。

综上所述,可以坚信,男子耐力项目运动员要想跨入世界先进行列,VO<sub>2max</sub>水平必须超过 80 mL/kg·min<sup>-1</sup>或 5 L/min 以上,因此,耐力项目运动训练的一个重要目标就是提高运动员的最大摄氧量水平。

## 2 无氧阈与有氧代谢

最大摄氧量水平的高低在很大程度上决定着耐力项目的运动成绩。然而,半个多世纪前 2 英里(1 英里 = 1.609 km)长跑世界纪录保持者 Don Lash 的 VO<sub>2max</sub>就已达到 82 mL/kg·min<sup>-1</sup>[10]。从那时起,世界耐力项目的运动成绩已有大幅度的提高,而长跑运动员的 VO<sub>2max</sub>却增加不多,与当今世界长跑纪录保持者的 VO<sub>2max</sub>约为 85 mL/kg·min<sup>-1</sup>形成明显的反差。显然,还有其它因素的制约。运动技术的进步,运动设施的完善等等无疑是运动成绩大幅度提高的重要原因。除此以外,是否还有其它生理因素需要进一步探索。

自 Wasserman 提出无氧阈(anaerobic threshold,AT)的概念以来,已进行了大量研究。许多学者都证实,耐力项目的运动成绩和 AT 水平密切相关,相关系数 *r* 可达到 0.89,比 VO<sub>2max</sub>与运动成绩之间的相关程度更高(*r* = 0.64)[11~13],因而认为,无氧阈比 VO<sub>2max</sub>更能代表人体的有氧能力,似乎是另一个独立的,与 VO<sub>2max</sub>无关的反映有氧代谢能力的指标。考虑到近几十年来世界水平的长跑运动员的 VO<sub>2max</sub>水平已停滞不前(徘徊在 85 mL/kg·min<sup>-1</sup>)若继续把训练目标局限在提高 VO<sub>2max</sub>水平上可能是没有前途的。鉴于优秀运动员与一般运动员相比,不仅 VO<sub>2max</sub>较高,而且无氧阈(AT)水平的 VO<sub>2</sub>占 VO<sub>2max</sub>的百分比也高,甚至观察到优秀运动员的 VO<sub>2AT</sub>等于 VO<sub>2max</sub>[14]。因而认为,在运动训练的影响下,当 VO<sub>2max</sub>不再增长时,VO<sub>2AT</sub>还能继续增长。所以,许多学者提出,要把提高 VO<sub>2max</sub>在 AT 水平上的利用率,即 AT 水平上的 VO<sub>2</sub>占 VO<sub>2max</sub>的百分比作为耐力训练的一个目标,而无氧阈强度的训练是达到此目标的训练方法,即无氧阈训练,并声称取得了很好的效果。有些学者甚至认为,无氧阈训练是发展有氧能力的最好方法。

但是,AT 与 VO<sub>2max</sub>之间存在着显著相关,*r* = 0.85 ~ 0.92[15,16],也就是说,VO<sub>2max</sub>水平愈高,无氧阈水平愈高。因此,在运动员的 VO<sub>2max</sub>水平不是很高的情况下,或者还有发展前景的情况下,VO<sub>2max</sub>水平仍应是耐力项目的训练的主要目标。鉴于 AT 时 VO<sub>2</sub>大多仅为 VO<sub>2max</sub>的 60% ~ 80%[14],因此,似应认为 VO<sub>2AT</sub>乃是 VO<sub>2max</sub>的组成。考虑到 AT 时血乳酸浓度为 4 mmol/L,仅为 VO<sub>2max</sub>时血乳酸浓度的 40%左右,以及考虑到运动时肌纤维募集的规律,即在低强度运动时首先是慢肌纤维被募集,参与运动,随着强度的增加才有快肌纤维的参与[17]。因而,可以认为,无氧阈训练的意义主要在于发展慢肌纤维的氧化能力,也许包括一部分氧化型快肌纤维的氧化能力,从而优化 VO<sub>2max</sub>的组成,改善有氧代谢能力,甚至提高 VO<sub>2max</sub>水平。

最大摄氧量水平的高低受许多生理机能的影响,它代表着人体氧化能力的最高水平,是一项综合性指标,不仅与心

肺功能有关,而且与氧的运输能力,肌肉(包括慢肌纤维和氧化型以及酵解型快肌纤维)摄取和利用氧的能力密切相关(图 1)。然而,更深入的分析研究表明,并非所有的各种生理机能决定 VO<sub>2max</sub>水平的高低中具有同等的意义。心搏量的大小和肌肉氧化能力的高低才是限制 VO<sub>2max</sub>水平的主要因素[18,6]。因此,为了提高 VO<sub>2max</sub>水平,首要的、基础的运动训练应着重于提高心搏量水平和肌肉的氧化能力见图 1。

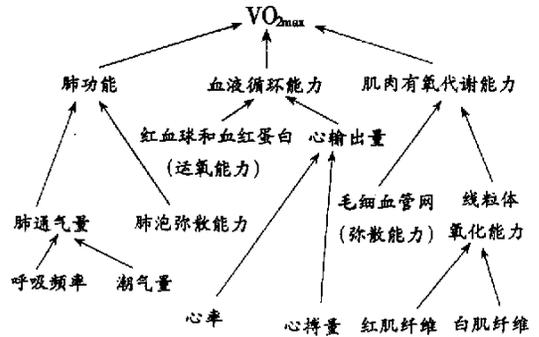


图 1 构成 VO<sub>2max</sub>的各生理机能

提高肌肉氧化能力的训练应该着眼于提高慢肌纤维,以及氧化型快肌纤维的能力,因此正如前述,采用无氧阈强度以及略高或略低于无氧阈强度的训练可能最有效地促进慢肌纤维和氧化型快肌纤维的发展。个体运动员的无氧阈强度是很容易测定的,但需要科技人员的协助。对大多数运动员来讲,无氧阈强度时 VO<sub>2</sub>约为 VO<sub>2max</sub>的 60% ~ 70%,心率约为 160 ~ 170 次/min,实际训练工作中可以用此种心率来控制训练强度(图 2A、B)。

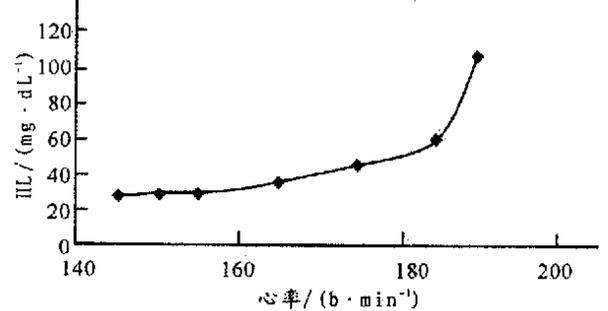


图 2A 不同强度运动时心率与血乳酸的关系

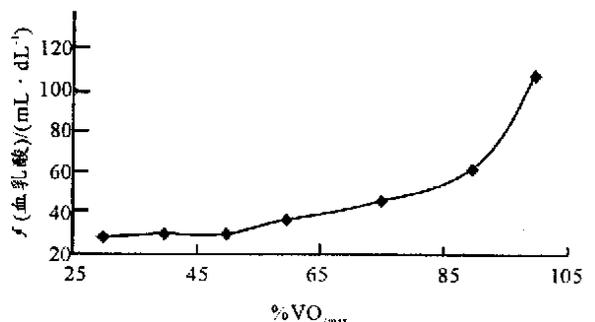


图 2B 不同强度运动时%VO<sub>2max</sub>与血乳酸的关系

### 3 耐力训练与运动强度

最有效提高心搏量的训练应该是能够使心脏充分地舒张, 回心血流充分地充盈, 而后又能充分地收缩, 充分地排出血液的那种训练强度, 也就是能够使心搏量达到最大的那种训练强度。根据我们的资料<sup>[6]</sup>, 在匀速运动中, 心率达到(133 ± 8.7)次/min 的时候, 心搏量达到最高水平, 当运动强度继续增加, 随着心率的增加, 心搏量会逐渐下降。然而我们也观察到个别优秀运动员的最高心搏量一直可以保持到心率达到 180 次/min 左右。因此可以认为, 作为基础训练, 为了提高心搏量, 提高心脏的最大舒张的收缩能力, 采用心率 130~150 次/min 的运动强度可能是非常适宜的。然后根据训练水平的提高, 可以逐渐地增加运动强度(图 3)。

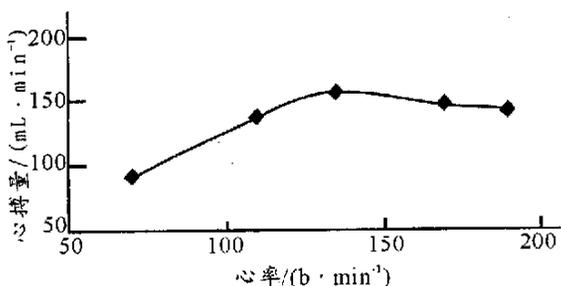


图 3 不同强度运动时心率与心搏量的相关曲线

在提高肌肉氧化能力和心搏量的基础上, 可能需要逐渐增加训练强度, 使构成  $VO_{2max}$  的各种生理机能整合成一种最佳状态, 达到自己的最高水平, 即  $VO_{2max}$  水平, 而各生理机能的变动相对较低, 此时的运动强度乃是达到最大吸氧量所必需的最低强度, 常被称之为临界强度。这种训练强度可能是心率处于 180~185 次/min 之间的一种强度(图 4)。

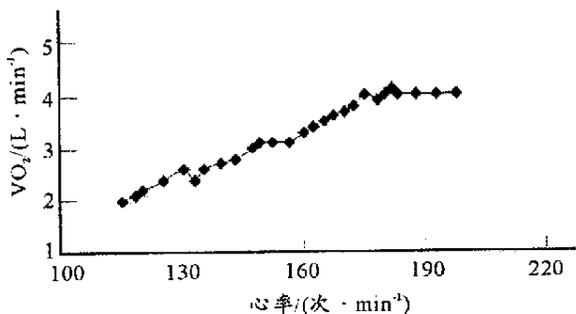


图 4 递增强度运动时心率与  $VO_2$  的变化

耐力项目的运动时间很长, 不仅需要高水平的  $VO_{2max}$ , 而且要求在运动过程中长时间保持这种水平。我们把这种能力称为  $VO_{2max}$  平台的持续时间(  $VO_{2max}$  plateau duration,  $VO_{2max}$  PD), 并发现:  $VO_{2max}$  PD 与耐力项目的运动能力密切相关, 耐力跑的成绩与  $VO_{2max}$  PD 之间相关系数  $r = 0.7$ ,  $P <$

0.01。然而  $VO_{2max}$  PD 与  $VO_{2max}$  之间的相关系数很小(  $r = 0.3$  )<sup>[19]</sup>。这表示制约  $VO_{2max}$  和  $VO_{2max}$  PD 的生理机制是不同的, 因此,  $VO_{2max}$  PD 是另一个反映人体有氧代谢能力的重要指标。也就是说,  $VO_{2max}$  及其持续能力才是人体有氧代谢能力的全部内涵, 而  $VO_{2AT}$  是  $VO_{2max}$  的组成成份, 其水平愈高, 占  $VO_{2max}$  的百分比愈高, 表示慢肌纤维, 以及氧化型快肌纤维的氧化能力所占的比重愈高, 是  $VO_{2max}$  的结构优良的表现。因此, 可以认为:  $VO_{2max}$ 、 $VO_{2max}$  PD 和  $VO_{2AT}$  才能全面反映人体有氧代谢能力, 都应成为耐力训练发展有氧能力的目标, 并可根据运动员的不同机能状况而有所侧重。这 3 项指标可以图 5 来表示相互关系。

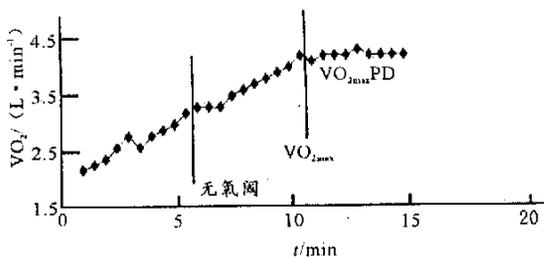


图 5 中长跑运动员递增强度运动时  $VO_2$  的变化

$VO_{2max}$  PD 开始时和结束时的呼吸商、二氧化碳排出量、通气氧当量和呼吸频率等指标差异显著<sup>[20]</sup>, 反映了体内代谢性质的剧烈变化, 糖酵解成份急剧参与, 产生大量乳酸, 使肌肉内环境酸化, pH 值下降, 乳酸进入血液, 置换重碳酸盐中的  $CO_2$ , 使其大量溢出, 刺激呼吸中枢, 增加呼吸频率和肺通气量,  $CO_2$  排出量增加, 超过耗氧量的增加, 导致呼吸商剧增, 肺通气氧当量增加, 氧吸收率下降。因而可以把渐增负荷过程中达到  $VO_{2max}$  所需的最低运动强度看作一种阈值, 可称其为最大有氧阈或  $VO_{2max}$  临界强度。多数耐力项目运动员此时的心率大约在 180~185 次/min 之间, 在此强度上进行训练可能不致使体内代谢发生“过于剧烈”的变化, 从而延缓疲劳的发生, 达到训练  $VO_{2max}$  长时间的保持能力, 即提高  $VO_{2max}$  PD 的能力, 全面提高人体的有氧代谢能力。

#### 参考文献:

[1] Astrand, P.O. Textbook of Work Physiology, Physiological Bases of Exercise [M]. McGraw-Hill Book Company N. Y. 1997.  
 [2] Платоников вн. Адантация в спорте киев [M]. здоровья, 1998 52-53.  
 [3] геселевич вА. медицинский сивраочник тренера москва [M]. физ, 1981 :18-19.  
 [4] 陆绍中. 不同距离的径赛项目的生理特征 [J]. 中国运动医学杂志, 1986 5(3):153-155.  
 [5] волков ни. Биохимический контроль в спорте. проблемы и перспективы [J]. теория и практика физкультуры, 1975(11):35

- 38.
- [ 6 ] 陆绍中. 我国优秀马拉松、中长跑和自行车运动员呼吸循环机能的研究[ J ]. 体育科学, 1981, ( 1 ) : 44 - 51.
- [ 7 ] Margaria R. A Simple relation between performance in running and maximal Aerobic power[ J ]. Appl Physiol, 1975, 38( 2 ) : 351.
- [ 8 ] волков нв. МПК и высшее мастерство[ J ]. легкая атлетика, 1974( 10 ) : 26.
- [ 9 ] B Saltin P O. Astrand Maximal oxygen uptake in athleti[ J ]. J Appl Physiol, 1967, 23( 3 ) : 353 - 358.
- [ 10 ] Robinson Sid. New records in human power[ J ]. Science, 1937, 85 : 409 - 410.
- [ 11 ] Hagberg J M. Physiological determinants of endurance performance as studied in competitive race walkers[ J ]. Med Sci, Sports Exer, 1983, 15( 2 ) : 287 - 289.
- [ 12 ] Foehrenbach R. Die Ausdauerleistungsfahigkeit Deutscher Spitzenathletinnen Mit Wettkampfstrecken Vom Sprint Bis Zum Marathonlaufsport : Leistung und Gesundheit. Kongress Deutscher Sportaerztekongress Koeln, 1982 : 555 - 562.
- [ 13 ] Tanaka. Relationship of anaerobic threshold and onset of blood lactate accumulation with endurance performance, zur[ J ]. Appl Physiol, 1983( 52 ) : 51 - 56.
- [ 14 ] Mader A. Zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfahigkeit in labo[ J ]. Sportarzt u Sportmed, 1976( 4 ) : 80 - 85.
- [ 15 ] Dwyer J. Heart rate indices of the anaerobic threshold[ J ]. Med Sci Sports Exer, 1983( 15 ) : 72.
- [ 16 ] Davis JA. Anaerobic threshold and maximal aerobic power for three modes of exercise[ J ]. Appl Physiol, 1976( 41 ) : 544 - 550.
- [ 17 ] Costill D. Muscle strength : Contributions to sprint swimming[ J ]. Biokinetic Strength Training : Copyright, 1980( 1 ) : 55 - 59.
- [ 18 ] 邓树勋. 运动生理学[ M ]. 北京 : 高等教育出版社, 1999 : 156.
- [ 19 ] 陆绍中. 我国中长跑优秀运动员的耐力素质及其发展方法的研究——人体有氧代谢能力及其发展规律[ A ]. 体育科学·国家体委体育科技进步奖获奖项目论文选编[ C ]. 国家体委, 1997.

[ 编辑 : 李寿荣 ]