

最大摄氧量及其相关和派生指标在运动训练中应用的研究进展

杨翼¹, 黎敏¹, 李章华²

[摘要] 最大摄氧量(VO_2max)是评定心血管机能的重要指标,本文回顾总结了最大摄氧量及其相关和派生指标在运动训练中的研究进展。

[关键词] 最大摄氧量(VO_2max); 心功能; 运动训练; 综述

Maximal Oxygen Uptake and Related Index for Physical Training (review) YANG Yi, LI Min, LI Zhang-hua. Wuhan Institute of Physical Education, Wuhan 430079, Hubei, China

Abstract: Maximal oxygen uptake (VO_2max) is an important indicator for cardiac function. This paper reviewed the VO_2max and related index applied in the physical training.

Key words: maximal oxygen uptake (VO_2max); cardiac function; physical training; review

[中图分类号] G804.7 [文献标识码] A [文章编号] 1006-9771(2009)05-0445-04

[本文著录格式] 杨翼,黎敏,李章华.最大摄氧量及其相关和派生指标在运动训练中应用的研究进展[J].中国康复理论与实践,2009,15(5):445—448.

心血管功能是人体体能和运动能力的重要基础^[1];运动作为促进心血管功能的重要手段之一,在全民健身和竞技体育中均具有重要意义。本文回顾总结了最大摄氧量(maximal oxygen uptake, VO_2max)及其相关和派生指标在运动训练中的研究进展。

1 相关指标

1.1 心输出量 最大摄氧量的概念是 1920 年由生理学家 Hill 和 Herbst 提出并逐渐完善的。在我国一些有影响的运动生理学教科书中,最大摄氧量定义为:“人体在进行有大量肌肉群参加的力竭性运动中,氧运输系统各环节的贮备能力都已被动员,并达到最高水平的时候,人体每单位时间(通常以分为单位)所能摄取的最大氧量”^[1]。 VO_2max 作为一个重要的临床和生理学指标,与耐力性竞技项目的运动成绩及心血管疾病发生的危险密切相关,在功能评定中常用来衡量有氧耐力^[2-3]。影响 VO_2max 的因素主要包括 4 方面因素:呼吸能力、最大心输出量、血液携氧能力、运动系统摄取和利用氧能力^[4],其中最重要的就是心输出量^[5]。心输出量是保持短时运动强度、周期耐力项目的有氧强度、非周期性项目体力的决定因素。

根据 Fick 定律,机体摄取的氧量等于心输出量与动静脉氧差(arteriovenous oxygen difference)的乘积^[6-9]。运动时心输出量增加,摄氧量也增加,两者几乎呈线性相关^[7-8, 10-11],Yoshida 等研究发现,从静息到开始运动, VO_2 在运动后 6.8~7.3 s 迅速增加,心输出量在运动后 6.0~6.8 s 也相应增加^[10]。早期研究发现,心输出量达到最大, VO_2max 也达到最大^[11]。当用 β -受体阻断剂降低心输出量时,随着最大心输出量的降低,

VO_2max 也降低^[4]。纵向研究也证实,训练引起的 VO_2max 增加主要是最大心输出量增大,而不是动静脉氧差增大的结果^[4,6]。de Cort 等发现,如果动静脉氧差保持不变,最大心输出量对 VO_2max 的作用达约 87%;而当最大心输出量保持不变时,动静脉氧差对最大摄氧量的作用仅为 8%^[9]。有人预测,最大心输出量对 VO_2max 的作用达到 70%~80%^[6]。 VO_2max 用于反映人体心肺功能和有氧工作能力已得到普遍认可^[12-13]。国际体力研究会(ICPFR)和世界卫生组织(WHO)都规定以它作为评价身体工作能力和健康的生理学指标。

1.2 跑步效率(running economy, RE) 跑步效率被定义为在既定速度下摄氧量的稳定状态^[14],也有人将其定义为既定跑速(次最大跑速)下的能耗量^[15]。RE 可以通过测定稳定状态下的氧耗量和呼吸商来决定,能很好地评价在 VO_2max 相同的情况下长跑运动员的运动成绩^[16-18]。优秀的 RE 可以弥补 VO_2 较小以及运动中对 VO_2 利用率比较低的不足,还可以预测运动成绩。

在中长跑运动中,氧与能量的消耗有绝对的直接关系,因此用氧耗量可以反映运动中能量的利用情况。从摄氧量动态变化来看,在次极限负荷强度运动下,摄氧量先迅速增加(称为初像或快成分),然后达到一个平台期;平台期意味全身的耗氧量达到稳定期,因此,此阶段的摄氧水平反映了机体能量利用的效率;在该阶段, VO_2 越低,表明运动员的跑步更经济节能,能量的利用效率也越高^[19]。

Williams 等对 16 名长跑运动员研究发现,其 10 km 跑的成绩与 RE 密切相关^[20]。Franch 等把 36 名男业余跑步爱好者分为持续训练、长时间间歇训练和短时间间歇训练 3 组,让其分别进行一周 3 次,每次 20~30 min,为期 6 周的训练,结果发现,这 3 组的 VO_2max 分别增加了 5.9%、6.0%、3.6%;最大摄氧量时的跑速分别增加了 9%、10%、4%;RE 分别增加了 3.1%、3.0%、0.9%^[21]。Denadai 等研究发现,以 100%最大摄氧量速度(velocity associated with VO_2max , $v\text{VO}_2\text{max}$)的高强度间歇训练能提高优秀长跑运动员 $v\text{VO}_2\text{max}$ 、RE 和 1500 m 成绩^[22]。

基金项目:国家自然科学基金项目(30700388);湖北省教育厅科研计划项目(Q20083303)。

作者单位:1. 武汉体育学院研究生部,湖北武汉市 430079;2. 武汉大学人民医院,湖北武汉市 430060。作者简介:杨翼(1973-),女,浙江余姚市人,博士,副教授,主要研究方向:中医药在运动医学领域的研究与应用。

影响高水平或优秀运动员 RE 的生理学和生物学因素有很多,包括肌肉代谢的适应性(如线粒体数目增加、有氧氧化酶提高)、肌肉储存和释放弹性能量的能力、机械效率的提高、减少制动过程中的能量消耗。运动员、教练员和研究者们都在不断寻找提高 RE 的途径。近年来,力量训练和高原训练引起了广大学者的注意,力量训练能使肌肉更大限度地利用弹性能量而减少制动过程中的能量消耗;高原训练能增强肌肉的代谢能力,更利于氧的利用^[15]。

2 派生指标

国内外学者在 $VO_2\max$ 经典理论上深入研究,发现了一些 $VO_2\max$ 的派生指标,如 $vVO_2\max$ 、达到最大摄氧量的时间(TAVO₂max)、最大摄氧量维持时间(tlimVO₂max)及持续运动的总时间(Tlim)。研究发现,这些指标与 $VO_2\max$ 密切相关,在评定人体心肺功能和有氧工作能力中起重要作用。

2.1 最大摄氧量速度($vVO_2\max$) 众多研究表明,高水平运动员的 $VO_2\max$ 和运动水平的提高更大程度上依赖于大强度训练后机体的适应性改变,因此必须保证运动员有足够的时间在 $VO_2\max$ 强度下训练。1923 年, Hill 和 Lupton 发现,跑速超过 256 m/min 时,运动员摄氧量达到最大值,若超过这一速度,则需氧量增加,而摄氧量不再增加^[23]。Volkov 等把这一速度称为“临界速度”(critical velocity),并把运动个体能维持此速度的最长时间作为评价最大有氧能力的一项指标^[11]。1984 年, Daniels 等提出了 $vVO_2\max$ 的概念,并认为这是一个整合了 $VO_2\max$ 和 RE 等参数的有效的有氧运动的指标^[24]。在近十几年的研究中, $vVO_2\max$ 有许多不同的定义。Billat 等把 $vVO_2\max$ 定义为:在递增负荷运动中产生最大摄氧量的最小速度^[25],目前常用来在训练中提高最大摄氧量^[26]。由于递增负荷跑台运动实验是检测 $vVO_2\max$ 最方便的方法,因而许多研究把 $vVO_2\max$ 的值设定为递增负荷跑台运动实验中达到 $VO_2\max$ 水平时的实际跑速^[11,24,27-33]。然而, Billat 等指出,在递增负荷运动中所测得的 $vVO_2\max$ 并不是唯一能达到最大摄氧量的速度^[25]。Whipp 经研究也发现,在自行车运动中,以大于或小于 $vVO_2\max$ 均能达到最大摄氧量^[34]。可是如果速度过大的话,会由于持续运动的总时间太短而不能达到 $VO_2\max$;另一方面,如果速度太小,摄氧量将会在低于 $VO_2\max$ 时出现平台而达不到最大摄氧量。Billat^[35]等让 7 名体育专业学生分别以 90%、100%、120%、140% $vVO_2\max$ 的恒定速度运动至力竭,发现 7 名受试者中有 5 名在 90% $vVO_2\max$ 时没有达到 $VO_2\max$;所有的受试者在 100% $vVO_2\max$ 时均达到了 $VO_2\max$;7 名受试者中有 6 名在 120% $vVO_2\max$ 时达到了 $VO_2\max$;有 3 名在 140% $vVO_2\max$ 时达到了 $VO_2\max$ 。

$vVO_2\max$ 可用来评价中长跑运动员的训练水平,并在一定程度上反映运动者的运动成绩^[36]。众多实验表明, $vVO_2\max$ 与高中女子 5000 m 越野赛^[37],男子 1500 m、3000 m、5000 m^[31,38],男女 1500 m^[32]、10000 m 公路赛^[39]和 21.1 km 公路赛^[40]等成绩都有相关性。Takayoshi 认为, $vVO_2\max$ 可以用来预测运动员 3000 m 跑的速度^[41]。Daniels 等认为,优秀女子长跑运动员的 $vVO_2\max$ 高于业余女子长跑运动员,并认为 3000 m 以上赛事中,优秀女子长跑运动员的速度与她们的 $vVO_2\max$ 极为相似^[24]。Margan 等以 $VO_2\max$ 和 RE 推算 $vVO_2\max$,发

现 $VO_2\max$ 水平相似的高水平运动员的 10000 m 成绩与其个体 $vVO_2\max$ 显著相关^[39]。

2.2 达到 $VO_2\max$ 的时间、 $VO_2\max$ 维持时间和持续运动的总时间 $VO_2\max$ 维持时间(tlimVO₂max,即最大摄氧量平台时间)被定义为在 $VO_2\max$ 水平维持的时间,具体规定为在递增负荷运动中所测得的 $VO_2\max \pm 2.1 \text{ ml/min} \cdot \text{kg}$ 之间的时间。持续运动的总时间(Tlim)被定义为从运动开始到运动至力竭的总时间。达到最大摄氧量的时间(TAVO₂max)为 Tlim 与 tlimVO₂max 之差^[26]。Tlim 和 TAVO₂max 都随着摄氧量速度的增加而缩短^[35]。

Astrand 和 Saltin 在早期的研究中已证明,在一定的摄氧量速度范围内,受试者可在 1~8 min 之间达到 $VO_2\max$ ^[42]。然而在所有的摄氧量速度中必定有一个速度能使 $VO_2\max$ 维持最长时间, Billat 等把摄氧量速度与 tlimVO₂max 的这种关系称为摄氧量速度-时间曲线^[43]。随着 $vVO_2\max$ 的增加, tlimVO₂max 下降^[42,44]。Margaria 等发现,在以 105%~200% $vVO_2\max$ 运动时, Tlim 为 3 min~30 s^[45]。众多研究发现, 100% $vVO_2\max$ 是一个比较合理的运动强度,它足以使受试者达到 $VO_2\max$,且能使 $VO_2\max$ 维持较长时间^[24,26,28-30,32,35,46]。Billat 等让 6 名受试者以 90% $vVO_2\max$ (5 名未达到 $VO_2\max$)、100% $vVO_2\max$ 、120% $vVO_2\max$ 和 140% $vVO_2\max$ (3 名未达到 $VO_2\max$) 的恒定速度运动, Tlim 分别为 (731±224) s、(333±116) s、(123±32) s、(73±18) s; tlimVO₂max 分别为 (99±223) s、(201±88) s、(70±26) s、(19±22) s^[17]。在 $vVO_2\max$ 水平时机体被充分动员,心肺功能达到了最高水平。由此可见,为了提高优秀运动员的运动成绩,我们不仅要提高运动员的 $VO_2\max$ 值,而且要延长其在 $VO_2\max$ 水平运动维持的时间,因此 tlimVO₂max 对评定运动员的运动成绩也具有重要意义。Billat 研究发现, TAVO₂max 一般为 Tlim 的 50%,且与运动的强度无关,而 tlimVO₂max 则取決与 Tlim 与 TAVO₂max 之间的平衡^[35]。

3 在运动训练中的应用

对于教练员来讲,提高运动员的 $VO_2\max$ 是耐力训练的重要方面。随着 $VO_2\max$ 的提高,心肌形态发生相应的改变,每搏输出量的最大值增加,骨骼肌毛细血管含量增加, II-肌纤维的有氧代谢能力提高。

研究发现,以达到或接近 $VO_2\max$ 的强度训练对提高优秀长跑运动员的 $VO_2\max$ 最为有效。然而,由于生理应激反应能产生长期的影响,低强度训练也能引起机体相似的适应,非训练者以达到 40%~50% $VO_2\max$ 强度运动就能提高 $VO_2\max$ 水平。而更多研究则表明,以达到 95%~100% $VO_2\max$ 强度运动可最大限度地提高 $VO_2\max$ 。这表明,大强度的训练对于提高优秀耐力运动员 $VO_2\max$ 是有意义甚至是必须的^[47]。

提高 $VO_2\max$ 的最小运动强度很大程度上取决于达到 $VO_2\max$ 水平时的速度。以 100% $vVO_2\max$ 的运动强度训练能最大限度地提高运动员的 $VO_2\max$ 和运动成绩^[48-49]。1927 年, Hill 发现运动员的运动成绩可用功率(P)或速度(V)与运动至力竭的时间(Tlim)之间的关系曲线来表示^[35]。由于大部分研究均把 $vVO_2\max$ 作为最适强度,故研究结果的差异主要集中在 Tlim 上。

Reindell 等首先提出了间歇训练法,并由于训练出奥运冠军 Emil Zatopek 而普及。中长跑运动员曾用此法来训练最大跑速。1991 年, Gorostiag 等证实,采用 30 s 100% $vVO_2\max$ 运动, 30 s 休息的间歇训练比 50% $vVO_2\max$ 的持续训练能更大程度地提高 $VO_2\max$ 。然而,不论是间歇训练还是以 50% $vVO_2\max$ 的持续训练仅能使 $VO_2\max$ 提高 70%。因此很长一段时间,耐力项目的运动训练均采用以 90%~100% $vVO_2\max$ 持续 1~8 min 的重复训练^[50]。所有这些研究的目的在于提高 $VO_2\max$,而提高 $VO_2\max$ 又能最大限度地提高心血管功能及有氧化酶系统的活性。

1996 年, Brooks 等指出,以 100% $vVO_2\max$ 进行间歇训练能最大限度地提高 $VO_2\max$,也能使线粒体密度得到显著改善,同时还能增加血乳酸浓度,刺激乳酸的清除(乳酸的清除率直接与浓度有关,浓度越高,清除效率越高)。2000 年, Billat 等发现, 30 s 100% $vVO_2\max$ 和 30 s 50% $vVO_2\max$ 交替方式进行的间歇训练比以血乳酸速度与最大摄氧量速度的中点速度($V_{\triangle 50}$)持续训练在 $VO_2\max$ 水平维持的时间更长(8 min vs 3 min),且间歇训练不伴有大量的血乳酸累积。这项研究表明,尽管持续的大强度训练和间歇训练(以较小强度运动为间歇)均能达 $VO_2\max$,但是间歇训练能使机体的这种高代谢水平维持更长时间^[51]。Robinson 等研究认为,以达到 90%~100% $VO_2\max$ 的强度运动能最大限度地改善心血管及呼吸系统的功能^[52],因此,为了最大限度地提高氧运输系统的能力, Astrand 和 Rodahl 提出采用 10 s 运动, 5 s 休息以达到 $VO_2\max$ 的间歇训练方法,并发现优秀运动员($VO_2\max=5.3$ L/min)用这种训练方法能持续运动 30 min,其中 20 min 能维持在 $vVO_2\max$ 水平。Astrand 和 Rodahl 研究还发现,在田赛和径赛训练中,间歇时间为 10 s~3 min,且一般为消极性休息,而对于个人维持高强度运动的能力(如:运动至力竭的时间)却未涉及^[53]。Billat 等研究发现,以 60% 和 100% $vVO_2\max$ (以个人在 $VO_2\max$ 水平运动至力竭的时间的 50% 为每次运动的时间)训练与持续训练相比,能使长跑运动员在 $VO_2\max$ 水平持续的距离加倍^[54],并认为在 $VO_2\max$ 水平维持的时间很可能与以 $vVO_2\max$ 运动的时间密切相关^[51]。

尽管纵向研究表明,在提高 $VO_2\max$ 和 $vVO_2\max$ 的前提下,对于具体的运动项目采用何种方式的间歇训练或持续训练能使运动员在 $VO_2\max$ 水平的维持时间更长还未取得共识,但间歇训练法已广泛应用于体能主导类的速度性和耐力性运动项群及技能主导类的对抗性运动项群中。随着对 $vVO_2\max$ 、RE、 t_{lim} 、 $t_{lim}VO_2\max$ 等与 $VO_2\max$ 相关指标研究的不断深入,并随着研究对象、实验条件、器材、方法的逐渐统一,这些指标将在运动训练的监测、运动强度和时间的确定、比赛成绩的预测等方面得到越来越广泛的应用。

[参考文献]

- [1]王瑞元. 运动生理学[M]. 北京:人民体育出版社,2002:160.
- [2]常芸,何子红. 运动能力相关基因研究进展[J]. 中国运动医学杂志, 2002,21(2):173-178.
- [3]杨翼,李章华. 与最大摄氧量相关的单核苷酸多态性的研究进展[J]. 武汉体育学院学报,2005,39(7):54-58.
- [4]Yano T, Horiuchi M, Yunoki T, et al. Relationship between maximal oxygen uptake and oxygenation level in inactive muscle at ex-

- haustion in incremental exercise in humans[J]. *Physiol Res*, 2005, (54):679-685.
- [5]孟思进. 关于最大摄氧量的限制因素[J]. 武汉体育学院学报,2003, 37(2):43-46.
- [6]Lpretre PM, Koralsztejn JP, Billant VL. Effect of exercise intensity on relationship between $VO_2\max$ and cardiac output[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2004,36(8):1357-1363.
- [7]Powers SK, Howley ET. *Exercise Physiology Theory and Application to Fitness and Performance*[M]. 6th ed. New York: McGraw-Hill International Edition, 2007:264.
- [8]任建生. 心血管运动生理与运动处方[M]. 北京:北京体育大学出版社,1996:12-60.
- [9]de Cort SC, Innes JA, Barstow TJ, et al. Cardiac output, oxygen consumption and arteriovenous oxygen difference following a sudden rise in exercise in humans[J]. *J Physiol*, 1991,(441):501-512.
- [10]Takayoshi Yoshida, Koji Yamamoto, Masao Udo. Relationship between cardiac output and oxygen uptake at the onset of exercise[J]. *Eur J Appl Physiol*, 1993,(66):155-160.
- [11]Hill AV, Lupton H. Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilization of oxygen[J]. *Q J Med*, 1923, (16):135-171.
- [12]郭层城. 西北师范大学部分学生心血管机能和有氧工作能力的调查分析[J]. 体育学刊,1996,(4):40-42.
- [13]Boulay MR, Lortie G, Simoneau P, et al. Specificity of aerobic and anaerobic work capacities and power[J]. *Int J Sports Med*, 1985, (6):325-328.
- [14]Morqan DW, Martin PE, Krahenbuhl GS. Factors affecting running economy[J]. *Sports Med*, 1989, 7(5):310-330.
- [15]Saunders PU, Pyne DB, Telford RD, et al. Factors affecting running economy in trained distance runners[J]. *Sports Med*, 2004, 34(7):465-485.
- [16]Svedenhag J, Sjodin B. Physiological characteristics of elite male runners in and off-season[J]. *Can J Appl Sport Sci*, 1985,10(3):127-133.
- [17]Conley DL, Krahenbuhl GS. Running economy and distance running performance of highly trained athletes[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1980, 12(5):357-360.
- [18]Millet GP, Jaouen B, Borrani F, et al. Effects of concurrent endurance and strength training on running economy and VO_2 kinetics[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2002, 34(8):1351-1359.
- [19]胡国鹏,刘无逸,向剑锋. 跑步效率(running economy)的影响因素[J]. 浙江体育科学,2005,2(2):83-87.
- [20]Williams KR, Cavanagh PR. Relationship between distance running mechanics, running economy, and performance[J]. *J Appl Physiol*, 1987, 63(3):1236-1245.
- [21]Franch J, Madsen K, Djurhuus S, et al. Improved running economy following intensified training correlates with reduced ventilatory demands[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1998,30(8):1250-1256.
- [22]Denadai BS, Ortiz MJ, Greco CC, et al. Interval training at 95% and 100% of the velocity at $VO_2\max$: effects on aerobic physiological indexes and running performance[J]. *Appl Physiol*, 2006, 31(6):737-743.
- [23]Vandewalle H, Vautier JF, Kachouri M, et al. Work-exhaustion time relationships and the critical power concept: a critical review[J]. *J Sports Med Phys Fitness*, 1997,37(2):89-102.
- [24]Daniels J, Scardina N, Hayes J, et al. Elite and sub-elite female

- middle and long distance runner[C]. // Landers DM. Sport and Elite Performers. Vol. 3 Proceedings of the 1984 Olympic Scientific Congress. Champaign, IL: Human Kinetics Publishers, 1984:57—72.
- [25] Billat V, Koralsztein JP. Significance of the velocity at VO_2 max and time to exhaustion at this velocity[J]. Sports Med, 1996, (16): 312—327.
- [26] Billat V, Blondel N, Berthoin S. Determination of the velocity associated with the longest time to exhaustion at maximal oxygen uptake[J]. Eur J Appl Physiol, 1999, (80): 159—161.
- [27] 向剑锋, 刘无逸. 最大摄氧量速度研究进展(综述)[J]. 体育科研, 2004, 25(1): 37—41.
- [28] Anderson O. To optimize your performance, train "A la Veronique"[J]. Running Res, 1994, (10): 1—4.
- [29] Billat V, Renoux JC, Pinoteau J, et al. Times to exhaustion at 100% of velocity at VO_2 max and modelling of the time-limit/velocity relationship in elite long-distance runners[J]. Eur J Appl Physiol, 1994, (69): 271—273.
- [30] Di Prampero PE. The energy cost of human locomotion on land and in water[J]. Int J Sports Med, 1986, 7(2): 55—72.
- [31] Lacour JR, Padilla-Maquacelaya S, Barthélémy JC, et al. The energetics of middle-distance running[J]. Eur J Appl Physiol, 1990, (60): 38—43.
- [32] Lacour JR, Padilla-Maquacelaya S, Chatard JC, et al. Assessment of running velocity & maximal oxygen uptake[J]. Eur J Appl Physiol, 1991, (62): 77—82.
- [33] Smith TP, McNaughton LR, Marshall KJ. Effects of 4-wk training using V_{max}/T_{max} on VO_2 max and performance in athletes[J]. Med Sci Sports Exerc, 1999, 31(6): 892—896.
- [34] Whipp BJ. The slow component of O_2 uptake kinetics during heavy exercise[J]. Med Sci Sports Exerc, 1994, (26): 1319—1326.
- [35] Billat V, Morton RH, Blondel N, et al. Oxygen kinetics and modeling of time to exhaustion whilst running at various velocities at maximal oxygen uptake[J]. Eur J Appl Physiol, 2000, (82): 178—187.
- [36] Billat V, Flechet B, Petit B, et al. Interval training at VO_2 max: effects on aerobic performance and overtraining markers[J]. Med Sci Sports Exerc, 1999, (31): 156—163.
- [37] Cunningham LN. Relationship of running economy, ventilatory threshold and maximal oxygen consumption to running performance [J]. Res Q Exerc Sport, 1990, (61): 369—374.
- [38] Babineau C, Leger L. Physiological response of 5/1 intermittent aerobic exercise and its relationship to 5-km endurance performance [J]. Int J Sports Med, 1997, 18(1): 13—19.
- [39] Morgan DW, Baldini GD, Martin PE, et al. Ten kilometer performance and predicted velocity at VO_2 max among well-trained male runners[J]. Med Sci Sports Exerc, 1989, (21): 78—83.
- [40] Millet GP, Candau R, Fattori P, et al. VO_2 response to different intermittent runs at velocity associated with VO_2 max[J]. Can J Appl Physiol, 2003, 28(3): 410—423.
- [41] Yoshida T, Udo M, Iwai K, et al. Physiological characteristics related to endurance running performance in female distance runners [J]. J Sports Sci, 1993, 11(1): 57—62.
- [42] Astrand PO, Saltin B. Oxygen uptake during the first minutes of heavy muscular exercise[J]. J Appl Physiol, 1961, (16): 971—976.
- [43] Hill DW, Smith JC. Determination of critical power by pulmonary gas exchange[J]. Can J Appl Physiol, 1999, (24): 74—86.
- [44] Barstow TJ, Molea PA. Linear and nonlinear characteristics of oxygen uptake kinetics during heavy exercise[J]. J Appl Physiol, 1991, (71): 2099—2106.
- [45] Bosquet L, Leger L, Legros P. Methods to determine aerobic endurance[J]. Sports Med, 2002, 32: 675—700.
- [46] 胡国鹏, 刘无逸, 向剑锋. 最大耗氧量速度运动时的生理负荷分析及意义[J]. 体育科学, 2005, 25(8): 43, 59—61.
- [47] Midgley AW, McNaughton LR, Wilkinson M. Is there an optimal training intensity for enhancing the maximal oxygen uptake of distance runners? empirical research findings, current opinions, physiological rationale and practical recommendations[J]. Sports Med, 2006, 36(2): 117—132.
- [48] Hill DW, Rowell AL. Running velocity at VO_2 max[J]. Med Sci Sports Exerc, 1996, (28): 114—119.
- [49] Vuorimaa T, Karvonen J. Recovery time in interval training for increasing aerobic capacity[J]. Ann Sports Med, 1988, (3): 215—219.
- [50] Fox E. Differences in metabolic alterations with sprint versus endurance interval training[M]. // Howald H, Poortmans J. Metabolic Adaptation to Prolonged Physical Exercise. Basel: Birkhauser, 1975: 119—126.
- [51] Billat V, Slawinski J, Bocquet V, et al. Intermittent runs at the velocity associated with maximal oxygen uptake enables subjects to remain at maximal oxygen uptake for a longer time than intense but submaximal runs[J]. Eur J Appl Physiol, 2000, 81: 188—196.
- [52] Robinson DM, Robinson S, Hume PA, et al. Training intensity of elite male distance runners[J]. Med Sci Sports Exerc, 1991, (23): 1078—1082.
- [53] Astrand PO, Rodahl K. Textbook of Work Physiology. Physiological Bases of Exercise[M]. New York: McGraw-Hill, 1986: 336.
- [54] Billat V. Use of blood lactate measurements for prediction of exercise performance and for control of training[J]. Sports Med, 1996, (22): 157—175.