

最大脂肪代谢强度在运动实践中应用的研究进展述评

宋伟, 胡柏平

(陕西师范大学 体育学院, 陕西 西安 710062)

摘 要: 运动时脂肪代谢率随着运动强度的增加而增加, 并在达到最大值后下降, 单位时间内脂肪代谢峰值对应的强度为最大脂肪代谢强度(Fat_{max}), 此峰值为最大脂肪代谢率(Fat_{max} Rate)。对最大脂肪代谢强度的测试方法、影响因素以及在实践中的应用进行了综述, 得出该指标对于制订减重计划、健康运动处方以及耐力训练具有重要的现实意义。目的是为人们选择更有效的减重及健身运动强度提供参考。

关 键 词: 运动生物化学; 最大脂肪代谢强度; 脂肪代谢; 最大脂肪代谢率; 综述
中图分类号: G804.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7116(2010)05-0104-06

Review of progress made in the study of the application of maximum fat metabolism intensity in the practice of exercising

SONG Wei, HU Bai-ping

(School of Physical Education, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: During exercising the fat metabolism rate increases as exercise intensity increases, and decreases after it reaches the maximum value; the intensity corresponding to the fat metabolism peak value within a unit time is called maximum fat metabolism intensity (Fat_{max}), and such a peak rate is called maximum fat metabolism rate (Fat_{max} Rate). The authors gave an overview of the test methods and affecting factors of Fat_{max} as well as the application of Fat_{max} in practice, and concluded that this index has important realistic significance in stamina training and working out programs for weigh reduction and prescriptions for healthy exercising. The purpose of this article is to provide a referential criterion for people to select more effective exercise intensity for weight reduction and fitness promotion.

Key words: exercise biochemistry; maximum fat metabolism intensity; fat metabolism; maximum fat metabolism rate; overview

脂肪组织的消耗无论对于瘦身者还是健身爱好人群都非常重要^[1]。一般认为, 低强度长时间运动是减脂的最佳方式。低强度运动增加脂肪代谢一直被认为是体重控制的最好运动方式^[2]。虽然关于脂肪代谢和运动强度之间关系的报道很多, 但是很少有人关注较大范围内两者之间的关系。低强度运动时脂肪代谢的比例较高, 而相对单位时间的能量消耗量也明显较低^[3]。因此, 许多研究者开始致力于寻找更适宜的脂肪代谢运动强度, 最大脂肪代谢强度(Fat_{max})就是其中之一。

1 Fat_{max} 的定义

1939 年, Christensen 和 Hansen^[4]提出运动强度的改变会导致能量代谢底物相应出现变化, 随着运动强度的不断增加, 糖代谢也会成比例地增加; 与此不同的是, 脂肪消耗在开始阶段缓慢增加, 而增加到一定程度时反而下降。脂肪氧化与摄氧量之间的关系, 理论上脂肪代谢率达到最高点时处在低强度与高强度运动之间。Brooks 和 Mercier^[5]提出一个“Crossover”能量交叉调控的概念, 主要说明运动强度的变化是如何影响能量物质的利用, 用以推估在持续运动中脂肪以

收稿日期: 2009-10-10

基金项目: 陕西师范大学 211 工程重点建设学科——运动生物学重点学科建设项目; 陕西师范大学青年科技项目(200801018)。

作者简介: 宋伟 (1980-), 助教, 硕士, 研究方向: 机体耐力指标的评价。

及碳水化合物的利用情形。在相对低强度的运动中($VO_{2max} \leq 45\%$),脂肪为主要利用的能量物质,而在高强度的运动中($75\%VO_{2max}$),碳水化合物为主要利用的能量物质。

2001年,Jeukendrup和Achten^[6]指出在单位时间内脂肪代谢峰值对应的强度为最大脂肪代谢强度(Fat_{max}),此峰值为最大脂肪代谢率(Fat_{max} Rate),并对 Fat_{max} 的测量方法以及训练效果提出展望; Fat_{max} 无论是对于减肥人群、健康人群还是耐力训练者都很重要。之后的研究也都集中在 Fat_{max} 准确出现的测试方法以及不同条件下训练 Fat_{max} 的功效上。

2 Fat_{max} 的测试方法

2.1 不同负荷工具测试对 Fat_{max} 及相关指标的影响

在检测 Fat_{max} 时候,绝大多数研究是以功率自行车或者跑步机的渐增负荷流程进行判定,Achten^[7]在对比了这两种运动方式后发现, Fat_{max} 在两者之间并没有显著差异,而受试者在跑步机上的 Fat_{max} Rate显著高于功率自行车,除此之外最大脂肪代谢率还出现在一个范围较广的强度中,这与Snyder等^[8]的研究相符。在一些恒定负荷的测试中,脂肪代谢率也出现了类似的情况,即用跑步机要大于用功率自行车。Thomas等^[9]对5个受试对象分别进行了4种有氧模式的测试,强度都选用 $65\%HR_{max}$,结果10 min之后,跑步机测出的脂肪代谢率要比功率自行车高约21%。

不同负荷工具测试下 Fat_{max} Rate的不同,主要因为不同的运动方式所产生的运动强度是不一样的。一般来说,功率自行车所测得的 VO_{2max} 值要比跑步机所测得数值低约7%~10%^[10], VO_{2max} 测试结果的不同导致跑台运动中受试者具有更高的 VO_{2max} 和HR。为了保证两种测试方法在相似的强度下进行运动,部分研究采用了精确方案(mode-specific)下 VO_{2max} 百分比强度^[8, 11-12]。Houmard等^[11]选取10名中等水平运动员分别进行了1 h跑台测试和功率自行车测试,强度都选择为 $75\%VO_{2max}$ (精确方案测试),结果最大摄氧量相对值为 $46.7 \text{ mL}/(\text{min} \cdot \text{kg})$ 和 $41.3 \text{ mL}/(\text{min} \cdot \text{kg})$,呼吸熵同为0.93水平时,脂肪代谢率分别为 $0.40 \text{ g}/\text{min}$ 和 $0.35 \text{ g}/\text{min}$;尽管该实验所测得的跑台脂肪代谢率要比功率自行车高,但是从整个能量供应的比例来看,两者之间非常相似。分析认为导致该结果的原因有很多,首先跑步机属于全身性运动,不像原地脚踏车偏重下肢肌群运动;其次人们认为自行车运动中肌纤维的动员要少一些,因为研究表明肌纤维的动员与儿茶酚胺(Catecholamine, CA)的释放是成比例的^[13],很可能在跑台运动中释放的CA数量比功率自行车要高,所以跑

步运动中CA的刺激比自行车运动高的假设还是比较合理的。另外一个假说也与肌肉量的募集有关系,运动过程中每条肌纤维释放的能量越多,它所承受的代谢压力就会越大,这种持续增长的压力水平和能量需求只能依靠增加糖的代谢来满足。Deschenes等^[14]研究了机体不同肌肉动员形式下的生理反应,肌电图数据表明蹬踏回转数在40次/min时的肌肉量募集、心率、皮质醇含量明显高于80次/min;然而呼吸熵水平没有显著变化。

2.2 Fat_{max} 的测试方案

一般来说,脂肪氧化的最大速率出现在一个比较大的范围内($33\% \sim 65\% VO_{2max}$)^[15-17]。 Fat_{max} 的测试往往经过2个、3个或者4个不同的运动强度后才会出现,这就很难准确判断最大脂肪代谢率出现时的运动强度。Achten等^[18]对这个问题进行了详细的探讨,首先让受试者在功率自行车上进行递增负荷的力竭运动(GE),为了判定这些分级的负荷是否能够准确反映 Fat_{max} 的大小,受试者又额外执行了一次4到6种恒定负荷运动(CE)(负荷强度与GE测试相对应);其次,为了研究每级负荷的持续时间和递增量的大小是否会影响测试的结果,7名受试者分别执行了3次递增负荷的力竭测试(GE 35/5、GE 35/3、GE 20/3);结果显示:当每一级的负荷持续时间由5 min下降为3 min,或者递增负荷的大小由35 W降低为20 W时,各组测试所得的 Fat_{max} 没有显著性差异,说明持续性的递增负荷运动是准确测量 Fat_{max} 的有效方法。Achten的这些方案被后来的研究广泛引用,多数人都对他的结果表示认同,但是也有个别学者提出了不同的观点。T Meyer^[19]指出:Achten的研究存在了一些缺陷:首先,采用的等级持续时间太短从而不能排除两个连续等级之间的遗留影响(carry-over effects);其次,作者做出的每个等级持续时间为3 min的结论应该进行更广泛的统计学分析,而不应该仅仅是显著性差异的比较;最后, VO_{2max} 的百分比不能准确表示个体在不同代谢过程中相似的负荷量^[20],对于不同的个体来讲,血乳酸的堆积与 VO_{2max} 的百分比也不完全是一一对应的^[21],因为在糖酵解过程中过多 CO_2 的排出可能会影响呼吸熵的大小,而呼吸熵的大小一定意义上也决定了 Fat_{max} 的大小。为了克服上述研究的缺点,T Meyer^[19]选择了10位健康受试者在功率自行车上首先执行一次递增负荷力竭运动,目的是确定 VO_{2max} 和个体无氧阈(IAT),接下来的4个星期,分别执行了5次恒定负荷的运动,持续时间为1 h,强度为55%、65%、75%、85%、95% IAT,所有的受试者均出现了乳酸稳态,减少了产生过多 CO_2 的误差。结果显示:运动强度对于脂肪代谢的绝对值没有明显

影响,而最后两个阶段的 $VO_{2\max}$ 与其他阶段相比差异具有显著性。当然,作者也提出仅仅用运动时间去界定 Fat_{\max} 是不科学的,病人和受试者更喜欢简单的测试方法,这也是 Achten 的方案被广泛应用的原因,所以在 2009 年他又通过实验提出了一个折中的方案^[22]: (1)baseline test(基准测试),起始负荷为 100 W(女性为 50 W),每 3 min 增加 50 W(女性为 25 W),直到力竭,判断 $VO_{2\max}$; (2) Fat_{\max} test,方案设计包括 5 级递增负荷,每一级的持续时间为 6 min,开始负荷为 baseline test 中血乳酸第 1 次增加所对应的负荷,第 5 级负荷为 baseline test 中呼吸熵水平达到 1 时所对应的强度,其他 3 级的强度按照两者之差的平均值进行计算。

相对于功率自行车,选择跑步机进行测试的报道少一些。Achten^[7]选择 12 名男性受试者进行跑步机测试,每 3 min 为一个阶段,从速度 5.5、6.5 km/h,1% 坡度开始热身,正式的实验流程为开始负荷 7.5 km/h、1% 坡度,每 3 min 增加 2% 坡度,一直到呼吸水平达到 1;接着把速度调整到 10 km/h、10% 坡度,每 3 min 增加 2 km/h 直到力竭。台湾的一份文献报道中因部分受试者运动能力较佳,速度在 7.5 km/h,坡度变化的过程中,呼吸熵较难达到 1^[23],所以将上述测试流程进行了修正,受试者呼吸熵稳定到达 0.9 时,完成该阶段,将速度与坡度调整到 10 km/h 和 10% 坡度,再运动至力竭。

3 脂肪代谢量的计算

能量的消耗在临床上主要采用间接测热法进行测定,即先测定被试者一定时间内耗氧量和二氧化碳产生量,然后根据有关数据计算出一定时间内产热量。糖、脂肪、蛋白质氧化率的计算是依据气体交换和排泄物中氮的含量(尿液、汗液)^[24]。然而,机体主要利用糖和脂肪氧化供能,并且排泄物中氮含量的监测分析过程不方便,因此可以将蛋白质呼吸熵忽略不计。脂肪代谢量计算根据上述原理,参考两个化学计算方程式:

$$\begin{aligned} \text{脂肪代谢量}(\text{mg}/\text{min}) &= 1.67 V(\text{O}_2) - 1.67 V(\text{CO}_2) - 1.92 \rho(\text{N}_2) \\ \rho(\text{N}_2) &\text{为尿液里氮的质量分数,忽略不计后,方程修订为} \\ \text{脂肪代谢量}^{[25-26]}(\text{mg}/\text{min}) &= 1.67 V(\text{O}_2) - 1.67 V(\text{CO}_2) \quad (1) \\ \text{脂肪代谢量}^{[27]}(\text{mg}/\text{min}) &= 1.694 6 V(\text{O}_2) - 1.701 2 V(\text{CO}_2) \quad (2) \end{aligned}$$

两个方程式分别引自 Frayn^[24]和 Peronnet^[28]。方程(2)与方程(1)的区别,可能是作者对平均三酰甘油分子式计算的不同而造成的。Frayn 选用的分子式为 $C_{55}H_{104}O_6$, Peronnet 计算的分子式为 $C_{54.8106}H_{100.1426}O_6$,所以两者在公式的计算上稍有不同。从查找的文献来看,多数引用公式(2)。

4 影响 Fat_{\max} 的因素

从目前查到的文献资料来看, Fat_{\max} 的影响因素有很多,包括受试者训练水平、运动强度、运动时间、运动方式以及营养物质的摄取等等。

4.1 训练水平对 Fat_{\max} 的影响

Fat_{\max} 值的大小与受试者心肺功能有关,对于训练者和非训练者或者不同训练水平的人来讲, Fat_{\max} 值是有差异的。以往的资料在研究不同受试对象脂肪代谢与运动强度之间的关系时显示:在拥有相同脂肪代谢以及相同血浆游离脂肪酸(FFA)利用率的前提下,受训练者的脂肪代谢量显著高于未训练者;受训练者的脂肪代谢的最大值出现在 59% $VO_{2\max}$,未受过训练的人约在 40% $VO_{2\max}$ ^[1, 29]; Nordby^[30]的研究也发现训练者 Fat_{\max} 显著高于非训练者,同时拥有较高的 Fat_{\max} Rate; Achten 等^[31]将一组运动员分为低水平组和高水平组,结果发现:两组受试者 Fat_{\max} Rate 出现显著性差异,有意思的是 Fat_{\max} 却没有显著的不同,而且这两个指标与受试者的体重、体质指数以及体脂百分比之间没有明显的关系。在回顾了有关 Fat_{\max} 的相关研究发现:中等强度下进行运动可获得单位时间内脂肪最大代谢总量的结果,这对于传统的低强度长时间运动是减脂的最佳运动方式提出了挑战,选择 Fat_{\max} 进行训练,是一个因人而异的强度。

4.2 性别对 Fat_{\max} 大小的影响

有学者认为,相对于男性来讲女性可能更适合从事耐力运动,因为其在运动中利用脂肪酸参与能量供应的能力更强;这样的说法也在一些文献当中通过部分脂肪代谢的指标得到了印证^[32-33]。Tracy 等^[34]选择 14 名男性和 13 名女性分别进行了 2 h 的运动(40% $VO_{2\max}$)训练,结果显示,运动过程中,女性脂肪代谢供能所占的比例要明显高于男性,而糖代谢所占的比例男性要显著高于女性,这种性别上的差异在运动前与运动后则没有出现,研究还发现男性的肾上腺素和去甲肾上腺素要明显高于女性,而血液中甘油三酯的水平在两者之间没有差异,所以可以得出女性可能会对 CA 的脂解作用更加敏感; Venables 等^[35]对 300 名志愿者(157 名男性,143 名女性)进行了测试,结果发现女性的 Fat_{\max} Rate 要高于男性,对应的 Fat_{\max} 也出现了显著性差异。

4.3 营养膳食对 Fat_{\max} 大小的影响

已经证明,运动前或运动中补糖可以有效降低脂肪酸的氧化。Horowitz^[36]认为,赛前补糖可以导致胰岛素浓度的上升,而胰岛素浓度的上升可以有效抑制脂肪酸的氧化;补糖之后使得机体糖代谢处于较高水平,这也限制了乙酰辅酶 A 进入线粒体进行氧化^[37]。Achten

等^[25]选择了11名受试者执行了两次递增负荷的力竭运动,同时采用单盲法分别在运动前给队员45 min补充糖和安慰剂,结果显示:Fat_{max} Rate明显降低;补糖组的Fat_{max}也有显著性的下降。Hawley等^[38]选择了5名自行车运动员,运动前90 min分别补充不同的营养物质:高脂、高糖、低脂、低糖,之后首先进行1次20 min,80% VO_{2max}强度的自行车蹬踏,紧接着再执行1次持续时间约为30 min的蹬踏(能量消耗为600 kJ),结果显示:前20 min高脂组血浆游离脂肪酸浓度极显著性较高,呼吸熵水平显著性较低,脂肪代谢率也同时升高,这可能高脂组在运动中的游离脂肪酸利用率显著高于高糖组,且高脂肪膳食会改变运动中能量物质的利用方式,当然作者也指出高脂膳食在接下来的30 min中对运动的时间没能产生影响。由上述研究可知,运动前膳食营养的补充会对运动中底物利用产生很大的影响,但是对于脂肪代谢率与Fat_{max}的变化影响还需要进一步研究。

5 Fat_{max}在运动实践中的应用

Fat_{max}可以用来进行减肥计划的制定^[39-40],同时也为个体进行运动训练提供了一个靶强度^[41]。运动实践中,往往用百分比VO_{2max}或者用最大心率的百分比来表示。

5.1 Fat_{max}与糖尿病

肥胖与胰岛素抵抗和血清游离脂肪酸浓度有很大关系,两者是导致二型糖尿病的主要因素。很多研究表明:糖尿病病人肌肉中甘油三酯堆积现象严重,脂肪代谢能力降低。无论是对于瘦人、肥胖者还是糖尿病人,运动可以提高其体内胰岛素敏感性。但是对于运动的强度、类型和时间没有一致的定论^[42-45]。Michlle等^[46]选取了8名男性肥胖者进行测验,所有受试者都执行2个为期4周的训练(中间间歇6周),分别为:1-TPcon,持续训练,强度为Fat_{max};2-TPint,间歇训练,强度为±20%Fat_{max}。两个方案每次训练时间第1周为30 min,以后每周增加10 min一直到60 min,频率为每周5次。结果表明:TPcon组脂肪代谢率增加了约44%,胰岛素敏感性指数提高了约27%;而TPint组没有变化。结论:Fat_{max}强度的持续训练法可以有效提高脂肪氧化比例,明显增加胰岛素敏感性。对于肥胖及糖尿病患者效果明显。最新研究显示:肥胖病人是否患有二型糖尿病对Fat_{max}的影响很小,有氧训练可以提高肌肉的氧化能力^[47]。这些代谢的适应看上去与胰岛素敏感性关系不大。可见,脂肪氧化能力的降低不是二型糖尿病患者出现胰岛素抵抗的主要原因。

5.2 Fat_{max}与运动训练

Prado等^[48]选择29名男性军校学生进行为期12周的Fat_{max}强度训练发现,组间(与对照组相比)血清脂蛋白水平(HDL-c、CT、TG、LDL-c)没有显著性差异,而组内各项指标产生了显著性变化。Gonzalez等^[49]对不同耐力项目运动员(铁人三项、公路自行车、山地自行车)的Fat_{max}测试后发现,三者之间没有明显差异,提示:Fat_{max}(%VO_{2max})可以反映运动员在不同运动项目训练过程中产生的不同耐力适应。Koscki^[50]通过对12名高水平马拉松运动员的研究发现,在高强度的马拉松运动中脂肪代谢的能力非常关键,Fat_{max}是一个很有价值指标,它可以对运动员的运动成绩做出一种评价。

Fat_{max}是一个崭新的概念,该指标对于制订减重计划、健康运动处方以及耐力训练具有重要的实际意义,目前对其的研究还只是处于探索阶段。Fat_{max}的测试方法和手段还没有完全统一,运动中脂肪代谢的影响因素也较多,如训练水平、运动强度等,所以得出来的结论也各不相同^[22],有些学者也提出Fat_{max}只是随着运动强度增加而出现的一种现象,仅仅反映渐增负荷运动中某个阶段脂肪代谢率的情形,应用到实际的跑步状态还比较困难,对其存在的意义提出了质疑^[51]。目前,对Fat_{max}的研究报道主要集中在实验室,实践中的应用研究还比较少,特别是对普通的人群,其实际的应用效益仍有待于未来更多的研究来证实。

参考文献:

- [1] Klein S, Coyle E F, Wolfe R R. Fat metabolism during low-intensity exercise in endurance-trained and untrained men[J]. American Journal of Physiology, 1994, 267: 934-940.
- [2] Power S K, Howley E T. Exercise physiology-theory and application to fitness and performance[M]. NY: Mcgraw-Hill, 2001: 49-51.
- [3] 杨群正,王顺正,陈信良.最大脂肪代谢量强度与最大摄氧量的关系研究[J].运动生理学体能学报, 2005(3): 21-29.
- [4] Christensen E, Hansen O. Arbeitsfahigkeit and ernahrung[J]. Scand Arch Physiol, 1939, 81: 160-171.
- [5] Brooks G A, Mercier J. Balance of carbohydrate and lipid utilization during exercise:the "crossover" concept[J]. Journal of Applied Physiology, 1994, 76(6): 2253-2261.
- [6] Asker E, Jeukendrup A E, Achten J. Fat_{max}: A new concept to optimize Fat oxidation during exercise?[J]. European Journal of Sport Science, 2001, 1(5): 1-5.

- [7] Achten J, Venables M C, Jeukendrup A E. Fat oxidation rates are higher during running compared with cycling over a wide range of intensities[J]. *Metabolism*, 2003, 52: 747-752.
- [8] Snyder A C, O'hagan K P, Clifford P S, et al. Exercise responses to in-line skating: comparisons to running and cycling[J]. *Int J Sports Med*, 1993, 14: 38-42.
- [9] Thomas T R, Feiock C W, Araujo J. Metabolic responses associated with four modes of prolonged exercise[J]. *J Sports Med Phys Fitness*, 1989, 29(1): 77-82.
- [10] Koyal S N, Whipp B J, Hnuntsman D, et al. Ventilatory responses to metabolic acidosis of treadmill and cycle ergometry[J]. *J Appl Physiol*, 1976, 40: 864-867.
- [11] Houmard J A, Egan P C, Johns P D, et al. Gastric emptying during 1 h of cycling and running at 75% VO_{2max} [J]. *Medicine Science in Sports*, 1991, 23(3): 320-325.
- [12] Nieman D C, Nehlsen-cannarella S L, Fagoaga O R, et al. Effects of mode and carbohydrate on the granulocyte and monocyte response to intensive, prolonged exercise[J]. *J Appl Physiol*, 1998, 84: 1252-1259.
- [13] Davies C T, Few J, Foster C, et al. Plasma catecholamine concentration during dynamic exercise involving different muscle groups[J]. *Eur J Appl Physiol*, 1974, 32: 195-206.
- [14] Deschenes M R, Kraemer W J, Mccoy R W, et al. Muscle recruitment patterns regulate physiological responses during exercise of the same intensity[J]. *Am J Physiol*, 2000, 279: 2229-2236.
- [15] Arnos P M, Sowash J, Andres F F. Fat oxidation at varied work intensities using different exercise modes[J]. *Med Sci Sport Exerc*, 1997, 29: 199.
- [16] Jones N L, Heigenhauser G J, Kuskis A, et al. Fat metabolism in heavy exercise[J]. *Clin Sci Lond*, 1980, 59: 469-478.
- [17] Sidossts L S, Gastaldelli A, Klein S, et al. Regulation of plasma fatty acid oxidation during low-and high-intensity exercise[J]. *J Appl Physiol*, 1998, 78: 43-49.
- [18] Achten J, Gleeson M, Jeukendrup A E. Determination of the exercise intensity that elicits maximal fat oxidation[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2002, 34(1): 92-97.
- [19] Meyer T, Gabler N, Kindermann W. Determination of "Fat_{max}" with 1 h cycling protocols of constant load[J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2007, 32: 249-256.
- [20] Weltman A, Snead D, Seip R, et al. Percentages of maximal heart rate reserve and VO_{2max} for determining endurance training intensity in male runners[J]. *Int J Sports Med*, 1990, 11: 218-222.
- [21] Meyer T, Gabriel H H W, Kindermann W. Is determination of exercise intensities as percentages of VO_{2max} or HR_{max} adequate?[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1999, 31: 1342-1345.
- [22] Meyer T, Fikz C, Rosenberger F, et al. The reliability of Fat_{max}[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2009, 19: 213-221.
- [23] 王予仕. 最大脂肪代谢运动强度跑步训练对最大脂肪代谢率之影响[D]. 嘉义: 中正大学运动与休闲教育研究所, 2007: 20.
- [24] Frayn K N. Calculations of substrate oxidation rates in vivo from gaseous exchange[J]. *J Appl Physiol*, 1983, 55: 628-634.
- [25] Achten J, Jeukendrup A E. The effect of pre-exercise carbohydrate feedings on the intensity that elicits maximal fat oxidation[J]. *Journal of Sports Science*, 2003, 21(12): 1017-1024.
- [26] Achten J, Gleeson M, Jeukendrup A E. Determination of the exercise intensity which induces maximal fat oxidation (MFO)[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2001, 33(5)(Supplement 1): s52.
- [27] Takken T, Custers J W H, Visser G, et al. Prolonged exercise testing in two children with a mild Multiple Acyl-CoA-Dehydrogenase deficiency[J]. *Nutrition & Metabolism*, 2005, 2: 12.
- [28] Peronnet F, Massicote D. Table of non-protein respiratory quotient; an update[J]. *Can J Sport Sci*, 1991, 16: 23-29.
- [29] Bergman B C, Butterfield G E, Wolfel E, et al. Evaluation of exercise and training on muscle lipid metabolism[J]. *American Journal of Physiology*, 1999, 276: 106-117.
- [30] Nordby P, Saltin B, Helge J W. Whole-body fat oxidation determined by graded exercise and indirect calorimetry: a role for muscle oxidation capacity?[J]. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sport*, 2006, 16: 209-214.
- [31] Achten J, Jeukendrup A E. Maximal fat oxidation during exercise in trained men[J]. *Int J Sports Med*,

- 2003, 24, 603-698.
- [32] Froburg K, Pedersen P K. Sex differences in endurance capacity and metabolic response to prolonged, heavy exercise[J]. *J Appl Physiol*, 1984, 4: 446-450.
- [33] Tarnopolsky M A, Atkinson S A, Tarnopolsky M A, et al. Carbohydrate loading and metabolism during exercise in men and women[J]. *J Appl Physiol*, 1995, 78: 1360-1368.
- [34] Horton T J, Pagliassotti M J, Hobbs K, et al. Fuel metabolism in men and women during and after long-duration exercise[J]. *J Appl Physiol*, 1998, 85: 1823-1832.
- [35] Venables M C, Achten J, Ring C, et al. Fat oxidation during exercise has stronger links to physical activity and VO_{2max} than body fat[J]. *Med Sci Sport Exerc*, 2003, 35: 525.
- [36] Horowitz J, Mora-rodriguez R, Byerley L, et al. Lipolytic suppression following carbohydrate ingestion limits fat oxidation during exercise[J]. *American Journal of Physiology*, 1997, 273: 768-775.
- [37] Vanloon L J, Greenhaff P L, Constantin-teodosiu D, et al. The effects of increasing exercise intensity on muscle fuel utilisation in humans[J]. *Journal of Physiology*, 2001, 536: 295-304.
- [38] Hawley J A, Burke L M, Angus D J, et al. Effect of altering substrate availability on metabolism and performance during intense exercise[J]. *British Journal of Nutrition*, 2000, 84: 829-838.
- [39] Brandou F, Savy-pacaux A M, Marie J, et al. Comparison of the type of substrate oxidation during exercise between pre and post pubertal markedly obese boys[J]. *Int J Sports Med*, 2006, 27: 407-414.
- [40] Zunquin G, Theunynck D, Sesboue B, et al. Effects of puberty on glucose-lipid balance during exercise in the obese child[J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2006, 31(4): 442-448.
- [41] Brandou F, Savy-pacaux A M, Marie J, et al. Impact of high-and low-intensity targeted exercise training on the type of substrate utilization in obese boys submitted to a hypo-caloric diet[J]. *Diabetes Metab*, 2005, 31: 327-335.
- [42] Borghouts L B, Backx K, Mensink M F, et al. Effect of training intensity on insulin sensitivity as evaluated by insulin tolerance test[J]. *Eru J Appl Physiol Occup Physiol*, 1999, 80: 461-466.
- [43] Kang J, Robertson R J, Hagberg J M, et al. Effect of exercise intensity on glucose and insulin metabolism in obese individuals and obese NIDDM patients[J]. *Diabetes Care*, 1996, 19: 341-349.
- [44] Oshida Y, Yamanouchi K, Hayamizu S, et al. Long-term mild jogging increases insulin action despite no influence on body mass index or VO_{2max} [J]. *J Appl Physiol*, 1989, 66: 2206-2210.
- [45] Segal K R, Edano A, Abalos A, et al. Effect of exercise training on insulin sensitivity and glucose metabolism in lean, obese, and diabetic men[J]. *J Appl Physiol*, 1991, 71: 2402-2411.
- [46] Venables M C, Jeukendrup A E. Endurance training and obesity: effect on substrate metabolism and insulin sensitivity[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2008, 40(3): 495-502.
- [47] Mogensen M, Vind B F, Hojlund K, et al. Maximal lipid oxidation in patients with type 2 diabetes is normal and shows an adequate increase in response to aerobic training[J]. *Diabetes, Obesity and Metabolism*, 2009, 11: 874-883.
- [48] Prado E S, Almeida R D, Fortes M S R, et al. Effects of aerobic training with intensity within the Fat_{max} intensity zone on the lipid/lipoprotein serum profile in AMAN cadets[J]. *Fitness Performance Journal*, 2004, 5: 284-290.
- [49] Gonzalez C, Galilea P, Drobic F, et al. Fat oxidation rate in high level endurance athletes[G]//*Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2007: 366.
- [50] Koscki A M, Faria I E, Quintana R, et al. The relationship between fat oxidation and marathon running performance[C]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2005, 37(5): 26.
- [51] 杨群正. 60分钟最大脂肪代谢率强度跑步运动对脂肪代谢影响之研究[D]. 嘉义: 中正大学运动与休闲教育研究所, 2005: 45-46.