

最大脂肪氧化强度运动干预肥胖症理论与应用研究进展*

谭思洁¹ 郭 振² 王建雄³

肥胖和超重与心脏病、高血压、2型糖尿病、呼吸系统疾病、某些类型的癌症、生育畸形、骨性关节炎和睡眠呼吸暂停综合征等疾病的发生、发展密切相关^[1-6],已经成为影响人类生存质量和寿命的重要危险因素之一。肥胖的不断低龄化已经对儿童生长发育、心肺功能、姿势控制及感觉能力,以及心理健康构成严重威胁^[7-8]。其中单纯性肥胖与生活方式密切相关,一般认为是缺乏体力活动和膳食热量摄入过多,代谢紊乱而导致的结果^[9-11]。适宜的有氧运动是目前公认的科学合理的减肥措施之一^[12-14]。其主要机制是通过额外运动增加热能消耗,大多数人都已接受运动减肥的理念,并渴望获得预期效果,但目前国内外运动减肥的成功率并未达到理想水平,成为大众健康领域的研究难点。其中运动强度选择不当被认为是最重要的问题^[10]。

以往大多数的运动减肥研究都应用了“中等运动强度”的概念,研究者一般选用最大耗氧量(VO_{2max})或最大心率(HR)的百分比来确定运动强度,但对于不同人群中中等强度的具体范围尚缺乏成熟的研究定论。部分研究以无氧阈作为运动减肥的目标强度^[15-16],但Bircher等发现以无氧阈确定运动强度适合于有训练的运动员,对于普通肥胖者并不适用^[17]。

有实验证实,从低到中等强度的渐增负荷运动,脂肪的氧化速度逐渐增加,但如果强度超出一定的范围,则脂肪的氧化速度下降,此时,运动减肥的效果反而不佳^[18]。理论上,在安全范围内通过运动的方式达到最大的脂肪代谢是获取最佳减肥效果的关键,于是2001年,Jeukendrup与Achten提出了最大脂肪氧化强度(maximal fat oxidation, FAT_{max})的概念^[19],即在单位时间内脂肪代谢峰值对应的运动强度为最大脂肪氧化强度^[20-21]。本文将综述有关 FAT_{max} 运动干预肥胖症理论及其应用的研究进展,旨在为改善目前肥胖症高发生率和防治成功率提供依据。

1 FAT_{max} 运动干预肥胖症的理论基础

运动可改善糖和脂肪的代谢,并可影响它们的动员与利用^[22],长期有氧运动可导致机体脂肪分解代谢增强,表现为在基础状态或相同强度运动状态的脂肪氧化供能比例增加^[23],

肥胖者的血糖,血脂显著降低^[24],其中,运动强度会显著影响运动干预肥胖特别是血脂改善的效果^[25]。19世纪末,一些学者报道人体利用糖的速率随运动强度的增加而增加,呼吸商(respiratory quotient, RQ)也随之升高^[18],在低强度运动中,血清中葡萄糖(glu)浓度与安静时相比无明显变化,随着运动强度的增加而显著增加。Romijn等^[26]发现,在25% VO_{2max} 、65% VO_{2max} 和85% VO_{2max} 三种强度的运动中,肌肉内甘油三酯(TG)在代谢供能中的作用不同,以65% VO_{2max} 强度的运动供能作用最大。有相当多的研究认为,中等强度的有氧运动更有利于脂肪的分解,并有利于改善人的身体成分、心肺功能以及糖尿病患者体能等^[27-29];还有研究者利用较高运动强度(85% VO_{2max})对超重的年轻女性进行减重干预,获得显著的效果^[30],其可能的机制是较大强度运动后过量氧耗显著高于中低强度运动,过量氧耗与游离脂肪酸代谢密切相关,这可能更有利于运动中脂肪动员,但较高强度运动用于普通人群,特别是中年以上人群的安全性值得探讨。当然,中等强度和高强度运动后恢复期存在的脂肪动员和氧化增加提示我们还应关注对运动后效应的研究^[31]。但是,Schrauwen等^[32]的研究表明,血浆甘油三酯浓度在低强度的运动训练后发生显著性降低,还有实验证实,随着运动强度的增加,血浆游离脂肪酸(FFA)所起的作用逐渐降低。因为大强度运动时糖代谢的加强抑制了长链脂肪酸进入线粒体^[33],限制了脂肪的氧化供能;同时外周脂肪组织中的脂肪分解速率下降,导致血清FFA浓度降低,在超过30min的85% VO_{2max} 强度的运动中,血清FFA浓度与运动强度成反比^[26]。

理论上,低强度运动过程中能量供应几乎全部来自脂肪氧化,而且外周脂肪分解程度最大。有研究表明,在30%和50% VO_{2max} 强度运动过程中,腹部皮下脂肪组织动员对肾上腺素受体的依赖性较低,而血浆心钠肽浓度升高^[34],研究已经证实静脉补充心钠肽具有促脂解作用,这支持了中低强度运动更有利于脂肪氧化。人们推论,低强度运动似乎更有利于机体脂肪组织的动员和肥胖的改善;由此看来,研究和寻找最优模式的运动干预肥胖方案仍需进一步深入研究。

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2013.10.023

*基金项目:天津市自然科学基金(12JCYBJC18100);天津市教育科学规划“十二五”重点课题(HE1016)

1 天津体育学院健康与运动科学系,天津,300381; 2 天津体育学院; 3 澳大利亚南昆士兰大学

作者简介:谭思洁,女,教授,硕士生导师; 收稿日期:2012-10-20

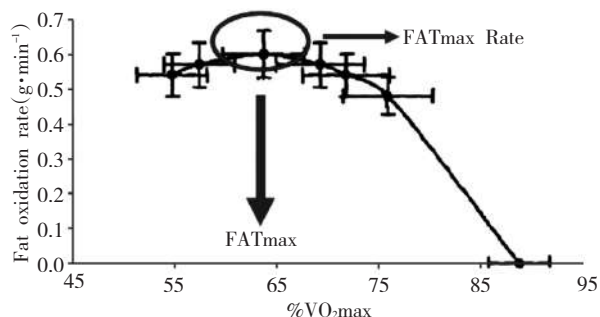
FATmax 运动干预肥胖症的理论依据是运动过程中能量物质的利用会随运动强度的不同而变化。在长时间低强度运动中,能源物质的利用逐渐由糖类转化为脂肪;随着运动强度与时间的增加,能源物质由脂肪转化为糖类,因此脂肪代谢量随着运动强度的增加,而呈现逐渐上升至顶点后下降的抛物线,那么,运动中体脂肪氧化速度的增加和下降即运动能量消耗和底物代谢的特征与运动强度密切相关^[26,35],在一定范围内,随运动的逐步激烈能耗逐步加大,当脂肪的氧化率最大即达到峰值时(抛物线的顶点,图1)被称为最大的脂肪氧化强度;在以后,随着运动强度的继续增加,糖参与供能比例逐渐加强,脂肪参与供能比例逐渐减少^[35],如 Dorien 等^[36]比较了 40% $\text{VO}_{2\text{max}}$ 和 70% $\text{VO}_{2\text{max}}$ 两种强度运动对肥胖男性脂肪氧化的影响,结果是 40% $\text{VO}_{2\text{max}}$ 强度的运动可明显增加运动中的脂肪氧化;Achten 等^[21]还发现当运动强度超过 89% $\text{VO}_{2\text{max}}$,脂肪参与供能的比例几乎接近于零。这似乎可以合乎逻辑的推测,在 FATmax 强度下运动可达到理想的减肥效果。有研究提出,FATmax 通常发生在 $\text{VO}_{2\text{max}}$ 在 39%—65%之间,当然,除运动强度的影响,运动能量消耗和底物代谢特征也与运动方式有密切关系,并根据不同的性别,身体成分,训练状态,最大摄氧量和参与者的饮食不同而不同^[20,37—40]。此外,近年还有一些以肥胖的青少年、中年代谢综合征人群以及肥胖男性为受试者进行 FATmax 的测定和多方面的研究^[40—43],都反复验证了 FATmax 的测试方案并使其日臻成熟。

2 FATmax 的测定

2001 年 Jeukendrup 与 Achten 提出了 FATmax 的概念^[19],Achten 在 2003 年报道了测量 FATmax 的方法^[37],并相继得到多位学者研究结果的支持^[44—45]。他们先在功率自行车或跑台上测出 $\text{VO}_{2\text{max}}$,再进行递增负荷强度运动实验,每次运动 6min 并且记录第 5—6min 气体交换量,进行脂肪代谢率的计算。Frayn^[46]提出了计算脂肪氧化量的公式: $1.67 \times \text{VO}_2 - 1.67 \times \text{VCO}_2 - 1.92 \times n$ (n 为尿液里的含氮量)。Achten 在研究中指出公式里 $1.92 \times n$ 这个常数因为值太小,并且监测分析过程不方便,可忽略不计。因此将公式简化为: $1.67 \times \text{VO}_2 - 1.67 \times \text{VCO}_2$ 。关于 FATmax 的判定是记录递增负荷每级的最后 2min 平均每 15s 的摄氧量与 CO_2 呼出量。带入公式计算脂肪氧化量,最大值即为 FATmax,如图 1 所示。

在实验中,FATmax 的测试往往要经过 2—4 个持续性递增负荷强度(每一负荷持续 3min 以上)的运动才会被准确判定^[47],这对实验设计及控制有一定的要求,Achten 通过比较性实验证实,每一负荷持续 3min 与持续 5min 测得的 FATmax 没有显著差异,推荐使用持续 3min 的负荷方法,虽然也有学者提出不同的观点,认为该方案每个负荷持续时间 3min 较

图1 FATmax rate 的判定



短,不能保证排除前一负荷对后一负荷的影响,而难以区别两个负荷等级对 FATmax 的影响^[39]。并指出该研究在统计学上的一些缺陷。但是从实验的简便性和应用性考虑,Achten 建立的每一负荷持续 3min 的持续性递增负荷的测试方案曾经被多数人认同^[47]。在以后,Meyer T 等^[49]继续研究和修正 FATmax 的实验方案,他建议,如采用功率自行车的起始负荷为 100W (女 50W),每 3min 增加 50W (女 25W) 至力竭(判断 $\text{VO}_{2\text{max}}$);进行 FATmax 测试一般可设计 5 级负荷,每一级的持续时间为 6min,开始负荷为在预实验中血乳酸第 1 次增加所对应的负荷强度,第 5 级负荷为呼吸商水平达到 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。目前,由于个体体力能力的差异,对于 FATmax 更具体的实验方案尚无权威性定论,但必须是通过 3—5 级,每级持续 3min 以上的持续性递增负荷获得 FATmax 已被认可。

比较多的研究显示,在运动过程中,FATmax 有集中在中、低强度上的现象。Venables 等^[39]以 300 例受试者进行递增负荷的 FATmax 实验,发现 FATmax 的范围 22%—77% $\text{VO}_{2\text{max}}$ 之间;而 Achten 等对有运动训练基础的运动员进行递增负荷的 FATmax 测定,发现在 FATmax 的范围是 55%—88% $\text{VO}_{2\text{max}}$ 之间^[47],Anderson 认为^[50],FATmax 强度即减脂运动区域在不同人群中存在个体差异,可能处于比较广泛的区域内。

关于 FATmax 实验仪器的选择,绝大多数研究是以功率自行车和跑台的递增负荷流程进行的,Achten^[21]在分别采用这两种仪器进行 FATmax 对比实验中发现,二者之间没有显著差异。Venable^[39]在使用功率自行车与跑台进行的对比实验结果也显示,受试者通过跑台测算的 FATmax 略高于功率自行车,但没有显著性差异。但 Thomas 等^[51]的研究有所不同,他曾经应用 4 种模式进行对比性试验,在强度为 65% HR_{max} ,持续 10min 的运动后,跑步机测出的脂肪代谢率要比功率自行车高约 21%;他认为不同负荷工具测试下 FATmax 的不同,主要因为不同的运动方式使机体受到的生理负荷不同。

3 FATmax运动干预肥胖症的应用

近年国外学者进行了相对较多的FATmax运动减肥实验,如Dumortier等^[41]以FATmax强度对28例肥胖者进行的减肥训练证实,FATmax运动可以使受试者体脂百分比显著性降低。Brandou等^[42]以FATmax相对应的心率作为靶心率,对14例肥胖的青少年进行减肥训练,结果发现,这一强度的训练能够提高受试者身体利用脂肪的能力,使体脂百分比下降,脂肪重量降低。Bogdanis等^[38]研究了超重的久坐人群走路训练的FATmax峰值强度,认为在FATmax强度下的走路可有效的改善受试者的健康水平。Mogensen等^[52]对12例肥胖并伴有2型糖尿病的受试者以FATmax强度进行10w的训练,结果发现FATmax训练显著地降低了TG和低密度脂蛋白,同时提高了高密度脂蛋白。还有研究显示FATmax受心肺功能的影响,如Astorino^[53]发现乳酸阈强度与FATmax相当接近,最大脂肪氧化能力与心肺功能呈现显著相关^[54]。

人的体能水平是否影响FATmax,一些研究者进行了相关性研究,并认为受试者体能状况不同,对其脂肪氧化能力有所影响^[55],主要表现在FATmax出现的时间或强度点上,如Bergman等^[46]比较7例受过训练与未受过训练男性受试者,结果显示有训练者FATmax出现在59% $\text{VO}_{2\text{max}}$,未受过训练的受试者出现在40% $\text{VO}_{2\text{max}}$ 左右。而优秀女子耐力运动员FATmax为75% $\text{VO}_{2\text{max}}$,显著高于正常人^[53]。对此,也有研究提出不同的观点,如Stisen等^[40]比较8例受过耐力性训练的女运动员与9例未受过训练的女性,发现两组间FATmax无显著差异,他认为,体能水平和训练程度与FATmax的关系尚需进一步探讨。

关于规律的训练对FATmax影响的研究也出现不同的观点,如Schrauwen等^[32]以6例健康中年男性进行连续12w 40% $\text{VO}_{2\text{max}}$,每周3次,每次50min的功率自行车训练,结果发现受试者试验后运动时整体的脂肪代谢量有增加的趋势;Poehlman^[57]以18例健康的老年人,进行连续8w、每周3次的功率自行车训练,结果进一步发现受试者的脂肪代谢总量有显著提升。但也有研究认为规律训练对脂肪代谢量没有显著影响,如Friedlander^[58]的实验是让10例健康青年男性进行持续10w,每周5次、每次1h的功率自行车训练,结果发现训练前后在相同强度测验下脂肪代谢量没有显著变化,提示FATmax不受训练的影响而改变。

还有一些有关FATmax的其他研究,如部分研究发现性别影响FATmax^[38-39]。在相同强度下运动,女性每公斤体重氧化的脂肪酸均大于男性,而男性每公斤体重氧化的碳水化合物大于女性^[59-60]。女性在运动中利用脂肪酸参与能量供应的能力更强,可能更适合从事耐力运动,这提示男性和女性在运动减肥时,采用相同运动方式下,机体能量消耗和底物动员的使用存在差异,这种差异可能与肌肉组织中脂质物

的含量有关,目前相关机制还需要进一步的研究。

还有一些针对糖尿病患者FATmax的研究,提示FATmax强度的训练有助于增加胰岛素敏感性,对肥胖的糖尿病患者尤为明显^[52],肥胖与胰岛素抵抗和血清FFA浓度有很大关系,被认为是导致2型糖尿病的主要因素,有人选取男性肥胖受试者进行FATmax强度的持续训练和 $\pm 20\%$ FATmax强度间歇训练的对比实验,结果显示,FATmax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 $\pm 20\%$ FATmax间歇训练组没有变化^[43],实验证实FATmax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。

4 小结

肥胖症高发以及干预效果不理想都是影响人类健康的重要难题,与其他防治方式比较起来,科学的体育活动不良反应明显低,并更有利于增强体质。理论上,在最大脂肪氧化率强度下运动可达到理想的减肥效果,但在实际中,迄今国内少见具体应用FATmax进行肥胖症干预的报道,因此,研究此强度下运动减肥的机制和不同人群肥胖者确切的FATmax强度区域,建立可实际操作推广运动模式,将非常有利于提高肥胖症干预的成功率。

参考文献

- [1] Canoy D. Coronary heart disease and body fat distribution [J]. Current Atherosclerosis Report, 2010, 12(2):125-133.
- [2] Bell LM, Curran JA, Byrne S, et al. High incidence of obesity co-morbidities in young children: a cross-sectional study [J]. Journal of Paediatrics and Child Health, 2011, 47(12): 911-917.
- [3] Divers J, Wagenknecht LE, Bowden DW, et al. Regional adipose tissue associations with calcified atherosclerotic plaque: African American-diabetes heart study[J]. Obesity (Silver Spring), 2010, 18(10):2004-2009.
- [4] 刘润,Brodie DA,周凤,等.肥胖对心肌梗死后患者峰值有氧工作能力的影响[J].中国康复医学杂志,2011,26(9):814-817.
- [5] Cameron AJ, Dunstan DW, Owen N, et al. Health and mortality consequences of abdominal obesity: evidence from the AusDiab study[J]. Medical Journal of Australia, 2009, 191(4): 202-208.
- [6] 王萍,江钟立,田智慧,等.肥胖康复流程与肥胖国际功能、残疾和健康分类核心组套的对比研究[J].中国康复医学杂志,2012,27(1):35-39.
- [7] D'Hondt E, Deforche B, De Bourdeaudhuij I, et al. Postural balance under normal and altered sensory conditions in normal-weight and overweight children[J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2011, 26(1):84-89.

- [8] Handrigan G, Hue O, Simoneau M, et al. Weight loss and muscular strength affect static balance control[J]. *Int J Obes (Lond)*, 2010, 34(5):936—942.
- [9] Kemmler W, von Stengel S, Engelke K, et al. Exercise, body composition, and functional ability: a randomized controlled trial[J]. *American Journal of Preventive Medicine*, 2010, 38(3):279—287.
- [10] Edwardson CL, Gorely T, Davies MJ, et al. Association of sedentary behaviour with metabolic syndrome: a meta-analysis[J]. *PLoS One*, 2012, 7(4):722—735.
- [11] 陈巍,李娟,陈庆合.运动促进骨骼肌功能康复改善代谢综合征的研究进展[J].*中国康复医学杂志*,2012,27(6):577—582.
- [12] Mestek ML, Westby CM, Van Guilder GP, et al. Regular aerobic exercise, without weight loss, improves endothelium-dependent vasodilation in overweight and obese adults [J]. *Obesity (Silver Spring)*, 2010, 18(8):1667—1669.
- [13] Schjerve IE, Tyldum GA, Tjønnå AE, et al. Both aerobic endurance and strength training programmes improve cardiovascular health in obese adults[J]. *Clinical Science (London)*, 2008, 115(9):283—293.
- [14] Brambilla P, Pozzobon G, Pietrobelli A. Physical activity as the main therapeutic tool for metabolic syndrome in childhood[J]. *International Journal of Obesity (London)*, 2011, 35(1):16—28.
- [15] Belli T, Ribeiro LF, Ackermann MA, et al. Effects of 12-week overground walking training at ventilatory threshold velocity in type 2 diabetic women[J]. *Diabetes Research and Clinical Practice*, 2011, 93(3):337—343.
- [16] Tan S, Yang C, Wang J. Physical training of 9- to 10-year-old children with obesity to lactate threshold intensity[J]. *Pediatric Exercise Science*, 2010, 22(3):477—485.
- [17] Bircher MS, Knechtle B, Müller G, Knecht H. Is the Highest Fat Oxidation Rate Coincident with the Anaerobic Threshold in Obese Women and Men[J]? *European Journal of Sport Science*, 2005, 5(2):79—87.
- [18] Martin WH 3rd, Klein S. Use of endogenous carbohydrate and fat as fuels during exercise[J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 1998, 57(1):49—54.
- [19] Jeukendrup AE, Achten J. Fatmax: A new concept to optimize Fat oxidation during exercise?[J]. *European Journal of Sport Science*, 2001,1(5):1—5.
- [20] Achten J, Jeukendrup AE. Optimizing fat oxidation through exercise and diet[J]. *Nutrition*, 2004, 20(7—8):716—727.
- [21] Achten J, Venables MC, Jeukendrup AE. Fat oxidation rates are higher during running compared with cycling over a wide range of intensities[J]. *Metabolism*, 2003, 52(6):747—752.
- [22] 张勇,李之俊.运动与脂肪动员研究进展[J].*中国运动医学杂志*, 2012,31(1):69—75.
- [23] Amati F, Dubé JJ, Alvarez-Carnero E, et al. Skeletal muscle triglycerides, diacylglycerols, and ceramides in insulin resistance: another paradox in endurance-trained athletes[J]? *Diabetes*, 2011, 60(10):2588—2597.
- [24] McNeilly AM, McClean C, Murphy M, et al. Exercise training and impaired glucose tolerance in obese humans [J]. *J Sports Sci*, 2012, 30(8):725—732.
- [25] Kessler HS, Sisson SB, Short KR. The potential for high-intensity interval training to reduce cardiometabolic disease risk[J]. *Sports Med*, 2012, 42(6):489—509.
- [26] Romijn JA, Coyle EF, Sidossis LS, et al. Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration[J]. *Am J Physiol*, 1993, 265(3 Pt 1):E380—391.
- [27] Vogelsang TW, Hanel B, Kristoffersen US, et al. Effect of eight weeks of endurance exercise training on right and left ventricular volume and mass in untrained obese subjects: a longitudinal MRI study[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2008, 18(3):354—359.
- [28] Figueroa A, Baynard T, Fernhall B, et al. Endurance training improves post-exercise cardiac autonomic modulation in obese women with and without type 2 diabetes[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2007, 100(4):437—444.
- [29] Sijie T,Wei LI, Jianxiong Wang. Effects of six months of combined aerobic and resistance training for elderly patients with a long history of type 2 diabetes [J]. *Journal of Sports Science and Medicine*, 2012, 11:495—501.
- [30] Sijie T, Hainai Y, Fengying Y, et al. High intensity interval exercise training in overweight young women[J]. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 2012, 52(3): 255—262.
- [31] Ogasawara J, Nomura S, Rahman N, et al. Hormone-sensitive lipase is critical mediators of acute exercise-induced regulation of lipolysis in rat adipocytes[J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 2010, 400(1):134—139.
- [32] Schrauwen P, van Aggel-Leijssen DP, Hul G, et al. The effect of a 3-month low-intensity endurance training program on fat oxidation and acetyl-CoA carboxylase-2 expression [J]. *Diabetes*, 2002, 51(7):2220—2226.
- [33] Pelsers MM, Stellingwerff T, van Loon LJ. The role of membrane fatty-acid transporters in regulating skeletal muscle substrate use during exercise[J]. *Sports Med*, 2008, 38(5):387—399.
- [34] Koppo K, Larrouy D, Marques MA, et al. Lipid mobilization in subcutaneous adipose tissue during exercise in lean and obese humans. Roles of insulin and natriuretic peptides [J]. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 2010, 299(2):E258—265.
- [35] 张勇.运动与能量消耗和底物代谢特征研究进展[J].*中国运动医学杂志*,2010,29(6):2158-2164.
- [36] van Aggel-Leijssen DP, Saris WH, Wagenmakers AJ, et al. Effect of exercise training at different intensities on fat metabolism of obese men[J]. *J Appl Physiol*, 2002, 92(3):

- 1300—1309.
- [37] Achten J, Jeukendrup AE. The effect of pre-exercise carbohydrate feedings on the intensity that elicits maximal fat oxidation[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2003, 21(12): 1017—1024.
- [38] Bogdanis GC, Vangelakoudi A, Maridaki M. Peak fat oxidation rate during walking in sedentary overweight men and women[J]. *Journal of Sports Science and Medicine*, 2008, (7):525—531.
- [39] Venables MC, Achten J, Jeukendrup AE. Determinations of fat oxidation during exercise in healthy men and women: a cross-sectional study[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2005, 98(1):160—167.
- [40] Stisen AB, Stougaard O, Langfort J, et al. Maximal fat oxidation rates in endurance trained and untrained women[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2006, 98(5):497—506.
- [41] Dumortier M, Brandou F, Perez-Martin A, et al. Low intensity endurance exercise targeted for lipid oxidation improves body composition and insulin sensitivity in patients with the metabolic syndrome[J]. *Diabetes Metabolism*, 2003, 29(5):509—518.
- [42] Brandou F, Dumortier M, Garandeau P, et al. Effects of a two-month rehabilitation program on substrate utilization during exercise in obese adolescents[J]. *Diabetes Metabolism*, 2003, 29(1):20—27.
- [43] Venables MC, Jeukendrup AE. Endurance training and obesity: effect on substrate metabolism and insulin sensitivity [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2008, 40(3):495—502.
- [44] Pérez-Martin A, Dumortier M, Raynaud E, et al. Balance of substrate oxidation during submaximal exercise in lean and obese people[J]. *Diabetes Metabolism*, 2001, 27(4 Pt 1): 466—474.
- [45] Nordby P, Saltin B, Helge JW, et al. Whole-body fat oxidation determined by graded exercise and indirect calorimetry: a role for muscle oxidative capacity[J]? *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sport*, 2006, 16(3): 209—214.
- [46] Frayn KN. Calculation of substrate oxidation rates in vivo from gaseous exchange[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1983, 55(2):628—634.
- [47] Achten J, Gleeson M, Jeukendrup AE. Determination of the exercise intensity that elicits maximal fat oxidation[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2002, 34(1): 92—97.
- [48] Meyer T, Gässler N, Kindermann W. Determination of “Fatmax” with 1h cycling protocols of constant load[J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2007, 32(2):249—256.
- [49] Meyer T, Folz C, Rosenberger F, et al. The reliability of Fatmax[J]. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 2009, 19(2):213—221.
- [50] Anderson O. Metabolism: You do have a 'fat-burning zone', but do you really want to go there to burn off fat [J]? *American Journal of Physiology*, 1997, 273:E768—E775.
- [51] Thomas TR, Feiock CW, Araujo J. Metabolic responses associated with four modes of prolonged exercise[J]. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 1989, 29(1):77—82.
- [52] Mogensen M, Vind BF, Højlund 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 Obes Metab*, 2009, 11(9):874—883.
- [53] Astorino TA. Is the ventilatory threshold coincident with maximal fat oxidation during submaximal exercise in women[J]? *J Sports Med Phys Fitness*, 2000, 40(3):209—216.
- [54] Dériaz O, Dumont M, Bergeron N, et al. Skeletal muscle low attenuation area and maximal fat oxidation rate during submaximal exercise in male obese individuals[J]. *International Journal of Obesity*, 2001, 25(11):1579—1584.
- [55] Coggan AR, Raguso CA, Gastaldelli A, et al. Fat metabolism during high-intensity exercise in endurance-trained and untrained men[J]. *Metabolism*, 2000, 49(1):122—128.
- [56] Bergman BC, Brooks GA. Respiratory gas-exchange ratios during graded exercise in fed and fasted trained and untrained men[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1999, 86(2): 479—487.
- [57] Poehlman ET, Gardner AW, Arciero PJ, et al. Effects of endurance training on total fat oxidation in elderly persons [J]. *Journal of Applied Physiology*, 1994, 76(6):2281—2287.
- [58] Friedlander AL, Casazza GA, Horning MA, et al. A. Endurance training increase fatty acid turnover, but not fat oxidation, in young Men [J]. *Journal of Applied Physiology*, 1999, 86(6): 2097—2105.
- [59] Knechtle B, Müller G, Willmann F, et al. Fat oxidation in men and women endurance athletes in running and cycling [J]. *Int J Sports Med*, 2004, 25(1):38—44.
- [60] Horton TJ, Pagliassotti MJ, Hobbs K, et al. Fuel metabolism in men and women during and after long-duration exercise[J]. *J Appl Physiol*, 1998, 85(5):1823—1832.