

# 运动性酮体的研究现状

徐倩

**摘要:** 酮体作为糖尿病的一个重要指标,在医学领域已经有了不少的研究,而在竞技体育中,有关运动性酮体的研究也在不断的发展。通过酮体的代谢特点、影响酮体代谢的因素、酮体对运动员的影响以及酮体的检测技术4个方面对运动性酮体做简单的介绍,给运动员的训练提供一定的参考。

**关键词:** 运动性酮体;运动后酮症;乙酰乙酸;β-羟丁酸;酮体比值

中图分类号: G804.3 文献标志码: A 文章编号: 1006-1207(2012)05-0054-04

## Research Status of Sporting Ketone Body

XU Qian

(Shanghai Institute of Sports Science, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** A lot of researches have been made on ketone body, an important index for diabetes mellitus. In competitive sports, researches on sporting ketone body are going on continuously. The article makes a brief introduction of sporting ketone body from the four aspects of the characteristics of ketone body metabolism, the factors affecting ketone body metabolism, the effects of ketone body on athletes and the testing technique for ketone body so as to provide reference for athletes' training.

**Key words:** sporting ketone body; ketosis after exercise; acetoacetic acid(ACAC); beta-hydroxybutyrate (3HB); arterial ketone body ratio(AKBR)

酮体是肝脏快速输出能源的一种形式,是脂肪分解代谢过程中主要在肝脏内产生的中间代谢产物,它包括丙酮、乙酰乙酸(ACAC)和β-羟丁酸(3HB),其中ACAC与3HB几乎占了酮体总量的98%,故酮体呈酸性。而JH Koeslag却认为<sup>[1]</sup>,如果没有特殊的说明,酮体一般只包括ACAC和3HB,因为丙酮只是ACAC简单的降解产物。正常人血液中的酮体浓度相对恒定,尿中也呈阴性;但在病理情况,或长时间运动、饥饿等状态下,就会使酮体的生成超过其被利用的限度,造成血液酮体水平明显升高,同时尿中酮体呈阳性。特别是在运动恢复阶段,大多数生理学、内分泌学和生化指标都会迅速恢复至正常水平,而血液中酮体的浓度却是不断上升,这种运动后血液和尿中酮体增多的现象在1958年就被Passmore和Johnson称为“运动性酮症”。

大多数学者认为,血液中酮体的浓度小于0.5 mmol/L为正常,大于1 mmol/L为高酮血症,大于3 mmol/L为酮症酸中毒<sup>[2]</sup>。

### 1 运动性酮体的代谢特点

酮体在肝脏中生成,其过程大致如图1所示。而由于肝脏内缺乏分解酮体的酶,所以酮体需要在如心肌、骨骼肌、肾脏、神经系统等肝外组织的线粒体内进行分解,其过程如图2。

酮体在运动结束后仍保持在较高的水平上,如Ene N. Sills等的研究中发现,受试狗在1~2 h的跑台运动后,出现明显的酮尿,几天后才逐渐恢复。华明在文献中也对运动性酮体做了研究<sup>[4]</sup>,发现经过14 d的低糖膳食后让受试者进行运动,其整个恢复期尿中丙酮的量始终高于对照日水

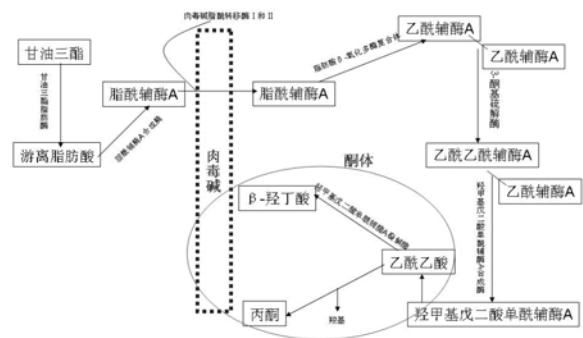


图1 酮体的生成  
Figure 1 Generation of Ketone Body

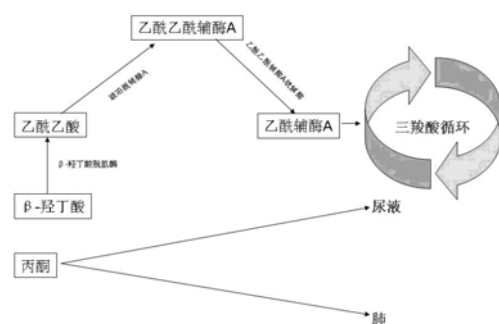


图2 酮体的分解  
Figure 2 Decomposition of Ketone Body

收稿日期: 2012-07-05

作者简介: 徐倩,女,实习研究员,主要研究方向:运动营养。

作者单位: 上海体育科学研究所,上海 200030



平,并持续了2~3 d。Koeslag, J.H.等<sup>[5]</sup>还观察到酮体的排出有两个峰值,运动后约2~3 h出现第一个峰,在5~6 h出现第二个峰,这种运动停止后几小时才达高峰的现象被称为“运动后酮症”。

有关“运动后酮症”的研究在较早的国外文献中就有报道<sup>[1, 6, 7]</sup>,而国内的研究较少,形式也主要以小鼠等动物实验为主。如张爱芳<sup>[8]</sup>等对长时间运动的小鼠进行了酮体代谢的研究,结果发现血酮体水平和脑酮体含量在运动后即刻升高,运动后2 h继续上升;肝酮体含量在运动后即刻增加,运动后2 h恢复到运动前安静水平;骨骼肌酮体含量在运动后即刻增加,在运动后2 h虽有下降,但仍未恢复到运动前安静时的水平,说明运动引起不同组织酮体含量发生改变,但变化趋势并不完全一致,与她的另一篇文章得出了相同的结果<sup>[9]</sup>。

华明在文献中指出<sup>[4]</sup>,即使运动后几小时中并未摄取食物,运动性酮病也可以自行消失。

## 2 影响酮体代谢的因素

已发现,运动后酮症发生在高蛋白、高脂肪和低糖饮食的受试者中,几乎没有或很小程度上发生于高糖饮食中<sup>[10]</sup>。从理论上也可以得到解释:由于葡萄糖经代谢生成的丙酮酸可以进一步生成草酰乙酸用于三羧酸循环,加速乙酰CoA的代谢,从而有助于加快酮体的分解。Askew E.W.等对小鼠进行了试验<sup>[11]</sup>,结果发现高脂、高糖和正常饮食下力竭运动对心、胃、骨骼肌和肝脏组织中酮体合成的关键酶——HMGCoA合成酶(羟甲基戊二酸单酰辅酶A)有影响,其活性在高脂饮食时最高,而在高糖饮食时最低,表明运动员高糖饮食进行训练时的酮体生成量要低于高脂饮食。该研究还指出,HMGCoA合成酶的活性不受训练或力竭运动的影响,说明训练中酮症产生的代谢控制更可能是提供给肝脏的脂肪酸而不是HMGCoA合成酶本身的活性。Koeslag等<sup>[12]</sup>在以低糖饮食基础上进行运动后出现高酮血症的人为研究对象,分别给予他们100 g葡萄糖、淀粉或丙氨酸,结果表明,摄入葡萄糖和丙氨酸抑制了运动后酮症,而淀粉对它的抑制作用最小;Carlin等<sup>[13]</sup>也观察了运动后补充葡萄糖或丙氨酸对血酮体的影响,得出了相同的结论。王馨塘等<sup>[9]</sup>对小鼠进行的研究发现,与力竭运动补糖组相比,力竭补水组运动后肝酮体更高,且有非常显著性的差异( $P < 0.01$ )。

另一方面,运动员服用的一些营养补剂对酮体代谢也有一定的影响。Auclair等<sup>[14]</sup>比较了大鼠运动前灌注葡萄糖、中链甘油三酯(MCT)和长链甘油三酯(LCT)对酮体代谢的影响,结果发现,灌注MCT和LCT后,运动后血酮水平升高明显,尤其摄入MCT后,血酮水平升高最多,而葡萄糖则抑制了酮体的生成;对于需要减控体重的运动员,L-肉碱经常用来帮助运动员加快脂肪的代谢,在Oyono-Enguelle S等<sup>[15]</sup>的研究中发现,长期服用L-肉碱,明显升高了安静时和运动时的血浆3HB水平,这与实际用尿十项仪器进行测试时出现酮体阳性的结果相符合。

除了服用L-肉碱来帮助运动员减控体重,部分运动员还会通过饥饿甚至禁食来达到体重下降的目的,相对于运动后酮症,饥饿酮症形成的主要因素是胰岛素不足,胰岛素的不足不仅促使储存的脂肪动员起来,导致脂肪组织分解速

率加快,而且还导致肝脏生酮酶系统活性提高以及外周酶系统利用削弱,从而导致饥饿时血酮的积聚。

生酮作用的个体因素较大,不同的人有不同的表现,而同一个人进行相同的运动,观察的结果也不尽相同。从文献上看<sup>[16]</sup>,运动强度、持续时间以及训练水平都可以影响运动后酮症的产生,Courtice和Douglas就发表声明<sup>[17]</sup>,产生酮尿的部分原因是运动期间的耗氧量,他们通过对运动员与非运动员的比较后发现,非运动员运动后血液中酮体的浓度比运动员高,从心率上分析可能与非运动员运动时耗氧量更大有关。王馨塘的<sup>[9]</sup>研究中也指出,肝酮体、肌酮体及脑酮体的含量随运动时间的延长而增多。然而另一些研究却没有得到相同的结果,这可能是因为试验中未考虑到运动强度和持续时间是否足以明显降低血糖水平、受试者本身糖原的储存,以及环境、性别、年龄和外源性酮体等外界因素的影响。但大体上来说,长时间中等强度的运动比短时间大强度运动更易发生运动后酮症<sup>[7]</sup>。研究还发现,运动结束2 h后的血液酮体浓度和哈佛氏登阶测验的体能指数呈负相关( $r = -0.52, P < 0.05$ )。也有研究者表明<sup>[4]</sup>,运动性酮病的原因至少有一部分可归于运动后恢复期内血液中乙酰乙酸的清除减慢。

除了上述的饮食、补剂、关键酶、运动训练等因素对酮体的代谢有影响外,酮体本身就是其生成的重要调节物。酮体能够通过直接作用和促胰岛素分泌的间接作用,降低脂解速率和生酮速率。然而尽管酮体代谢的影响因素是多方面的,如何调节运动时酮体的代谢依旧存在许多的空白,我们对调控酮体利用速率的诸多因素目前仍然知之甚少。

## 3 酮体对运动员的影响

酮体可以在一切有线粒体的组织中被使用,例如肌肉和大脑。经过一系列的试验数据显示<sup>[18]</sup>,在酮症的环境下,每毫摩尔血酮体节约了10%的大脑皮层和小脑内葡萄糖的消耗。而糖原既可以为肌肉提供能量,也是三大供能物质中唯一一个能够营养大脑的营养素,所以酮体的产生可以节约糖原,且在一定程度上延缓运动员肌疲劳及脑疲劳的发生,在调节体内燃料平衡方面起着重要的作用<sup>[19]</sup>。

对于减控体重的运动员,理论上的饮食限制措施很难获得较好的顺从性,所以虽然有很多争议,关于“生酮饮食”在运动员身上的研究却仍然不断。Antonio等对8名艺术体操运动员进行了生酮饮食的研究<sup>[20]</sup>,在饮食干预的3个月内,她们只摄入绿色蔬菜、橄榄油、鱼、肉,并给予她们天然提取物作为补充,其中碳水化合物的摄入量仅为20 g/d,我们称之为VLCKD(Very Low Carbohydrate Ketogenic Diet)饮食,并于干预前、后分别进行体重、体成分、力量方面的比较,结果发现VLCKD对力量方面没有明显的影响,只有在体重与体脂方面有显著的下降,30 d的VLCKD饮食使脂肪百分比与绝对值分别下降的同时保证了力量的绝对素质。相反,在一个8周的研究中<sup>[21]</sup>,虽然常规的54%~60%碳水化合物供能的限热饮食使男、女体重都有显著的下降,但体脂在女性参与者中的丢失却伴随着大量LBM(Lean Body Mass)的丢失,并且在体脂百分比上没有任何显著的下降。我们从Krieger等参与得出的一个回归曲线中发现<sup>[22]</sup>,低碳水化合物膳食在引起去脂体重丢失的同时,能使脂肪和



体重丢失得更多,所以相对高碳水化合物饮食来说,低碳水化合物饮食能使体脂百分比下降更多。一项2006年的研究中发现<sup>[23]</sup>,低碳水化合物、不限制总能量的饮食似乎和低脂饮食在高达1年的期间内对降低体重方面至少有相同的作用。而Hession等的研究<sup>[24]</sup>还得出低碳水化合物、高蛋白质的饮食在6个月内对减体重更有效的结论。

然而,在限制碳水化合物的期间,每消耗1g储备的糖原就会连带消耗3g水,所以生酮饮食不能长期进行,要持续进行控体重必须要有平衡的能量。我们对生酮饮食安全性的研究很少,大部分数据来自治疗如癫痫等疾病<sup>[25-27]</sup>。总的来说,生酮饮食产生的负面作用包括脱水、胃肠道反应、低血糖、缺乏肉碱、维生素和认知作用、高脂血症、降低嗜中性粒细胞、尿石症、视神经病变和骨质疏松等<sup>[28]</sup>,而长期酮症的一个标志性的副作用即是尿酸的增高,从而引起关节炎和肾脏并发症<sup>[29]</sup>。

研究数据表明<sup>[30]</sup>,在生酮饮食期间,增加肌肉质量是非常困难的,所以肌肉质量的保持,减少瘦体重的丢失可能是我们运动员的一个成功目标。而增加或保持瘦体重的最有效方法即是抗阻训练<sup>[31]</sup>,在减重期间进行抗阻训练能限制LBM的丢失<sup>[32-34]</sup>,与Pal T Jabekk等的研究得到了一致的结果<sup>[35]</sup>。

此外,生酮饮食对运动员生化指标的影响也各不相同,例如Paoli A的研究中发现<sup>[36]</sup>,106名接受研究的罗马注册运动员在经过低碳水化合物的生酮饮食之后,尿素氮、电解质、胆红素、尿酸、丙谷转氨酶、谷草转氨酶、谷酰转氨酶和血肌酐方面没有显著差异,但总胆固醇、低密度脂蛋白、甘油三酯和血糖方面有显著下降( $P < 0.0001$ ),高密度脂蛋白显著升高( $P < 0.0001$ )。

许多研究表明,酮体比值可用来评定人运动时肝脏能量代谢的变化<sup>[37]</sup>,特别是能较为精确地反映应急状态下的肝线粒体氧化还原状态<sup>[38-39]</sup>,从而间接反映运动中的氧化磷酸化耦联程度和氧利用率,在线粒体功能和有氧代谢的调解中扮演着重要的角色。有报道指出<sup>[40]</sup>,酮体比率(KBR)在0.7以上,表示肝线粒体功能正常,机体靠葡萄糖氧化供能,能源充足,各种代谢可正常进行;若降至0.4~0.7,表示线粒体功能受阻,机体靠脂肪酸 $\beta$ -氧化供能克服能量不足;若降至0.4以下,表示线粒体严重受损,氧化磷酸化过程停止,此时葡萄糖和脂肪酸均不能作为供能基质。然而在文献报道中,对酮体比值的概念还不是很清晰,如张爱芳<sup>[10]</sup>在文章中对酮体比值的定义为3HB/ACAC,而廖鹏等<sup>[41]</sup>在文章中所指的动脉血酮体比(arterial ketone body ratio, AKBR)却是ACAC/3HB。在临床上,酮体比值已较为广泛地运用入病理的评估<sup>[42-44]</sup>,而在竞技体育方面,尿十项中的酮体作为反映运动员机能状态的生化指标在运动队也逐渐有了广泛的应用,但酮体比值在运动医学中的应用却比较少,如廖鹏等<sup>[41]</sup>的研究发现,在受试运动员以恒定负荷进行运动后,其动脉血总酮体和3HB水平无显著变化,ACAC和AKBR较训练前显著升高,这可能是受试者有氧能力改善时AKBR水平提高,即同等运动负荷下肝线粒体氧化状态增强的原因。

#### 4 酮体的检测

对人体的血液及尿液进行酮体的测定,是检测脂肪氧化

供能状况和机体利用酮体能力的一项重要生化指标。目前,酮体的检测技术已涵盖了光学技术、电化学测量技术、酶固定化技术等。

运动队常用的尿十项中的酮体检测运用的即是“硝普盐法”。这是一种传统的检测酮体水平的半定量方法,运用亚硝基铁氰化钠与ACAC在碱性条件下反应生成紫色化合物的原理来检测酮体<sup>[45]</sup>。

此外,还有气象色谱法,它主要以呼出气体中的酮体含量进行检测,当丙酮的扩散达到平衡状态,呼出气体中的酮体含量与血液中的酮体含量成一定的比例关系,即对呼出气体中的酮体进行检测就能够比较精确地反映血液中的酮体水平。目前被大量研究和使用的是热解吸气相色谱法<sup>[46]</sup>。

能够对酮体中含量最高的3HB进行检测一直是相关领域的研究人员努力的方向,如今,比色法、分光光度法、3HB电化学生物传感器等方法都已经有了较好的运用。随着酮体检测技术的不断发展,相信我们对运动性酮体的研究会有更进一步的突破。

#### 参考文献:

- [1] JH Koeslag. Post-exercise Ketosis and the Hormone Response to Exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 14 (5):327-334
- [2] Mitchell GA, Kassovska-Bratinova S, Boukaftane Y, et al. (1995). Medical aspects of ketone body metabolism. *Clin Invest Med*, 18(3): 193-216.
- [3] Ene N, Sills, Frank J. Cer. (1983). Responses to continuous and intermittent exercise in healthy and insulin-dependent diabetic children. *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 15(6):450-454.
- [4] 华明. 运动性酮病[J]. 中国体育科技, 1984年Z1期: 70-73
- [5] Koeslag, J.H. (1982). Post-exercise ketosis and the hormone reponse to exercise. A review. *Medicineand Science in Sports and Exercise*, 14(5).327-334
- [6] Corbert JL, Johnson RH, Krebs HA, Walton JL, Williamson DH. (1969). The effect of exercise on blood ketone-body concentrations in athletes and untrained subjects. *J Physiol Apr*, 201(2): 83-84P
- [7] Koeslag JH. (1980). Daily blood ketone body concentrations after acute exercise. *S Afr Med J. Jan* 26:57(4):125-127
- [8] 张爱芳, 彭翠枝, 曹建民. 长时间运动对小鼠酮体代谢的影响[J]. 北京体育大学学报. 2005, 28(10): 1353-1356
- [9] 王馨塘, 张爱芳. 补糖对不同时间运动后小鼠酮体代谢的影响[J]. 中国体育科技, 2007, 43 (2): 72-97
- [10] 张爱芳. 运动性酮体研究进展[J]. 北京体育大学学报, 2004, 27 (6)
- [11] Askew E.W., et al.. (1975). Fatty Acid Ketone Body Metabolism in the Rat. Response to Diet and Exercise. *J Nutr*. 105. 1422-1432
- [12] Koeslag JH, et al. (1982) The effects of alanine, glucose and starch ingestion on the ketosis produced by exercise and by starvation. *J Physiol. Apr*:325.363-376
- [13] Carlin JI, et al. (1987). The effects of post-exercise glucose and alanine ingestion on plasma carnitine and ketosis in humans. *J Physiol*. 390.295-303.



- [14] E. Auclair, et al. (1988). Metabolic effects of glucose, medium chain triglyceride and long chain triglyceride feeding before prolonged exercise in rats. *Eur J Appl Physiol*, 57:126-131
- [15] Oyono-Enguelle S, et al. (1988). Prolonged submaximal exercise and L-carnitine in human. *Eur J Appl Physiol*, 58(1-2):53-61
- [16] Richard B, et al. (1998). Ketone bodies and ketosis in exercise. *Annals of sports Medicine*, 2(4)
- [17] Courtice.F.C. and C.G. Douglas. (1936). The effects of prolonged muscular exercise on the metabolism. *Proc. R. Soc. Lond. [Biol.]*119:381-439
- [18] Joseph C. LaManna, Michelle Puchowicz, Bernadette Erokwu, et al. (2009). Ketones Suppress Brain Glucose Consumption. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 645(301-306)
- [19] 解孝义, 等. 尿酮体测定的一种新方法[J]. 哈尔滨体育学院学报, 1994 (4)
- [20] Antonio Paoli, Keith Grimaldi, Dominic D'Agostino, et al. (2012). Ketogenic diet does not affect strength performance in elite artistic gymnasts. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 9:34
- [21] Volek JS, Gomez AL, Love DM, Weyers AM, Hesslink R Jr, Wise JA, Kraemer WJ (2002). Effects of an 8-week weight-loss program on cardiovascular disease risk factors and regional body composition. *Eur J Clin Nutr*, 56:585-592
- [22] Krieger JW, Sitren HS, Daniels MJ, Langkamp "CHenken B. (2006). Effects of variation in protein and carbohydrate intake on body mass and composition during energy restriction: a meta-regression 1. *Am J Clin Nutr*, 83:260-274
- [23] Nordmann AJ, Nordann A, Briel M, Keller U, Yancy WS Jr, Brehn BJ, Bucher HC. (2006). Effect of low-carbohydrate vs low-fat diets on weight loss and cardiovascular risk factors: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Arch Inter Med*, 166:285-293
- [24] Hession M, Rolland C, Kulkarni U, Wise A, Broom J. (2009). Systematic review of randomized controlled trials of low-carbohydrate vs. low-fat/low-calorie diets in the management of obesity and its comorbidities. *Obes Rev*, 10:36-50
- [25] 徐祥文, 刘志强, 张磊. 生酮饮食对在体兔脊髓缺血再灌注损伤的影响[J]. 中国医药导报, 2012, (11): 31-32
- [26] 张月华. 生酮饮食治疗儿童难治性癫痫[J]. 中国实用儿科杂志, 2011 (7): 494-497
- [27] 操德智, 胡雁, 朱艳伟, 等. 促皮质素与生酮饮食治疗新生儿痉挛症的随即对照研究[J]. 实用儿科临床研究, 2011, (18): 1442-1445
- [28] Bellisle F. (2009). Infrequently asked questions about the Mediterranean diet. *Public Health Nutr*, 12:1644-1647
- [29] Chahoud G, Aude YW, Mehta JL. (2004). Dietary recommendations in the prevention and treatment of coronary heart disease: do we have the ideal diet yet? *Am J Cardiol*, 94:1260-1267
- [30] Antonio Paoli, Keith Grimaldi, Dominic D'Agostino, et al. (2012). Ketogenic diet does not affect strength performance in elite artistic gymnasts. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 9:34
- [31] Zatsiorsky VM. (2006). Science and practice of strength training Champaign, IL: Human Kinetics
- [32] Donnelly JE, Blair SN, Jakicic JM, M anore MM, Rankin JW, Smith BK. (2009). American College of Sports Medicine Position Stand. Appropriate physical activity intervention strategies for weight loss and prevention of weight regain for adults. *Med Sci Sports Exerc*, 41:459-471.
- [33] Ross R, Pedwell H, Rissanen J. (1995). Response of total and regional lean tissue and skeletal muscle to a program of energy restriction and resistance exercise. *Int J Obes Relat Metab Disord*, 19:781-787.
- [34] Ballor DL, Katch VL, Becque MD, Marks CR. (1988). Resistance weight training during caloric restriction enhances lean body weight maintenance. *Am J Clin Nutr*, 47:19-25.
- [35] Pal T Jabekk, Ingvild A Moe, Helge D Meen et al. (2010). Resistance training in overweight women on a ketogenic diet conserved lean body mass while reducing body weight. *Nutrition & Metabolism*, 7:17
- [36] Paoli A, Cenci L, Grimaldi KA. (2011). Effect of ketogenic Mediterranean diet with phytoextracts and low carbohydrates/high-protein meals on weight, cardiovascular risk factors body composition and diet compliance in Italian council employees. *Nutrition Journal*, 10:112
- [37] Wahren, J., Hagenfeldt, L. (1980). Free fatty acid and ketone body metabolism during exercise in diabetes. *Acta Paediatrica. Suppl*, 283:39-43
- [38] Ozawa K, Chance B, Tanaka A, et al. (1992). Linear correlation between acetoacetate/  $\beta$ -hydroxybutyrate in arterial blood and oxidized flavoprotein reduced pyridine nucleotide in freeze-trapped human liver tissue. *Biochim Biophys Acta*, 1138(4): 350-352
- [39] Ozawa K. (1994). Living related donor liver transplantation: assessment of graft viability based on the redox theory. *Basle: Karger*, 12-29
- [40] 吴红斌, 严律南. 动脉血酮体比率的测定方法[J]. 普外基础与临床, 1994, 1 (2): 117-118
- [41] 廖鹏, 郑念军, 廖越, 等. 耐力训练对青少年运动员最大摄氧量和动脉血酮体比的影响[J]. 中国运动医学杂志, 2006: 25 (1)
- [42] 莫利求, 黄文起. 动脉血酮体比值测定在肝移植术中的研究进展[J]. 国外医学: 麻醉学与复苏分册, 1998 (5): 267-269
- [43] 聂发传, 毕敏. 前列腺素 E1 控制性降压时肝脏不全病人动脉血酮体比值变化[J]. 第三军医大学学报, 1997, (5): 466-467
- [44] 董家鸿, 孙文兵等. 胆原性脓毒症时动脉血酮体比值与肝细胞能量状态的关系[J]. 第三军医大学学报, 1995, (6): 495-498
- [45] Robert R S U.S. Patent, 2990253, 1961
- [46] Kohl, Helmut U.S. Patent, 4405721, 1983
- [47] 陈湘莹, 陈卫, 许佳章. 工作场所空气中丙酮的热解吸气象色谱测定方法[J]. 中国卫生检验杂志, 2002, 12 (4): 429-430