

无氧能力检测方法的信效度研究

李 钊

(清华大学 体育部, 北京 100084)

摘 要: 无氧能力在竞技训练与比赛过程中具有重要意义, 但对其研究仍然薄弱、局限性强。鉴于此, 归纳与梳理了最大氧亏积累测试、最大血乳酸水平测试、运动后过量氧耗测试、临界功率测试与总效率测试等无氧能力评价方法的原理、可靠性及有效性。认为, 最大氧亏积累测试、最大血乳酸测试和临界功率测试可以作为定性评价运动员无氧能力的有效方法; 运动后过量氧耗受众多因素影响, 在评价无氧能力方面存在较大误差; 在对运动员无氧能力进行调控时, 总效率测试能够表达运动过程中有氧与无氧能量的分配问题, 同时该方法考虑了长时间运动过程中能量利用率降低的问题, 对于进一步理解疲劳与评价运动节奏是有利的; 由于存在个体差异及项目专项性特征, 应根据实际情况进行评价, 五种测试方法在测试过程中不能交叉使用。

关键词: 无氧能力检测; 最大氧亏积累; 最大血乳酸水平; 运动后过量氧耗; 临界功率; 总效率; 信度; 效度

中图分类号: G804

文献标志码: A

文章编号: 1008-3596 (2016) 05-0051-08

人体运动能力是身体各个系统机能协调活动的集中体现。根据运动过程中能源物质分解供能的方式及其比例可以分为有氧运动和无氧运动。无氧能力 (Anaerobic work Capacity) 是指运动中的人体通过无氧代谢途径提供能量进行运动的能力。其供能系统分别由非乳酸能 (ATP-CP 分解供能) 和乳酸能 (糖的无氧酵解供能) 两部分组成。在短跑、投掷、跳跃、短道速滑、击剑以及足球等诸多运动项目中, 无氧能力占主导地位, 决定运动员的比赛成绩。Foster C 等人^[1]研究发现, 在 1 500 m 自行车比赛中, 无氧供能比例达到了 50% 左右; Spencer 和 Gastin^[2]在 200 m、400 m、800 m 和 1 500 m 的比赛项目研究中发现, 无氧供能比例分别达到 71%、57%、34% 和 16%。同时, 在长距离运动项目比赛的后程冲刺阶段, 无氧能力是比赛制胜的重要保障。

与有氧能力检测方法相比, 无氧能力检测方法在运动训练实践中还面临着诸多困境。在方法学层面, 无氧能力检测方法在较准确确定非乳酸

能和乳酸能供能比例问题上仍未得到广泛认同; 在操作层面, 不存在针对某一专项所进行的无氧能力的检测方法, 测试结果存在较大误差; 在基础研究层面, 体适能与健康研究者更倾向于使用有氧能力测试方法评价身体机能与健康状态, 测定功率输出时, 优先选择亚强度以及平均功率而非最大功率作为评价指标。无氧能力的测试方法虽然在国内外文献资料中出现较多, 但是到目前为止还并不存在一种方法既可以作为无氧能力评价的科学指示器, 也可以解决目前存在的诸多问题。

基于无氧能力在各个运动项目制胜中体现出的重要性, 以及各测试方法在科学性、项目针对性、研究基础方面所呈现的特点, 本文从提出背景、测试原理与方法、可靠性及使用效度等方面对各种方法进行纵向梳理与横向对比。

1 无氧能力检测指标与方法

依据测试性质划分, 无氧能力检测可以分为

收稿日期: 2016-04-27

作者简介: 李 钊 (1987—), 男, 山东淄博人, 在读博士, 助教, 研究方向为运动训练理论与方法。

生理学检测和动力学检测。根据测试的内容,无氧能力检测可分为无氧能力检测和无氧功率检测两部分。无氧能力从宏观的角度强调运动员在无氧代谢系统供能下所表现出来的运动能力或运动成绩,从微观角度指人体肌肉通过无氧供能代谢系统能够提供能量的总量或完成无氧功的总量^[3]。其检测多是通过生理指标对机体所完成的总功进行测量。无氧功率是指机体在最短时间内,在无氧条件下发挥最大力量和速度的能力^[4],多从动力学角度,通过测试与计算数据对机体在无氧条件下完成的功率进行评价。具体测试方法与指标如图1所示。本文所谈的无氧能力检测指的是生理学方面的检测。

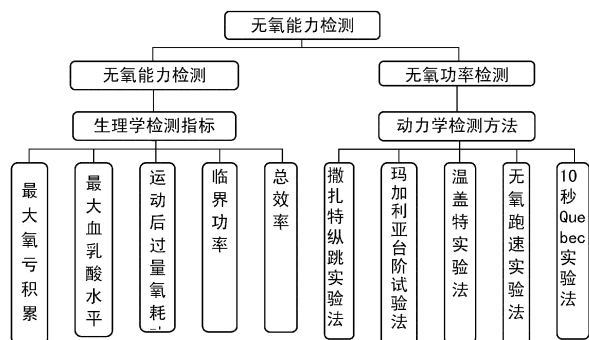


图1 无氧能力检测指标与方法

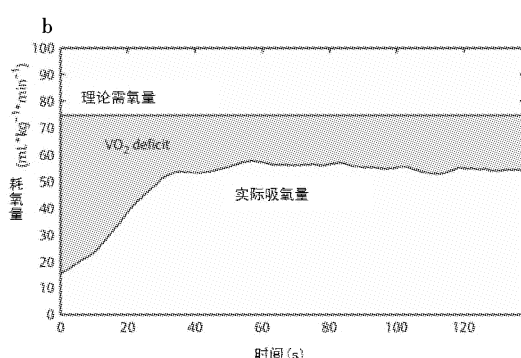
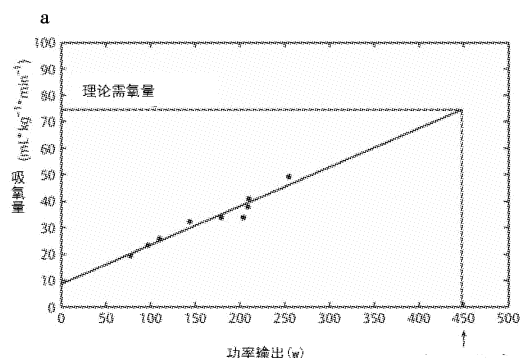


图2 MAOD 检测方法线性关系

2.1.1 MAOD 测试的可靠性

MAOD 测试方法评价无氧能力主要基于以下两个假设：①最大强度运动的需氧量可以通过线性关系外推亚最大强度与耗氧量的关系求得；②恒定运动强度下所需要的氧量是一个常数。然而，根据 Hansen 等人^[6]的研究结果，亚最大强

2 无氧能力检测方法与原理

2.1 最大氧亏积累 (MAOD) 检测

1920 年 Krogh 和 Lindhard 发表文章《从工作到休息转变时呼吸的改变》^[5]提出了“氧债”的概念；Hermansen 于 1969 年重新界定“氧债”；1988 年，Medbø 等人研究表明最大氧亏积累是无氧能力测试的定量表达方法。此后经过 20 多年的发展，最大氧亏积累测试已经成为无氧能力评价的黄金标准。最大氧亏积累 (Maximal accumulated oxygen deficit, MAOD) 是指人体从事极限强度运动时（一般持续 2—3 min），完成该项目的理论需氧量与实际耗氧量之差^[4]。

MAOD 测试方法以个人跑台速度（亚极量强度）或者功率输出与摄氧量的关系为基础，建立线性方程。通过外推法，在超极限强度负荷下求得该负荷的理论需氧量，在此期间连续收集呼出的气体，以求得在此过程中实际消耗的氧量。最大氧亏积累可以通过极限负荷理论上需要的氧量减去实际需要的氧量求得，如图 2 所示。按照 Medbø 等人的研究，亚极量强度的选取在 35%—100% VO_{2max} ，维持 20 次，每次持续 10 min，测试稳态耗氧量取自运动最后 1—2 min；超极限强度的持续时间为 2—3 min。

度活动肌肉的效率高于最大强度功率输出时的活动肌肉效率，此研究表明根据假设①所测的结果要小于实际需氧量与氧亏积累值。在 Bangsbo^[7]的一项研究中，令受试者在 5% 坡度的跑步机上做 6 min 不同跑速运动，结果发现在亚最大强度条件下，较快速度所产生的吸氧量比较慢速度的

回归曲线预测值大,表明吸氧量并不是随着运动速度的增加而成线性的单调递增。同时研究关于定量运动人体活动肌肉所需要的能量是在不断变化的,并非假设②中所提及的需氧量恒定不变。

2.1.2 MAOD 测试的有效性

目前关于 MAOD 测试无氧能力的方法有效性存在较大争议,主要集中在运动肌肉数量与 MAOD 大小的关系和肌肉运动无氧产生 ATP 与 MAOD 的关系上。Bangsbo 等人^[7]让无训练经历的男性测试者进行恒定的超极限强度单腿伸膝运动,在此过程中只有股四头肌被动员释放无氧能量,通过肌肉活检测定了 ATP、磷酸肌酸含量、肌苷-磷酸、乳酸浓度的变化。结果表明 MAOD 与极限强度单腿无氧代谢供能高度相关,以此证明了对单一肌群运动而言,MAOD 可以作为无氧能力检测的定量方法。Green^[8]以有良好训练经历的男性运动员作为研究对象,研究了 MAOD、无氧代谢产生的 ATP 以及肌肉无氧潜力测试三者的关系,从股侧肌群取样分析了 ATP、磷酸肌酸、乳酸浓度、ADP 的含量,通过公式 1 计算了运动前后无氧代谢产生的 ATP 总量。

$$\text{anATPm} = 1.5\Delta [La^-] + \Delta [PCr] + (2\Delta [ATP] - \Delta [ADP]) \quad \text{公式 1}$$

在受试对象的测试中没有发现无氧代谢产生的 ATP 与 MAOD 存在相关性,但发现无氧代谢产生的 ATP 与相关酶活动存在高度相关,由此断定测定肌肉无氧代谢产生 ATP 总量的方法是有效的。然而 Green 并不赞同 Medbø 等人的测试方法(公式 2),因为 Medbø 等人认为在测定运动肌无氧代谢产生的 ATP 与全身所产生的 ATP 存在较高的相关性。

$$\text{anATPm} = 1.5\Delta [La^-] + \Delta [PCr] + [ATP] \quad \text{公式 2}$$

Green 和 Medbø 等人的研究存在不同之处,所以研究结果存在差异。Green 所用公式 1 为公式 2 的扩展版,但是两个公式都没有计算释放入血的乳酸量。根据 Bangsbo 的研究,释放入血的乳酸所产生的 ATP 占总 ATP 的 5%—38%,所以所测结果小于实际产生的 ATP。此外,两者的研究并没有明确指出参加运动肌肉的质量占身体总质量的百分比。Medbø 研究认为当活动肌肉占身体质量的 25% 时,活动肌肉能量(ATP)释放数据才与 MAOD 存在高度相关性,

他用此数据分析与探讨了跑步运动员 MAOD 的代谢部分。但是估算的活动肌肉质量没有经过直接测试,也没有考虑性别、体脂上的差异。

在运动训练实践领域,MAOD 作为项目测试方法在准确测量无氧能力时仍存在较多问题。例如,Green 和 Wenger 认为最大氧亏积累与 400—1 000 m 的成绩存在低度相关($r=0.05-0.21$),项目的优异成绩部分取决于无氧能力,运动技术被认为是决定性的因素。然而 Scott 等人研究了短跑运动员的 MAOD 和 Wingate 无氧功率值,发现 300 m 成绩与 MAOD 相关性为 -0.76 ($p \leq 0.01$),而与 Wingate 最大功率相关性为 -0.54 ,表明 MAOD 在无氧能力检测上有较好的效度^[9]。

2.2 最大血乳酸水平检测

通常在在体的情况下,血乳酸分解成 H^+ 和乳酸根负离子,乳酸根离子与血液中的 K^+ 、 Na^+ 形成盐存在于血液中。依据血乳酸浓度检测原理与方法的不同,可以分为化学分光光度法、紫外分光酶法、荧光酶法、气相酶法以及酶电极法。目前酶电极法的血乳酸自动分析仪是生理学基础和应用研究的主要检测工具。最大血乳酸水平作为一种评价无氧能力的方法在早期的研究中被用于锻炼和运动生理学中,然而在使用上仍然存在争议。该方法的运用主要基于以下两方面的理论支持:①最大血乳酸水平与依靠无氧供能的短距离项目运动成绩存在高度相关性;②短跑运动员的最大血乳酸值明显高于耐力运动员和无训练者。

2.2.1 最大血乳酸水平测试的可靠性

最大血乳酸水平检测结果的可靠性首先表现在取样的位置上,Margaria 等人^[10]的研究表明,10 min 大强度运动的血乳酸水平在股部与上肢静脉中所测值高度相似,然而也有研究表明股部的血乳酸水平是头部和肘前静脉的两倍,同时指尖毛细血管处的血乳酸要比前臂静脉高 8%,但在指尖处可以测到与耳垂处的相似值。此种结果可能是由测试方案与活动肌肉的选择及个体差异所致,所以在进行测试时要选择不同测试对象的同一位置选样。其次表现在测试与取样的时间上,最大血乳酸水平测试结果容易受到前一次运动形成的肝糖原水平及缓冲对的影响,所以测试之前要确定机体是否从上次的运动中恢复过来(恢复时间一般为 24—48 h)。血乳酸浓度主要

由肌乳酸的释放以及血乳酸的再利用决定,在大强度运动过程中,肌乳酸的生成速率较快,但其扩散速率较慢,众多研究也已经表明,肌肉乳酸的生成速率是其扩散速率的三倍(Bangsbo, et al. 1990; Juel, et al. 1990; Hultman 1986)。虽然肌肉乳酸的扩散过程可以延迟酸中毒,但是多数乳酸仍停留在肌肉组织中,根据 Sahlin 和 Sjoholm 的研究^[11],30 s 急速自行车运动后,运动员肌肉血乳酸值达到 28—35 mmol/L,然而血乳酸的浓度仅仅为 8—12 mmol/L;同时随着运动强度的进一步增加,肌乳酸浓度增加,但扩散速率下降,导致血乳酸浓度与肌乳酸浓度失去线性关系。Maglischo 等人^[12]也研究认为,在 3 min 极限强度运动后,当肌乳酸 < 5 mmol/kg 时,肌乳酸与血乳酸呈线性增加;当肌乳酸为 10 mmol/kg 时,血乳酸为 4.3 mmol/L,肌乳酸继续增加时,血乳酸降低。因此血乳酸浓度并不能真正反映肌乳酸的生成。

2.2.2 最大血乳酸测试的有效性

尽管 1985 年 Berg & Keul^[13]、1990 年 Lacour 等人^[14]、1987 年 Cheetham & Williams^[15]以及 1977 年 Komi 等人^[16]研究认为短跑运动员的运动成绩、400 m 跑成绩、800 m 跑成绩、跑台 30—60 s 成绩以及 Wingate 最大无氧功率与最大血乳酸之间存在高度相关性,Komi 还对 II 型肌纤维与最大血乳酸相关性 ($r=0.24$) 进行了研究,表明最大血乳酸可以作为评定运动员与非运动员无氧能力的定性与定量方法。然而依然有很多研究认为血乳酸浓度并不能真正作为无氧能力测试的定量方法,Graham^[17]认为乳酸在运动后处于从肌肉向血液扩散的过程,使得血乳酸浓度不断变化;Gastin 等人^[18]研究了全力 1 min 自行车运动所测得的血乳酸值高于 1.5—3.5 min 定量至疲劳运动的值;同一时间还有 Koziris 和 Montgomery^[19]关于 90 s 的全身运动与定量至疲劳运动的测试,结果显示两者输出功率相同但血乳酸存在较大差异,推测造成差异可能是由于运动强度与持续时间的关系。较有说服力的是 Bro-Rasmussen 等人^[20]的另外一项研究,通过对在 2 700 m 高度训练的滑雪运动员的研究表明,体现运动员无氧能力指标的肌肉缓冲对、氧债能力、跑台成绩有较大的提高,但是血乳酸减少 8%。其他研究也证明了训练强度的提高并没有导致在高强度运动中血乳酸的升高。

2.3 运动后过量氧耗检测

机体的摄氧量由能量代谢率决定,尽管运动结束后,多数肌肉已经停止活动,由于能量代谢率未恢复到运动前的水平,机体的摄氧量也不能立即恢复到运动前水平。这种运动后恢复期机体的耗氧量水平高于运动前(或安静状态)耗氧水平的现象称为运动后过量氧耗^[4],如图 3 所示。早在 20 世纪 20 年代,Hill、Meyerhof 和 Margaria 等人就将此种现象定义为氧债,传统氧债理论认为,剧烈运动时,由于机体所提供的能量满足不了运动的需要,此时机体要进行无氧代谢,产生乳酸形成氧债,运动结束后,机体仍保持较高的耗氧量水平,以氧化乳酸,偿还氧债。

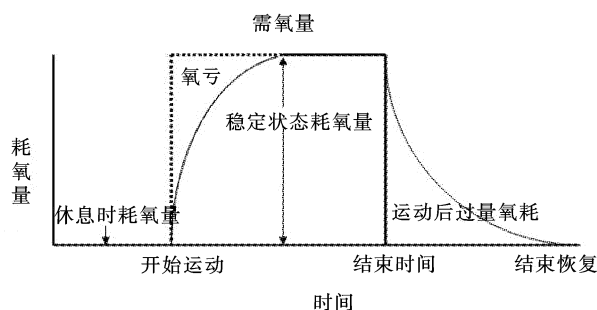


图3 运动及恢复期的氧气需求

运动后过量氧耗生成曲线常被用来划分为两个不同的部分:运动结束后的初期快速恢复部分和后续的慢速恢复部分。2002 年,Beneke^[21]在综合前人研究的基础上,提出运动后 3 min 为快速恢复部分与慢速恢复部分的临界点,利用氧债的快速部分可以计算无氧非乳酸部分的能量供应,其公式为:无氧非乳酸能量=运动后摄氧量的快速部分(ml)×能量当量(J/ml)。无氧乳酸部分能量通过运动中血乳酸的净增加量计算获得,无氧乳酸能量=运动中生成的血乳酸(mmol/L)×氧气—乳酸换算系数(ml/kg/mmol·l)×体重(kg)×能量当量(J/ml)。

自 20 世纪 80 年代以来,Brooks、Gasser 和 Bang 等人认为运动后过量氧耗并不是完全用于偿还运动中所欠下的氧债,特提出了三点理论依据来质疑传统氧债观点:①短时间大强度力竭运动之后恢复早期,血乳酸持续升高,此时耗氧量已恢复到安静水平;②从事长时间力竭性运动过程中血乳酸已经达到峰值,并随着运动的继续逐渐降低到安静水平,运动恢复期耗氧量仍高于安静水平;③ McArdle 症患者由于缺乏磷酸化

酶运动过程不能产生乳酸, 但运动后仍出现运动后过量氧耗现象。以上三点理论依据表明运动后过量氧耗与乳酸不存在线性关系。此外, 体温的升高、肾上腺素和去甲肾上腺素以及钙离子等的恢复都需要消耗一定量的氧气。所以单纯用运动后过量氧耗来评价无氧能力并不可靠。

运动后过量氧耗并不完全用来偿还运动中所欠下的氧量, 测试方法的理论基础与最大氧亏积累相同, 但结果由众多因素导致, 不能作为测试与评价无氧能力的科学方法手段。

2.4 临界功率 (CP) 检测

定量运动负荷的持续时间与运动负荷的强度有关。1965 年, Monod 和 Scherrer 最先提出了临界功率 (CP), 认为当以不同强度运动负荷进行实验时, 定量功率输出与疲劳时间存在线性关系, CP 强度是维持单一肌肉或肌肉群持续长时间不疲劳运动的强度^[22]。实验方法通过对受试者进行 4 次以上的定量功率输出测试至疲劳, 测试强度选择递增范围 75%—105%, 每次测试保证运动员完全恢复。此种测试方法较为简单, 对运动员没有创伤性。众多的研究也表明两参数模型所代表的 P-t 关系可以较好地描述无氧能力 (Green, 1995)。P-t 关系的曲线以及 W-t 的直线关系如图 5 所示, W' 代表无氧作功能力, CP×t 代表有氧作功能力。

2.4.1 CP 测试的可靠性

根据 Hill^[23] 的研究, CP 测试理论主要基于

以下四点重要的假设: ①从能量代谢角度分析, 人体三大供能系统分别为磷酸原、糖酵解和氧化能。依据供能过程是否有氧的参与可以分为有氧供能与无氧供能系统。②有氧供能是无限的, 但供能比例是有限的; 限制参数即为临界功率 CP。因为有氧供能过程中需要能源底物参与, 这些能源底物并不是无限制的, 所以有氧供能无限性的生理表达是不准确的, 只是建立在数学模型的可能性。③无氧供能比例是不受限制的, 但无氧能力受限于无氧做功能力。无氧供能同样需要能源底物参与供能, 所以无氧能力受到限制是合理的。④当疲劳发生时, 无氧能量被耗竭, 同时运动终止。众所周知, 当人体发生疲劳时, 体内仍然有大量的能源物质可以参与供能, 无氧能量被耗竭是不太正确的表达方法, 依据此假设求出的无氧能力比实际无氧能力要低。理论上通过描述功率输出与时间的线性关系, 只需要测试两个指标参数 (P、t) 即可求出临界功率与无氧做功值; 实践中必须通过对受试者进行多次测试以减少测试误差, 例如测试次数, CP 实验测试过程要求受试者进行多次运动至疲劳, 间隔休息充分, 使受试者完全恢复才可进行下一次测试, 多数实验测试要求受试者次间隔休息时间为 30 min^[24], 然而多数研究表明机体疲劳恢复至少需要 24 h^[25-26]。如果在机体尚未完全恢复的情况下进行下一次测试, 累积的疲劳会缩短受试者达到疲劳的时间, 从而低估了无氧能力。

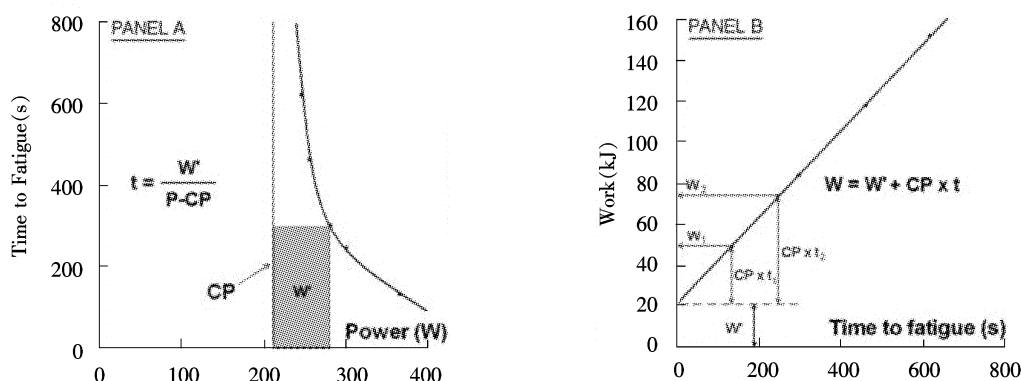


图4 P-t 与 W-t 两参数模型

2.4.2 CP 测试的有效性

为了评价 CP 测试无氧能力的有效性, 众多的研究通过 CP 与 Wingate 试验作比较, 如 Nebelsick-Gullett 等人^[27] 对 25 名女性受试者通

过 W-t 的线性关系评价了无氧能力, 认为无氧能力与 30 s 的 Wingate 试验结果存在高度相关 ($r=0.74$); Hill 等人用 CP 与最大氧亏积累作比较以此评价无氧能力, 研究发现 13 男与 13 女

酶运动过程不能产生乳酸, 但运动后仍出现运动后过量氧耗现象。以上三点理论依据表明运动后过量氧耗与乳酸不存在线性关系。此外, 体温的升高、肾上腺素和去甲肾上腺素以及钙离子等的恢复都需要消耗一定量的氧气。所以单纯用运动后过量氧耗来评价无氧能力并不可靠。

运动后过量氧耗并不完全用来偿还运动中所欠下的氧量, 测试方法的理论基础与最大氧亏积累相同, 但结果由众多因素导致, 不能作为测试与评价无氧能力的科学方法手段。

2.4 临界功率 (CP) 检测

定量运动负荷的持续时间与运动负荷的强度有关。1965 年, Monod 和 Scherrer 最先提出了临界功率 (CP), 认为当以不同强度运动负荷进行实验时, 定量功率输出与疲劳时间存在线性关系, CP 强度是维持单一肌肉或肌肉群持续长时间不疲劳运动的强度^[22]。实验方法通过对受试者进行 4 次以上的定量功率输出测试至疲劳, 测试强度选择递增范围 75%—105%, 每次测试保证运动员完全恢复。此种测试方法较为简单, 对运动员没有创伤性。众多的研究也表明两参数模型所代表的 P-t 关系可以较好地描述无氧能力 (Green, 1995)。P-t 关系的曲线以及 W-t 的直线关系如图 5 所示, W' 代表无氧作功能力, CP×t 代表有氧作功能力。

2.4.1 CP 测试的可靠性

根据 Hill^[23] 的研究, CP 测试理论主要基于

以下四点重要的假设: ①从能量代谢角度分析, 人体三大供能系统分别为磷酸原、糖酵解和氧化能。依据供能过程是否有氧的参与可以分为有氧供能与无氧供能系统。②有氧供能是无限的, 但供能比例是有限的; 限制参数即为临界功率 CP。因为有氧供能过程中需要能源底物参与, 这些能源底物并不是无限制的, 所以有氧供能无限性的生理表达是不准确的, 只是建立在数学模型的可能性。③无氧供能比例是不受限制的, 但无氧能力受限于无氧做功能力。无氧供能同样需要能源底物参与供能, 所以无氧能力受到限制是合理的。④当疲劳发生时, 无氧能量被耗竭, 同时运动终止。众所周知, 当人体发生疲劳时, 体内仍然有大量的能源物质可以参与供能, 无氧能量被耗竭是不太正确的表达方法, 依据此假设求出的无氧能力比实际无氧能力要低。理论上通过描述功率输出与时间的线性关系, 只需要测试两个指标参数 (P、t) 即可求出临界功率与无氧做功值; 实践中必须通过对受试者进行多次测试以减少测试误差, 例如测试次数, CP 实验测试过程要求受试者进行多次运动至疲劳, 间隔休息充分, 使受试者完全恢复才可进行下一次测试, 多数实验测试要求受试者次间隔休息时间为 30 min^[24], 然而多数研究表明机体疲劳恢复至少需要 24 h^[25-26]。如果在机体尚未完全恢复的情况下进行下一次测试, 累积的疲劳会缩短受试者达到疲劳的时间, 从而低估了无氧能力。

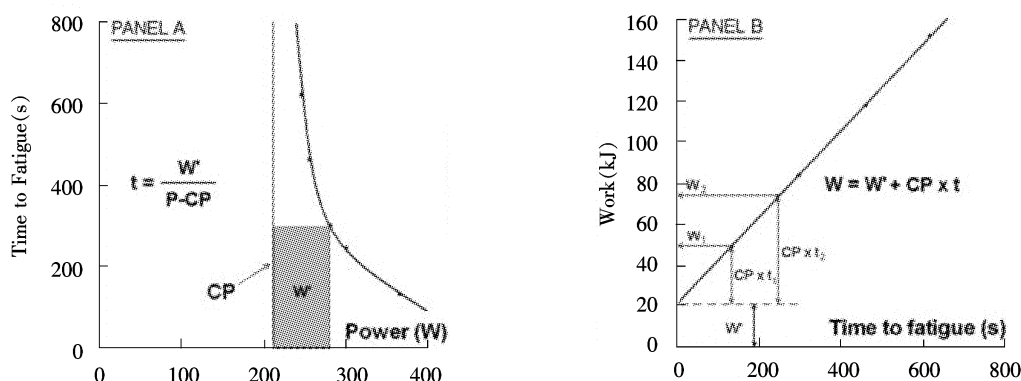


图4 P-t 与 W-t 两参数模型

2.4.2 CP 测试的有效性

为了评价 CP 测试无氧能力的有效性, 众多的研究通过 CP 与 Wingate 试验作比较, 如 Nebelsick-Gullett 等人^[27] 对 25 名女性受试者通

过 W-t 的线性关系评价了无氧能力, 认为无氧能力与 30 s 的 Wingate 试验结果存在高度相关 ($r=0.74$); Hill 等人用 CP 与最大氧亏积累作比较以此评价无氧能力, 研究发现 13 男与 13 女

的 W' 与 MAOD 无明显统计学差异, 并且具有较好的相关性 ($r=0.55-0.62$)。为此 Hill 赞成 W' 可以作为评价无氧能力的可靠参数^[28]。

2.5 总效率 (GE) 检测

通过总效率方法评价机体无氧能力是建立在通过计算有氧机械功率和总输出功率减去有氧功率求得无氧功率的理论基础之上的, 如图 5 所示^[29]。有氧机械功率可以通过代谢输入功率 PI 计算求得, 即 $PI \times GE$ 。GE 通常被定义为机械输出功率 (PO) 与代谢输入功率 (PI) 的比值, PI 可以通过 $PI = VO_2 \times ((4940 RER) + 16040)$ 公式计算求得, 在确定 GE 时, 需让受试者进行亚最大强度的稳态训练, 在公式中, RER 代表呼吸交换率 (≤ 1.0), 只要求得 PO、 VO_2 、RER、GE, 无氧机械功率便可以求得^[30-31]。

2.5.1 GE 测试的可靠性

国内外研究文献较少涉及 GE 作为评价无氧能力的指标方法, 同时缺少测定 GE 方法的标准。Koning 等人^[32]让有训练经历的受试者 ($n=28$) 进行了 1 min、3 min 和 6 min 的渐增负荷运动, 以此确定了测试 GE 所需要的运动时间及相对强度, 工作能力通过 GE 和最大功率输出 (PPO) 评价。与此相对应的研究为 9 名受试者, GE 的测试强度为 50%PPO, 测试前不进行渐增强度负荷。在 3-和 6-min 时, GE 值相似 ($19.7 \pm 2.8\%$ 和 $19.3 \pm 2.0\%$), 但在 1 min 时, 测试值偏高 ($21.1 \pm 2.7\%$)。在 50%PPO 以及通气阈强度以前, GE 随着强度增加而增大, 然后处于稳定状态。同时该研究表明工作能力与 GE 不存在相关性。

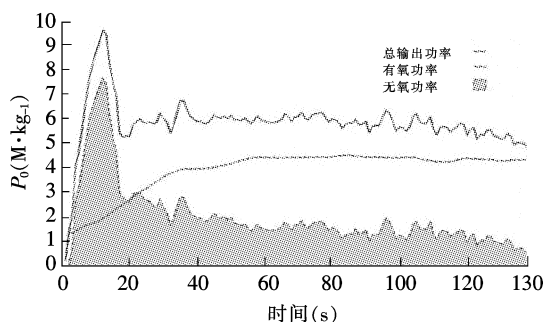


图5 总效率图

2.5.2 GE 测试的有效性

在训练过程中能够准确连续地反映训练效果是机能评定的特点之一。Hopker 等人^[33]研究表明, GE 在一个或者多个赛季后会得到提高, 主

要原因是运动员在训练量或者训练强度方面的提高, 所以 Simon^[34]的研究集中在了通过训练能否改变 GE 上。Hopker 等人让 29 名耐力运动员在 12 周内完成三次实验室测验, 测试了 GE 和最大摄氧量, 受试者被随机分成 A、B 两组, 在前 6 周中, A 组运动员每周进行两次专项高强度训练, B 组运动员未进行大强度训练; 在后 6 周, B 组运动进行高强度训练, A 组运动员不进行强度限制, 研究结果显示, 在前 6 周, A 组 GE 增加 ($+1.6 \pm 1.4\%$; $p < 0.01$), 而 B 组 GE 无显著改变 ($+0.1 \pm 0.7\%$; $p > 0.05$)。在后 6 周, B 组运动员 GE 增加明显 ($+1.4 \pm 0.8\%$; $p < 0.01$), A 组运动员 GE 改变不大 ($+0.4 \pm 0.4\%$; $p > 0.05$)。此研究表明高强度训练是改变 GE 的重要因素, 同时 Hopker 等人在 2009、2010 年的研究显示, 训练可增加 GE, 但是最大摄氧量不变, 这无疑为 GE 作为评价无氧能力方法指标提供了可靠的理论依据。

3 结论

应用具体测试方法准确反映运动员在实际运动项目中所表现出来的无氧能力是无氧能力检测的价值追求。在五种测试方法中, MAOD、最大血乳酸、CP 在测试可靠性与有效性上存在较大争议, 争议的焦点在于能否定量准确地表达无氧能力。但是 MAOD、最大血乳酸和 CP 可以作为定性评价运动员无氧能力的有效方法。运动后过量氧耗与 MAOD 作为测试方法在定义表达上存在一致性, 但实际测试过程中受诸多因素影响, 故不能作为评定无氧能力的科学手段。MAOD 与 W' 在测试无氧能力方面缺少在运动过程中有氧与无氧能量产生分配比例的相关信息, GE 测试方法却能够表达二者的分配问题, 这对于评价与监控周期性耐力项目全程速度节奏意义重大, GE 也是唯一考虑了长时间运动过程中能量利用率降低问题的方法, 对于进一步理解疲劳是有利的。GE 的耗时较少, 但要求运动员在高强度运动达到稳定状态且 $RER \leq 1.0$ 。在对运动员无氧能力进行调控时, MAOD 或 GE 可以作为测评方法, 但 W' 并不能真正反映无氧能力。由于运动员个体之间存在着差异性, 五种测试方法各自存在优缺点, 在使用过程中要结合运动项目的动作模式, 活动肌肉的质量、数量, 以及运动持续时间等变量因素来进行测评。各种

测试方法不能交叉使用。

参考文献:

- [1] Foster C, de Koning J J, Hettinga F, et al. Pattern of energy expenditure during simulated competition [J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2003, 35(5): 826-831.
- [2] Spencer M R, Gastin P B. Energy system contribution during 200-to 1500-m running in highlytrained athletes[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2001, 33(1): 157-162.
- [3] 王健. 运动生理学研究技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001: 40.
- [4] 王瑞元, 苏全生. 运动生理学[M]. 北京: 人民体育出版社, 2012.
- [5] Krogh A, Lindhard J. The changes in respiration at the transition from work to rest[J]. *Journal of Physiology*, 1920, 53(6): 431-439.
- [6] Hansen J E, Casaburi R, Cooper D M, et al. Oxygen uptake as related to work rate increment during cycle ergometer exercise[J]. *European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology*, 1988, 57(2): 140-145.
- [7] Bangsbo J, Gollnick P D, Graham T E, et al. Anaerobic energy production and O₂ deficit-debt relationship during exhaustive exercise in humans[J]. *Journal of Physiology*, 1990, 422(1): 539-559.
- [8] Green S, Dawson B T, Goodman C, et al. Anaerobic ATP production and accumulated O₂ deficit in cyclists[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 1996, 28(3): 315-321.
- [9] Scott C B, Roby F B, Lohman T G, et al. The maximally accumulated oxygen deficit as an indicator of anaerobic capacity[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1991, 23(5): 618-624.
- [10] Margaria R, Oliva D, Di Prampero P E, et al. Energy utilization in intermittent exercise of supra-maximal intensity[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1969, 26(6): 752-756.
- [11] Sahlin K, Edström L, Sjöholm H, et al. Effects of lactic acid accumulation and ATP decrease on muscle tension and relaxation[J]. *American Journal of Physiology*, 1981, 240(3): 121-126.
- [12] Maglischo E W. Swimming fastest[M]. *Champaign Illinois: Human Kinetics*, 2003: 317-669.
- [13] Berg A, Keul J. Influence of maximum aerobic capacity and relative body weight on the lipoprotein profile in athletes[J]. *Atherosclerosis*, 1985, 55(2): 225-231.
- [14] Lacour J R, Bouvat E, Barthelemy J C. Post-competition blood lactate concentrations as indicators of anaerobic energy expenditure during 400-m and 800-m races[J]. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 1990, 61(3-4): 172-176.
- [15] Cheetham M E, Williams C. High intensity training and treadmill sprint performance[J]. *British journal of sports medicine*, 1987, 21(2): 14-17.
- [16] Komi P V, Rusko H, Vos J, et al. Anaerobic performance capacity in athletes[J]. *Acta physiologica scandinavica*, 1977, 100(1): 107-114.
- [17] Graham T E, Pedersen P K, Saltin B. Muscle and blood ammonia and lactate responses to prolonged exercise with hyperoxia[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1987, 63(4): 1457-1462.
- [18] Gastin P, Lawson D, Hargreaves M, et al. Variable resistance loadings in anaerobic power testing [J]. *International journal of sports medicine*, 1991, 12(6): 513-518.
- [19] Koziris L P, Montgomery D L. Blood lactate concentration following intermittent and continuous cycling tests of anaerobic capacity[J]. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 1991, 63(3-4): 273-277.
- [20] Mizuno M, Juel C, Bro-Rasmussen T, et al. Limb skeletal muscle adaptation in athletes after training at altitude[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1990, 68(2): 496-502.
- [21] Beneke R, Pollmann C H, Bleif I, et al. How anaerobic is the Wingate Anaerobic Test for humans [J]. *European journal of applied physiology*, 2002, 87(4-5): 388-392.
- [22] Smith J C, Dangelmaier B S, Hill D W. Critical power is related to cycling time trial performance [J]. *International journal of sports medicine*, 1999, 20(6): 374-378.
- [23] Hill D W. The critical power concept[J]. *Sports Med*, 1990, 16(4): 237-254.
- [24] Housh D J, Housh T J, Bauge S M. A methodological consideration for the determination of critical power and anaerobic work capacity[J]. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 1990, 61(4): 406-409.
- [25] Carnevale T J, Gaesser G A. Effects of pedaling speed on the power-duration relationship for high-intensity exercise [J]. *Medicine and Science in*

- Sports and Exercise, 1991, 23(2): 242-246.
- [26] Gaesser G A, Wilson L A. Effects of Continuous and Interval Training on the Parameters of the Power-Endurance Time Relationship for High-Intensity Exercise[J]. International Journal of Sport Medicine, 1988, 9(6): 417-421.
- [27] Nebelsick-Gullett L J, HOUSH T J, JOHNSON G O, et al. A comparison between methods of measuring anaerobic work capacity[J]. Ergonomics, 1988, 31(10): 1413-1419.
- [28] 王健, 洪峰. 无氧能力间接检测方法研究进展[J]. 中国体育科技, 1999, 35(6): 11-14.
- [29] Noordhof D A, Vink A M, de Koning J J, et al. Anaerobic Capacity: Effect of Computational Method[J]. International Journal of Sports Medicine, 2011, 32(6): 422-428.
- [30] Garby L, Astrup A. The relationship between the respiratory quotient and the energy equivalent of oxygen during simultaneous glucose and lipid oxidation and lipogenesis[J]. Acta Physiologica Scandinavica, 1987, 129(3): 443-444.
- [31] Schenau G J V I, Cavanagh P R. Power equations in endurance sports[J]. Journal of biomechanics, 1990, 23(9): 865-881.
- [32] Koning J J, Noordhof D A, Lucia A, et al. Factors Affecting Gross Efficiency in Cycling[J]. International Journal of Sports Medicine, 2012, 33(11): 880-885.
- [33] Hopker J, Coleman D, Passfield L. Changes in cycling efficiency during a competitive season[J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 2009, 41(4): 912-919.
- [34] Jobson S A, Hopker J G, Korff T. Gross efficiency and cycling performance: a brief review[J]. Journal of Science & Cycling, 2012, 1(1): 3-8.

On the Reliability and the Validity of Anaerobic Capacity Testing Methods

LI Zhao

(Department of Physical Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Anaerobic capacity has important significance in sports training and competition, but the theoretical study still has some weakness and limitations. In view of this, this article induces and combs evaluation principles, reliability and validity of anaerobic capacity evaluation, including maximum oxygen deficit accumulation test, maximum blood lactate test, excessive post-exercise oxygen consumption test, gross efficiency and critical power test. It is put forward that the maximum oxygen deficit accumulation test, the maximum blood lactate test and critical power test can be effective methods for the qualitative evaluation of anaerobic capacity of athletes; while excessive post-exercise oxygen consumption is affected by many factors, thus there is a big deviation in the evaluation of anaerobic capacity; when monitoring athletes' anaerobic capacity, the gross efficiency test is capable of expressing the distribution of anaerobic and aerobic energy in the exercise process, this method also takes energy efficiency deduction into account during the long course of exercise, so, this method is advantageous for further understanding fatigue and evaluation of exercise rhythm. Because there are individual differences and sport events features, it should be evaluated according to the actual situation, the five test methods can not be used interchangeably in the testing process.

Key words: anaerobic capacity test; maximum oxygen deficit accumulation; maximal accumulated blood lactate; excessive post-exercise oxygen consumption; critical power; gross efficiency; reliability; validity