

# 探索运动能力诊断的黄金准则：运动心肺功能测试

测评身体素质与心肺功能的理想工具

虽然早在几个世纪以前，研究人员就首次尝试分析人体呼吸气体交换，但其作为运动心肺功能测试（CPET）的常规应用最近才成为体育和运动心脏病学中临床和运动能力诊断的重要组成部分。作为评估心肺功能和肌肉功能的综合工具，它现已被认定为评估运动员和患者运动能力和医生为他们开运动处方时的黄金标准。除了在评估有氧和无氧能量代谢方面的价值无可比拟外，CPET还可提供各种心脏、肺和肌肉功能的临床参数，以精确展现运动期间的功能限制，并确定运动性呼吸困难的可能原因。因此，如果没有CPET设备，现代运动心脏病学科室是不完整的。本文概述了CPET的生理学原理和适用范围，并且对其作了基本解释。

善运动成绩提供相应指导。特别是医务人员在护理耐力型运动员时，他们需要根据个体能量代谢而给出系统而精确的建议，这里面不仅要考虑到训练方案，还要顾及肌肉结构和功能的遗传差异。因此，当计划使用CPET作为诊断工具时，首先要对运动背后的基本生理学进行概括。

在人体中，能量供应主要依赖于肌肉细胞中的三磷酸腺苷（ATP）。从ATP中分离掉磷酸盐的化学反应产生了我们运动肌肉所需的能量。这主要通过两种不同的途径实现：使用氧气燃烧脂肪酸和碳水化合物的“有氧”途径（图1A），以及无氧燃烧碳水化合物的“无氧”途径（图1B）。第一种途径能够有效产生ATP但速度缓慢，因为它依赖于氧气的存在，而氧气必须经由呼吸道吸入并运输到肌肉中后进入代谢。第二个产生ATP的速度快得多，能在几秒钟内提供ATP，但这种能量只能持续几秒钟。此外，这一方式会导致乳酸的产生，而后形成肌肉中的酸性环境并限制能量的进一步产生。

## 运动背后的生理学：有氧及无氧能量供应

运动心脏病学的一大分支是判定个人身体素质水平，并就如何最好地提高耐力、改

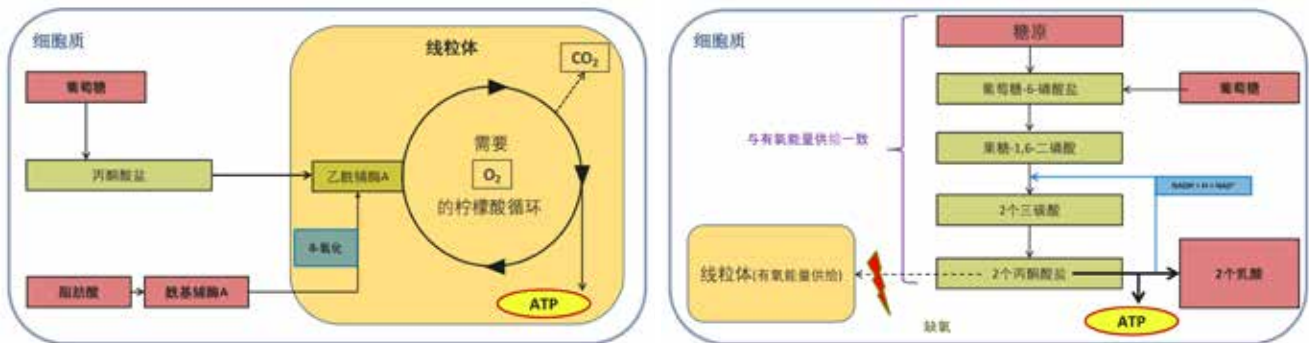


图1：细胞有氧（A）和无氧（B）能量产生的示意图。两种途径都导致三磷酸腺苷的产生，作为肌肉用以诱导运动所需主要的能量源。

有氧途径是耐力型运动员（如马拉松运动员）所需的主要能量生产类型，因为他们运动速度较慢，这可以留出足够的时间将氧气输送到肌肉中。相比之下，无氧途径对100米短跑运动员影响更大，因为他们需要能量在几秒钟内快速输送。然而，值得注意的是，两个系统其实是并行存在的，在较低的运动强度下主要是有氧代谢，然后随着强度的增加，无氧代谢的比例加大。

---

### “身体素质”作为一种生命体征

---

除生理学原理外，了解体育和临床心脏病学中“身体素质”评估意义也十分重要。在运动心脏病学中，术语“身体素质”通常被定义为最大运动量，或者在CPET上表示为运动测试中达到的最大吸氧量（“吸氧峰值”= VO<sub>2</sub>峰值）。大量研究表明，以此方式评估的身体素质是心血管发病率和死亡率的独立预后标志物（1-6）。

例如，挪威近期的发布一项研究报告中，

研究人员对4527名健康受试者（51%女性）进行了CPET测试，并基于基准线确定VO<sub>2</sub>峰值（2）。在之后8.8年的随访期间，研究人员记录了受试者患冠状动脉疾病的风险情况，并与最初运动试验中VO<sub>2</sub>峰值数据进行相关分析。VO<sub>2</sub>峰值最低（表示身体素质最差）的受试者冠状动脉疾病的患病概率几乎是VO<sub>2</sub>峰值最高的受试者的两倍。因此，身体素质（VO<sub>2</sub>峰值）越来越被认为是需要定期进行临床评估的重要标志，重要性类似于血压或胆固醇等参数。除了这一临床意义，在运动医学中，VO<sub>2</sub>峰值传统上是反映个人运动能力的最重要参数。

---

### 除了“普通”运动测试，CPET还能做什么？

---

运动测试一般用来测定运动能力，作为开出运动处方依据，同时评估临床参数，以确定运动员或患者是否可以安全地参加竞技或休闲运动（7）。运动测试通常在跑步机或自行车机上进行，有时也在特定



图2：不同的CPET应用场景。左上图：自行车测力法。右上图：跑步机。左下图：CPET作为移动设备用于现场测试。右下图：划船运动中的CPET。

的运动环境中进行，例如游泳或使用划船机或手轮等特定设备时。临床评估时，通常在测试期间记录一次心电图，并且在每个阶段测量血压以评估各个阶段的血压状态。为了进一步评估能量代谢，乳酸测量也会结合其中，通过在每个阶段从耳垂或指尖取得的血液样本进行分析，以评估在运动期间无氧代谢的增加情况。

然而，乳酸盐测量是一种侵入性测试，它仅反映无氧而不是有氧代谢，并且由于血液样品无法实时测试，所以也就没有办法在测试期间直接对代谢进行评估。因此，在测试期间无法判断个体是否已达到完全代谢耗竭。此外，乳酸盐测试需要运动至少3分钟才能生成有效结果，所以经常会导致超过20分钟的超长运动测试。此外，乳酸盐测量不提供除了心电图之外的任何其它心肺功能临床信息。

这时，CPET就可以扮演重要角色。只需要少量的额外技术和准备工作，所有测量变量都会即时显示在屏幕上。通过测量氧气吸入、二氧化碳呼出、呼吸用力大小和频率以及心脏搏出量，可以在运动期间对心肺和肌肉功能进行综合评估。因此，CPET

为心电图和血压数据贡献了重要的临床参数，使其特别适用于患有心脏病或肺病的患者，同时它也可以用于区分运动性呼吸困难患者的心脏或肺部病因。CPET通常仅需8-12分钟的持续时间测试就可以获得有效结果，因此与其他运动能力诊断相比，它更为省时有效。

## CPET的适用范围

在运动心脏病学中，CPET一般用于确定身体素质并在运动期间识别有氧和无氧代谢，以便开出与训练强度合适的运动处方。除此之外，CPET越来越多地被用来评估心肺系统的功能限制，了解心脏或肺部手术前的运动能力，判断康复运动计划成功与否，判定是心脏还是肺部原因导致运动性呼吸困难，从而推导出健康受试者和患有各种疾病的患者（也包括癌症患者（8））的预后信息。同时它还可以为运动诱发的哮喘患者提供有价值的临床信息。有些患者希望得到身体残疾认证从而减少工作时间和负担，这时 CPET也可以用来是衡量这些患者运动能力。

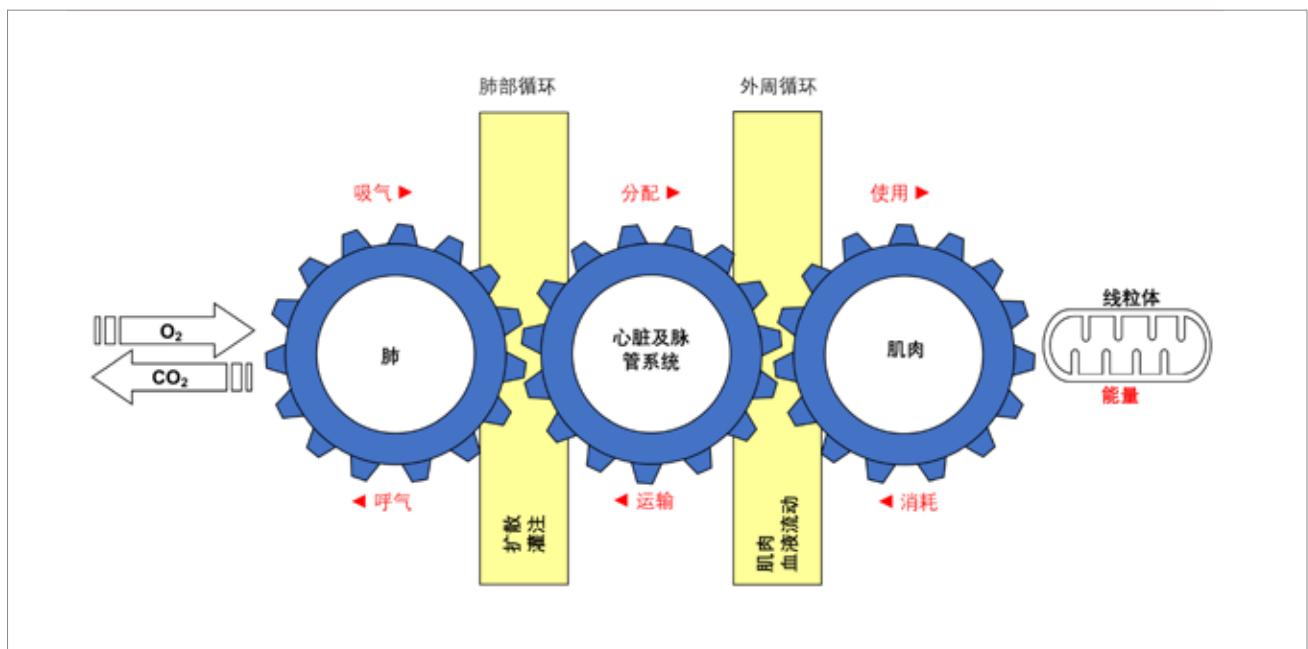


图3：“经典”CPET齿条传动齿轮模型表明三个主要器官（肺，心脏，肌肉）对氧气和二氧化碳代谢和能量产生的类似贡献。

## 如何操作CPET?

与其他运动测试方式类似，CPET测试环境要求室温18-24° C，湿度约为40-60%，同时要求工作人员具有经验丰富且熟悉运动测试（9）。运动员在测试时会拿到一个面罩，面罩需要紧紧固定在嘴鼻上，以避免测试时气体泄漏而导致氧气和二氧化碳（VCO<sub>2</sub>）结果错误。面罩通过输送管连接到分析系统，同时有必要定期检查输送管的密封性。通常会选择“上坡模式”，即运动强度持续上升，这不同于乳酸测量（采用阶段模式）。

测试可以在自行车机或跑步机上进行，也可以在大多数其它类型的测力计上进行（图2）。此外，如果运动员需要直接在特定运动的环境中进行运动性能测试，则可以使用移动设备进行现场测试（图2）。在未出现需要提前终止测试的明显医学症状前，应保持运动直到精疲力竭。

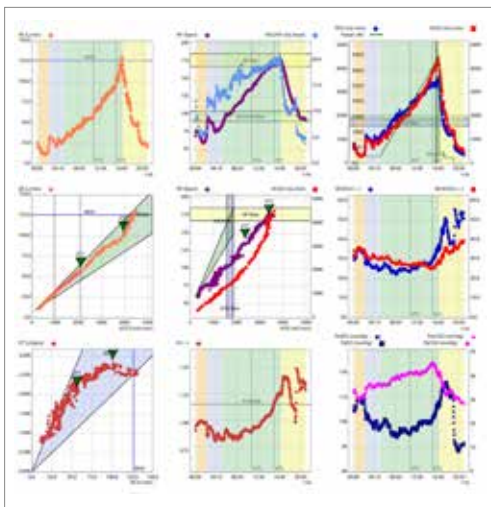


图4：CPET的关键结果以9张图整合呈现。左上图反映主要涉及呼吸功能的参数，上中图反映心脏功能。其它各图反映气体交换的模式，因此也反映了整体或肌肉功能。

## 从CPET中得到的最重要的数据

Karlman Wasserman教授作为CPET的早期先驱和领先专家，提出了三个系统的经典齿条传动齿轮模型，这三个系统涉及氧气消耗和二氧化碳呼出，以及二者的相互影响和依赖（图3）。

根据该模型，CPET可用于测量运动期间与肺、心脏或肌肉功能相关的变量（10）。首次运动测试的结果以上述先驱者Wasserman命名——Wasserman 9组图（图4），表中列出的各种测量变量作为补充，包括氧气和二氧化碳代谢等。虽然初看时比较难理解，但该组图提供了一个肺、心脏和肌肉在运输和消耗氧气产生能量时系统性功能图。

如上所述，VO<sub>2</sub>峰值也许是最重要的参数，因为它显示出整体运动能力和整个系统的功能。目前，针对所有年龄组都有可以使用的标准参考值。相应地，二氧化碳呼出量当作新陈代谢的正常呼吸“废物”来测量；随着无氧代谢增加，为了补偿增加的乳酸，呼出的二氧化碳也在增加。“

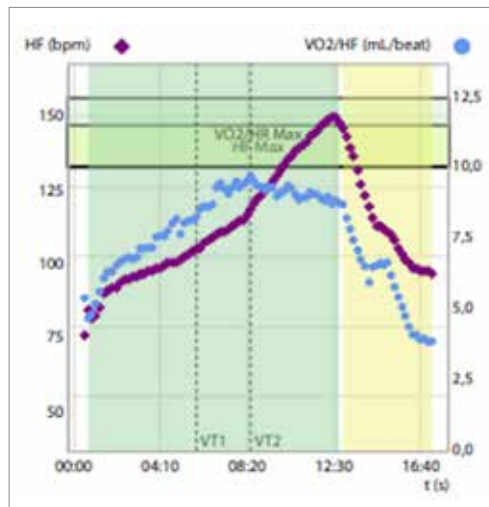


图5：患者运动时氧气脉搏下降（蓝色曲线），极有可能是由于心脏搏动量减少，从而导致心肌缺血。CPET是检测出该患者冠状动脉狭窄的唯一指标，其它测试（如压力超声心动图等）均遗漏了这一点。

CPET用于运动能力诊断

呼吸交换比” (RER) 是两种气体之间的比率 ( $VCO_2/VO_2$ )，通常初始值为0.8左右，主要为吸入氧气，最终达到1.1以上，表明在消耗最大时二氧化碳呼出增加。使用该参数，可以在测试期间判断被测试者是否为不完全消耗状态，从而激励患者继续运动至完全消耗状态。

呼吸方面重要的参数是每分钟呼吸量 (VE) 和被称为呼吸当量的参数，它代表通风和气体交换之间的比率 ( $VE/VO_2$  或  $VE/VCO_2$ )。数值增加表明必须更努力地呼吸以吸入足够的氧气或排出二氧化碳，这也是肺病或心力衰竭的典型情况。心脏方面的一项重要参数是氧脉搏，用于表明氧气体积和心率之间的比率。通常，因为氧气的吸收随着脉搏的增加而增加，在测试期间一般会观察到氧脉搏稳定的增加。运动过程中，如果氧脉搏呈现坡度下降，则表明心脏搏动量严重减少，这种情况通常由严重心肌缺血引起，随后应进行更大范围、通常是侵入性的诊断检查来进一步证实 (图5)。

在体育心脏病学中，CPET主要用于评估个体体能并由此推导出不同体育项目的训练建议。需要注意的是，CPET主要是针对运动员耐力的测试，因此它在自行车、跑步、铁人三项、北欧滑雪或划船等运动项目中尤为重要。通过评估 $VO_2$ 峰值来确定运动员的体能，从而制定合适训练方案，已获得最大训练效果。

此外，确定有氧和无氧阈值同样至关重要。根据文章开头概述的生理学背景，每项测试从低强度开始，这过程基本上代表了完整的以燃烧脂肪酸为主的有氧代谢。恢复区与此对应，肌肉可以从更高的强度再生。由于燃烧脂肪酸是一个有效但非常缓慢的过程，碳水化合物的比例随着运动量的增加而增加，而脂肪酸对能量供应的意义则逐渐减小。CPET可以很好地将这些记录下来。

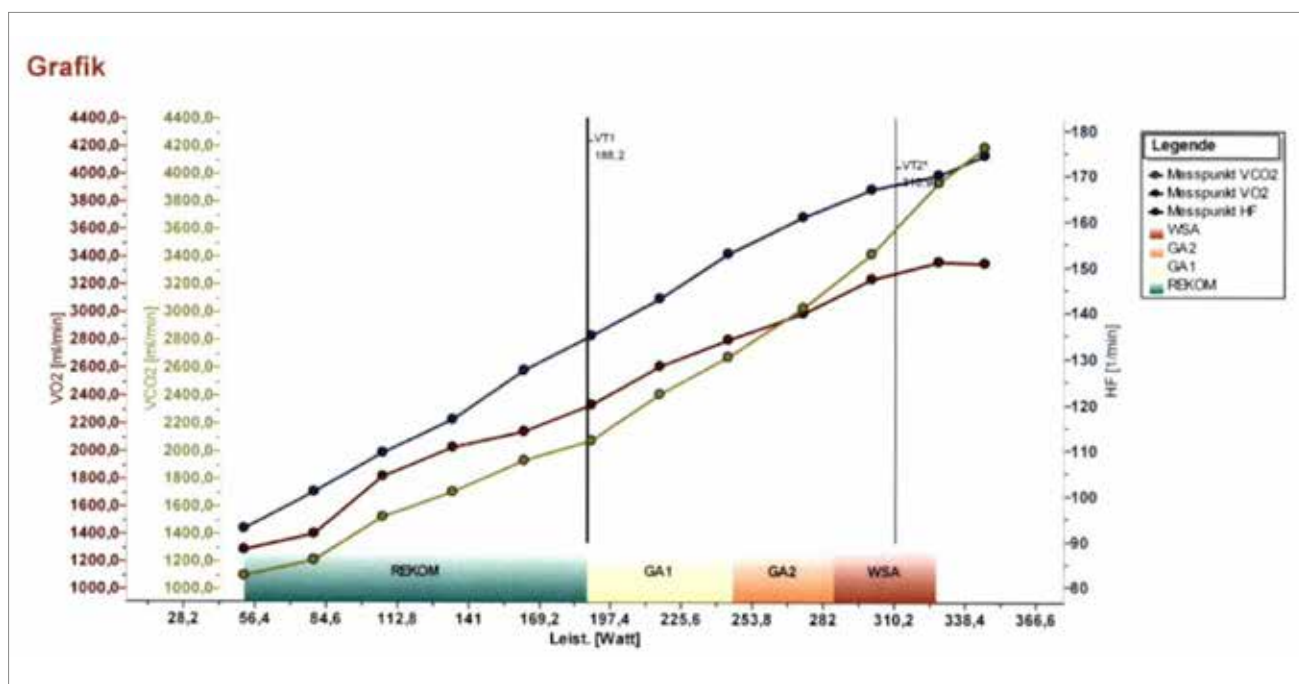


图6: 将CPET结果转化为运动建议。二氧化碳呼出量与氧摄入量的比率决定了能量供应的主要类型 (有氧, 部分有氧部分无氧, 或完全无氧), 使得可将这些阶段对应在不同训练强度期间应维持的特定心率。从VT1和VT2垂直黑线上可以找到两个呼吸阈值, 指示能量供应中的有氧和无氧比例之间的过渡区。

依据不同的身体素质，运动强度逐渐增加时，能量代谢中出现第一次相关的无氧比例，导致呼吸和二氧化碳呼出的增加。这个比例可以通过CPET检测到，称为第一呼吸阈值。这是提高耐力能力的重要部分，因为肌肉受到刺激后会产生更多耗氧肌纤维，以“抵抗”增加的无氧代谢。

随着运动量的进一步增加，无氧代谢的比例稳步上升，达到第二个阈值，这时无氧代谢超过有氧代谢，占主导地位。通过进一步增加呼吸量，可以采取不同方法测定这个呼吸阈值。这个阶段仍然是重要的训练部分，因为此时可通过训练来完美达到比赛期间所需的运动强度。

在这之后，运动员的呼吸开始急速加快以补偿肌肉中不断累积的乳酸量，最后由于无氧耗竭而必须终止测试。在特定软件的帮助下，根据脂肪和葡萄糖代谢的比例以及有氧和无氧训练区，CPET结果可以应用到精确的训练建议中（图6）。

---

## 结论

---

CPET在评估与身体素质和心肺功能相关参数时的质量极高，且极具多样性，因而被公认为运动表现诊断的黄金标准。因此，此技术应成为每个现代运动心脏病学实验室的重要组成部分。

### 参考文献

- [1] Myers J, Prakash M, Froelicher V, Do D, Partington S, Atwood JE. Exercise capacity and mortality among men referred for exercise testing. *N Engl J Med*. 2002;346(11):793-801.
- [2] Letnes JM, Dalen H, Vesterbeekmo EK, Wisloff U, Nes BM. Peak oxygen uptake and incident coronary heart disease in a healthy population: the HUNT Fitness Study. *Eur Heart J*. 2018.
- [3] Kokkinos P, Myers J, Faselis C, Panagiotakos DB, Doumas M, Pittaras A, et al. Exercise capacity and mortality in older men: a 20-year follow-up study. *Circulation*. 2010;122(8):790-7.
- [4] Kodama S, Saito K, Tanaka S, Maki M, Yachi Y, Asumi M, et al. Cardiorespiratory fitness as a quantitative predictor of all-cause mortality and cardiovascular events in healthy men and women: a meta-analysis. *JAMA*. 2009;301(19):2024-35.
- [5] Gulati M, Pandey DK, Arnsdorf MF, Lauderdale DS, Thisted RA, Wicklund RH, et al. Exercise

capacity and the risk of death in women: the St James Women Take Heart Project. *Circulation*. 2003;108(13):1554-9.

- [6] Andersen K, Rasmussen F, Held C, Neovius M, Tynelius P, Sundstrom J. Exercise capacity and muscle strength and risk of vascular disease and arrhythmia in 1.1 million young Swedish men: cohort study. *BMJ*. 2015;351:h4543.
- [7] Fletcher GF, Ades PA, Kligfield P, Arena R, Balady GJ, Bittner VA, et al. Exercise standards for testing and training: a scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*. 2013;128(8):873-934.
- [8] Guazzi M, Arena R, Halle M, Piepoli MF, Myers J, Lavie CJ. 2016 focused update: clinical recommendations for cardiopulmonary exercise testing data assessment in specific patient populations. *Eur Heart J*. 2018;39(14):1144-61.
- [9] Balady GJ, Arena R, Sietsema K, Myers J, Coke L, Fletcher GF, et al. Clinician's Guide to cardiopulmonary exercise testing in adults: a scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*. 2010;122(2):191-225.
- [10] Guazzi M, Adams V, Conraads V, Halle M, Mezzani A, Vanhees L, et al. EACPR/AHA Scientific Statement. Clinical recommendations for cardiopulmonary exercise testing data assessment in specific patient populations. *Circulation*. 2012;126(18):2261-74.



**Axel Pressler** 副教授，  
医学博士  
欧洲心脏病学会委员  
内科，心脏病学，运动  
医学 慕尼黑体育，运动和  
预防心脏病学私人中心  
负责人 体育心脏病学  
专家及德国心脏病学会  
(DGK) 运动心脏病学  
工作组联合主席欧洲预  
防心脏病学会 EAPC)  
体育和运动心脏病学部  
核心成员 德国慕尼黑运  
动心肺功能试验区域工  
作组主席