

Clinical Applications of
Cardiopulmonary Exercise Testing

心肺运动试验 的临床应用

© 主编 黄思贤 谭新洪



人民卫生出版社

心肺运动试验的临床应用

Clinical Applications of Cardiopulmonary Exercise Testing

主编 黄思贤 谭新洪

编者 (按姓氏笔画排序)

王首红	广东省人民医院
李 静	广东省人民医院
郑 晞	广州深宇机电设备有限公司
郭纪全	广东省人民医院
高 平	广东省人民医院
高兴林	广东省人民医院
黄思贤	广东省人民医院
覃铁和	广东省人民医院
谭新洪	广东省人民医院

人民卫生出版社

图书在版编目(CIP)数据

心肺运动试验的临床应用/黄思贤等主编. —北京:
人民卫生出版社, 2007. 8

ISBN 978-7-117-09047-6

I. 心… II. 黄… III. ①心脏-运动(生理)-试验-临
床应用 ②肺-运动(生理)-试验-临床应用 IV. R4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 113640 号

心肺运动试验的临床应用

主 编: 黄思贤 谭新洪

出版发行: 人民卫生出版社(中继线 010-67616688)

地 址: 北京市丰台区方庄芳群园 3 区 3 号楼

邮 编: 100078

网 址: <http://www.pmph.com>

E-mail: pmph@pmph.com

购书热线: 010-67605754 010-65264830

印 刷: 潮河印业有限公司

经 销: 新华书店

开 本: 850×1168 1/32 印张: 7.875 插页: 2

字 数: 200 千字

版 次: 2007 年 9 月第 1 版 2007 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

标准书号: ISBN 978-7-117-09047-6/R·9048

定 价: 39.00 元

版权所有, 侵权必究, 打击盗版举报电话: 010-87613394

(凡属印装质量问题请与本社销售部联系退换)

序

运动心肺功能测定在国外开展已有几十年历史，且专著不少。国内近 20 多年来有关这方面的研究文章陆续见诸报道，应用的范围也更加广泛，并受到医务界和体育界的广为关注。但很少见有关这方面的专著。

我院黄思贤、谭新洪医师编著完成的《心肺运动试验的临床应用》一书，参考国内外文献，将有关的临床经验、测试技术和理论基础加以归纳，编写此书提供给同道临床应用参考。

我有幸先睹此书，受益匪浅。此书具有知识性、实用性特点。心肺运动试验揭示出受试者用其他方法不能发现的内在隐匿的病理生理特点，为临床提供许多有价值的重要线索，这是运动心肺功能测定的魅力所在。运动试验难点在于运动过程中得到的各种参数数据相当繁杂，该书由浅入深地论述了如何综合分析所得的各种数据的意义和数据间的内在规律；通过一定的方法，在众多的参数中发现其变化规律，导出最终病理生理学结论、回应临床需求，体现出心肺运动试验的规律性以及在疾病的诊断、治疗评估方面独特的应用价值。

它首先介绍了运动心肺功能试验各生理参数在诊断疾病中的意义及气体交换在不同疾病中的特征性反应；其次介绍诊断线索三个层次即 $\dot{V}O_2$ 、AT 和 $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$ ；以及帮助诊断、鉴别诊断的 Wasserman K 9 组图与 Cooper CB 4 组图；最后将最大

流量-容积环与运动中潮气流量-容积环的关系、负压呼气法以及呼气末肺容积的测定等提供给读者；文字叙述和图表相结合，内容详实。

我读后深感作者们在繁忙的临床医疗工作压力下，完成撰写任务，付出了十分辛勤的劳动，特此向他们表示深深的敬意。

广东省人民医院院长

广东省心血管病研究所所长 **林曙光**

主任医师 教授

2007年6月

序 二

在过去的半个世纪中,呼吸系统生理和循环系统生理的研究取得了巨大进展,心肺功能测定技术的应用范围和深度也发生了显著的变化,取得了长足的进展。

运动心肺功能测定是指伴有代谢测定的心肺运动测验,是心肺联合功能测定。已广泛应用于临床医学、运动医学、航空医学、康复医学等领域。国外开展此项工作已有数十年之久,成果累累,有不少这方面专著;国内有关这方面专著尚未见到。

黄思贤、谭新洪教授在我院工作了数十年,有着丰富的临床、教学和科研经验。他们编著完成的《心肺运动试验的临床应用》一书,参考国内外文献,将有关的临床经验、测试技术和理论基础加以归纳,编写此书提供给同道临床应用参考。

我有幸先睹此书,感到受益良多。此书具有知识性、实用性的特点。它首先介绍了运动心肺功能试验各生理参数在诊断疾病中的意义及气体交换在不同疾病中的特征性反应;同时将近年来备受关注的流量受限方面的测定提供给读者;特别是有关运动心肺功能测定和6分钟步行试验在心胸外科手术如肺切除、肺减容术、心肺移植手术以及高龄患者上腹部大手术的手术适应证、禁忌证、风险评估上的应用,相信对预计手术后并发症、预测高龄患者承受手术风险能力和提高手术成功率都会

起到积极作用。该书还向读者介绍了诊断思路、结果分析、解释和评价等，内容详实。

我读后深感作者们在繁忙的临床医疗工作中，完成撰写任务，付出了辛勤的劳动，特此向他们表示深深的敬意。我祝贺《心肺运动试验的临床应用》一书的出版，希望能得到国内更多同道们的关心与指正。

广东省人民医院

广东省心血管病研究所 **罗征祥**

主任医师 教授

2007年5月

前言

心肺运动试验 (cardiopulmonary exercise testing, CPET) 或运动心肺功能试验是指伴有代谢测定的运动试验, 是综合心与肺, 在一定功率负荷下测出摄氧量及二氧化碳排出量等代谢指标、通气指标及心电图变化。气体交换将外呼吸与细胞呼吸联系起来, 利用检测外呼吸来量化细胞呼吸的状态和时间经过, 所以它反映细胞呼吸功能的变化, 反映人体的最大有氧代谢能力和心肺储备能力, 特别强调心肺联合功能测定。

运动心肺功能测定已广泛用于临床医学、运动医学、航空医学、康复医学等领域。

运动心肺功能测定在国外开展已有几十年历史, 有不少这方面专著; 上世纪 80 年代, 国内在北京、天津、沈阳、上海、广州、安徽和贵州等地先后开展此项工作, 近 20 年来心肺运动试验在临床和运动医学方面应用的文章陆续见诸报道, 但是有关这方面专著不多。我们主要参考 ① Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, et al. Principles of exercise testing and interpretation. 3rd ed. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins, 1999. ② Cooper CB, Storer TW. Exercise testing and interpretation. A practical approach. United Kingdom: Cambridge, 2001. ③ Weisman IM, Zeballos RJ, Clinical exercise testing. Basel: Karger, 2002. 三本专著, 编写近尾声时又有幸阅读了 Wasserman K 等主编的 2005 年第 4 版 Principles of exercise testing and interpretation。结合我们有限的经验编写

了《心肺运动试验的临床应用》这本书，供读者临床应用时参考。

本书主要介绍：①心肺运动试验各生理参数在诊断疾病中的意义；②气体交换在不同疾病中的特征性反应；③近年来备受关注的最大流量-容积环与运动中潮气流量-容积环的关系和负压呼气法以及呼气末肺容积等在说明通气能力、通气储备、流量受限方面的意义及其测定方法；④诊断思路，结果分析、解释、评价和临床应用；介绍以摄氧量、无氧阈和二氧化碳通气当量三个层次为诊断线索的流程图。此外，还介绍6分钟步行试验优、缺点和临床应用。

本书文字叙述和图表相结合，图文并茂，便于理解与记忆。

由于作者水平有限，经验不多，难免有不足和错误之处，望广大读者批评指正。

萧玉英主任是我学习肺功能知识的启蒙老师，李华德教授使我对肺功能这门学科产生浓厚兴趣，我一直跟随谭新洪主任工作，非常感谢前辈们的支持和指导。

在编写本书过程中得到何斌医师及科室同仁韩倚文、卢佩荃、王素平、廖小兰、赖倩、张国林、李河和陈娉娉等大力协助，在此表示衷心感谢。

黄思贤

2007年8月

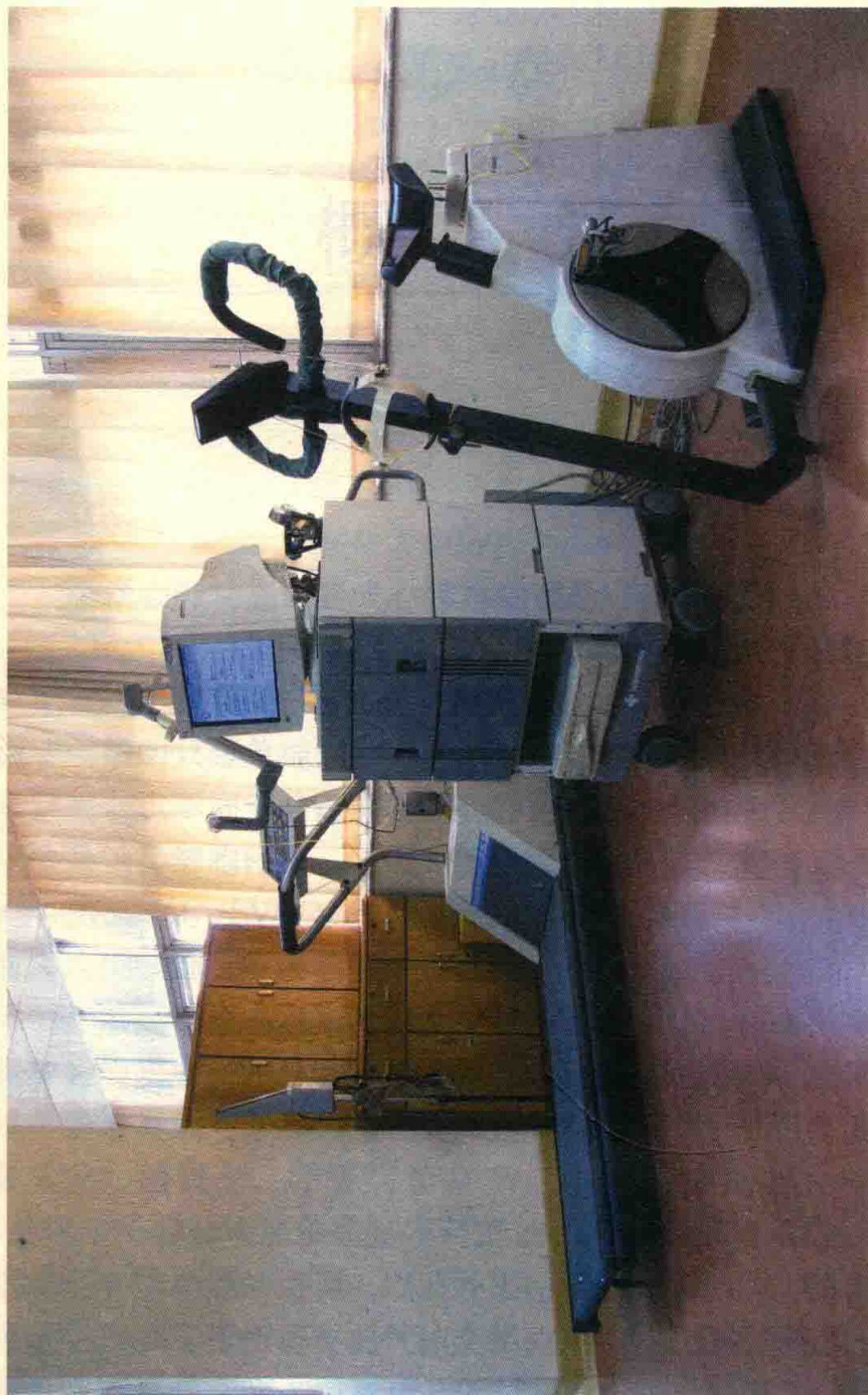


图 肺功能室一角

目 录

第一章 概述.....	1
第二章 运动生理.....	6
第一节 骨骼肌.....	6
第二节 能量供应和营养素.....	8
第三节 气体交换动力学	12
第四节 运动中呼吸循环系统的反应	20
第三章 心肺运动试验生理参数测定	26
第一节 心电图	28
第二节 摄氧量	28
第三节 无氧阈、乳酸盐阈和乳酸性酸中毒阈	35
第四节 氧脉、心搏出量	42
第五节 心率储备	43
第六节 心率应答	44
第七节 心排出量	45
第八节 动脉血压	45
第九节 运动通气量与最大运动通气量	46
第十节 潮气量与深吸气量比	48
第十一节 呼吸储备	49
第十二节 运动中潮气流量-容积环的临床意义	50

第十三节	负压呼气法	59
第十四节	通气血流比例不均	61
第十五节	酸碱反应	69
第十六节	运动 3~6 分钟间摄氧量之差	70
第十七节	图解评价各系统功能	71
第十八节	影响运动试验解释的因素	73

第四章 各种疾病运动受限的病理生理及运动试验的

特征性表现	74
-------------	----

第一节	心脏病	75
第二节	周围血管病	85
第三节	呼吸系统疾病	87
第四节	肺血管病和肺动脉高压	99
第五节	血液系统疾病	102
第六节	肌病和代谢、内分泌疾病	104
第七节	用力不足	106
第八节	肥胖	106
第九节	呼吸困难鉴别诊断	107

第五章 运动试验的准备和实施

第一节	试验室准备	111
第二节	运动试验受试者的准备	120
第三节	运动试验的种类及方案	126
第四节	写报告	152

第六章 心肺运动试验正常值

第一节	峰值摄氧量	156
-----	-------------	-----

第二节	摄氧量-功率	162
第三节	无氧阈	164
第四节	氧脉	165
第五节	最大心率、心率储备与心率应答	166
第六节	血压	167
第七节	通气功能	168
第八节	氧通气当量与二氧化碳通气当量	171
第九节	生理无效腔与潮气量比率	172
第十节	动脉血二氧化碳分压、潮气末二氧化碳 分压和动脉-潮气末二氧化碳分压差	174
第十一节	动脉氧分压、肺泡氧分压、潮气末氧 分压和肺泡-动脉氧分压差	175
第十二节	酸碱平衡	176
第十三节	总结	177
第七章	心肺运动试验诊断程序、解释、评价与 临床应用	179
第一节	心肺运动试验的诊断线索	179
第二节	心肺运动试验的诊断和鉴别诊断	189
第三节	心肺运动试验的临床应用	195
第八章	运动试验仪器	210
第一节	气体交换测量系统	210
第二节	通气容量和流量的测量方法	214
第三节	气体分析器	217
第四节	功率计	220
第五节	校准和维护	222

参考文献.....	224
附录.....	233
1. 气体交换符号缩写表	233
2. 肺功能符号缩写表	234
3. 心肺运动功能符号缩写表	235

第一章

概述

运动心肺功能试验或心肺运动试验 (cardiopulmonary exercise testing, CPET) 是指伴有代谢测定 (摄氧量 $\dot{V}O_2$ 、二氧化碳排出量 $\dot{V}CO_2$ 等气体交换指标) 的心肺运动试验; 它不同于一般的只是单纯观察心电图 ST-T 的变化或心律变化的运动试验, 也不同于静态肺功能。心血管系统与呼吸系统的基本功能是维持细胞呼吸。CPET 通过综合心与肺, 在一定功率负荷下测出 $\dot{V}O_2$ 及 $\dot{V}CO_2$ 等代谢指标、通气指标及心电图变化, 所以它反映细胞呼吸功能的变化。

心脏病学家 Weber KT 指出“心脏病学家和肺病学家不是把注意力集中于左心室, 就是把注意力集中于肺泡。这种局限性不能恰当地理解和较全面地观察心肺单元”, 因而提出“心肺单元”的概念。呼吸病学家 Wasserman K 更进一步指出“单独给心或肺增加负荷是不可能的, 所有的运动均需要心脏功能和肺脏功能的协调, 以及外周循环和肺循环的协调作用来完成生存和工作所需要的气体交换作用”, 并强调外呼吸-细胞呼吸正常耦联 (normal coupling of external to cellular respiration) 即肺-心-活动肌群, 因而进行运动试验能反映人体的最

大有氧代谢能力和心肺储备能力，特别强调心肺联合功能测定。

随着传感器技术的提高和计算机软件的开发，运动心肺功能试验的应用范围越来越广泛。

心肺两个系统在运动中都处于应激状态，通过运动试验检测它们对应激的反应能力可以了解这两个系统以及连接两个系统之间的血管的功能是否健全。

耗氧量与摄氧量，二氧化碳产量与二氧化碳排出量：耗氧量（oxygen consumption, $\dot{Q}O_2$ ）指机体一定时间内消耗的氧气量，反映细胞中氧的利用程度，包括运动中肌细胞氧的利用情况。摄氧量（oxygen uptake, $\dot{V}O_2$ ）指经肺泡与肺血流摄取的氧量。通常情况下需氧供氧平衡，耗氧量即为摄氧量 $\dot{Q}O_2 = \dot{V}O_2$ ，机体通过血液循环将氧输送至运动肌群。同理，二氧化碳产量（carbon dioxide production, $\dot{Q}CO_2$ ）与二氧化碳排出量（carbon dioxide output, $\dot{V}CO_2$ ）也是动态平衡的，二氧化碳产量即为二氧化碳排出量 $\dot{Q}CO_2 = \dot{V}CO_2$ 。因此，外呼吸的 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ 与细胞（运动肌群细胞）中的 $\dot{Q}O_2$ 、 $\dot{Q}CO_2$ 是相等、相对应的。

呼吸交换率与呼吸商：呼吸交换率（respiratory exchange ratio, R） $R = \dot{V}CO_2 / \dot{V}O_2$ 与呼吸商（respiratory quotient, RQ） $RQ = \dot{Q}CO_2 / \dot{Q}O_2$ 在肺内和组织中的比率相等，因此 $R = RQ$ ，这种气体交换的动态平衡对于保证体内生理平衡正常状态是必需的。

血管内 $\dot{V}O_2$ 与肺泡内 $\dot{V}O_2$ ： $C.O \times (C_{(a-\bar{v})}O_2) = \dot{V}_E \times (FiO_2 - F_{EO_2})$ 是处于动态平衡的。

最大摄氧量与无氧阈：最大摄氧量（maximal oxygen uptake, $\dot{V}O_{2max}$ ）是呼吸空气情况下，运动达力竭时，循环系统和呼吸系统发挥最大作用时每分钟所能摄取的氧量。

$$\dot{V}O_{2max} = C.O_{max} \times (C_{(a-\bar{v})}O_2)$$

$$\dot{V}O_{2max} = \dot{V}_{Emax} \times (FiO_2 - F_{EO_2})$$

最大摄氧量同样也是处于动态平衡的。每分钟最大摄氧量取决于循环系统的功能，主要是最大心排出量，反映循环系统氧转运的能力；每分钟最大摄氧量也取决于呼吸系统的功能，主要是每分钟最大通气量，反映呼吸系统通气能力。因而呼吸和循环受限均是最大摄氧量的影响因素。肺的储备能力大于心脏，通常达极量运动时，尚有 30% 左右的通气储备，故运动受限首先是循环系统。

无氧阈 (anaerobic threshold, AT 或 $\dot{V}O_2$ AT) 指运动时有氧供能尚未需要无氧代谢补充供能时的最大 $\dot{V}O_2$ 值，即尚未发生乳酸性酸中毒时的最高 $\dot{V}O_2$ ，反映了机体耐受负荷的潜能，是运动时无氧代谢能力的标志。

反映组织灌注的变化 AT 较 $\dot{V}O_{2\max}$ 敏感，且相对与用力无关，运动耐力较多地取决于肌肉线粒体用氧能力，与 AT 关系较密切。而 $\dot{V}O_{2\max}$ 更多是代表循环系统转运氧的功能。 $\dot{V}O_{2\max}$ 同时受心血管储备功能及肌肉利用氧能力的影响。综合 AT 与 $\dot{V}O_{2\max}$ 可更全面评价患者心肺功能及其运动耐力。

肌肉运动中糖原分解代谢产生 ATP 供能过程，既有无氧酵解又有有氧氧化，肌肉运动中因强度不同，而要求 ATP 合成量及速率不同。有氧代谢途径产生 ATP 多，但速率低；而糖酵解途径产生 ATP 少，但速率快。人体三种能量供应系统的输出功率不同，分别满足不同强度运动需要。因此，在不同强度下，输出功率的限制会启动不同的供能系统。引起有氧代谢向无氧代谢转变的动因应该是肌肉作功耗能与肌肉代谢产能的平衡关系及匹配关系。

有关无氧阈概念及理论的争论一直是当今的热点问题。它促进运动医学发展，使人们的认识更加深入，我们应密切关注它的进展。

气体代谢测试可反映运动过程中，心和肺、体循环和肺循环、外呼吸和内呼吸之间的协调、互补与匹配情况。因此，运