

实用
心脏
负荷试验

汤亚明 郭涛◎主编

SHIYONG
XINZANG
FUHE
SHIYAN

云南出版集团公司
云南科技出版社

实用

心脏

负荷试验

汤亚明 郭涛◎主编

SHIYONG

XINZANG

FUHE

SHIYAN

云南出版集团公司

云南科技出版社

• 昆 明 •

图书在版编目 (CIP) 数据

实用心脏负荷试验 / 汤亚明, 郭涛主编. -- 昆明 :
云南科技出版社, 2014. 11
ISBN 978-7-5416-8621-4

I. ①实… II. ①汤… ②郭… III. ①心脏功能试验
IV. ①R540.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 282630 号

责任编辑: 李永丽

苏丽月

封面设计: 解 萍

责任校对: 叶水金

责任印制: 翟 苑

云南出版集团公司

云南科技出版社出版发行

(昆明市环城西路 609 号云南新闻出版大楼 邮政编码: 650034)

昆明市五华区教育委员会印刷厂印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 14.25 字数: 330 千字

2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

定价: 45.00 元

编 委 会

主 编：汤亚明 郭 涛

副主编：顾 云 郭 皓 杨 萍 马铁昆 吴 莉

编委会：（按姓氏笔画排序）

马铁昆 汤亚明 杨 萍 吴 莉

张佳菊 顾 云 郭 涛 郭 皓

内容提要

本书共 17 章，在讨论心脏运动生理的基础上，系统地介绍了心脏负荷试验，特别是活动平板心脏负荷试验的原理、方法、适应证、禁忌证、操作规程及检查结果在诊断冠心病和指导心脏康复训练方面的应用。内容紧密结合编者多年实践经验，大量图例使该书图文并茂，读来通俗、易懂，可供从事心血管疾病诊断、治疗、预防和康复的临床医、技、护人员及大专院校师生参考借鉴。

序

高居人类疾病死因首位的心血管疾病殃及男女老少，其病因诱因复杂、病程长、难根治、耗费资源巨大，一旦损害心脏收缩与舒张功能，将严重威胁患者生命和健康。对患者冠脉储备和运动耐量进行及时、准确的定性和定量，不仅能提高心血管疾病诊断的及时程度和精度，还可正确判断患者远期预后和指导康复训练。近30年来，尽管心功储备的有创或无创检测技术大量涌现，但具有高效、无创、价廉、简便、易重复等显著优点的活动平板心脏负荷试验仍然是最常用的临床检查方法。该重大技术在我国起步偏晚，不仅尚未普及到所有县级医疗机构，而且部分已开展医院也仅用于初筛冠心病的狭窄领域，继续推广普及实属必要而紧迫。

我院汤亚明等多位长期从事无创心电图学及影像学检测的医务科技工作者2005年编写过《心脏负荷试验》一书。伴随该领域新方法、新理论的不断涌现，汤亚明等8位医务人员凭借坚实理论功底和丰富临床经验，在《心脏负荷试验》基础上集体改编创作了《实用心脏负荷试验》。全书17章、62节、33万字。该书运用科学形象、生动流畅、浅显通俗的文字和图片，系统地介绍了与心脏负荷试验的发展历史、设备原理、诊断价值、治疗价值、科研价值、实现方法、应用技术、适应证与禁忌症、结果判断、特殊人群应用等相关的理论知识和临床应用经验。内容流畅精彩、浅显易读、图文并茂，在关注国内外最新进展和研究成果的同时，突出科学性和实用性，字里行间饱含医学科学的博大精深和医务人员的爱心智慧，相信本书的出版将对从事心电图学、心功检测、心脏康复以及心血管医师更新知识有重要裨益。

以此为序，相信本书对关注心血管疾病诊断、治疗、康复的医务工作者和医学生有重要参考价值。

昆明医科大学教授、博士生导师 郭 涛

前 言

基于心血管疾病的高发病率、高致死率和年轻化态势，如何早期预防心血管疾病已然成为了当今医学研究的一个重点与热点。活动平板心脏负荷试验对患者冠脉储备和运动耐量进行及时、准确的定性和定量，不仅能提高心血管疾病诊断精度和及时程度，还可正确判断患者远期预后和指导康复训练。在各种检测技术中，活动平板心脏负荷试验是医学界一致公认的无创、简便、易行、安全、易重复、效率高的心血管疾病筛查手段。

鉴此，基于长期从事无创心电学检测的实践基础，我们于2005年编写了《心脏负荷试验》一书。现随着自身实践经验的更进一步积累、丰富，同时密切关注国际上关于运动试验的知识更新、成果进展，我们在《心脏负荷试验》基础上，邀请本院相关科室专家学者，以面向临床、贯彻实用为宗旨，以传承、开拓、充实、提高为原则，持续对大量详实、典型的运动试验病例资料进行深入分析，对《心脏负荷试验》进行了更新、补充和延伸，形成了《实用心脏负荷试验》。该书系统、详细地介绍了心脏负荷试验的历史、现状及展望，心脏运动生理学，心脏负荷试验原理，活动平板心脏负荷试验的概述、应用领域方法和结果分析、不同人群的不同试验方案、适用方案和康复方案等，我们努力通过多角度、多层面、广视野、全方位地向读者系统展现心脏负荷试验，并期望本书的出版对心电学工作者和内科医师发挥参考作用。

本书编写过程中，编者查阅了大量国内外专家和同行的论著及论文，从中借鉴和汲取了许多宝贵的论点、数据和经验（见书末的主要参考文献）。谨向上述专家和同行们深表谢意。

同时，在本书编写及出版过程中，得到了云南科技出版社李永丽、苏丽月，云南人民出版社马滨，云南艺术学院副教授张炜的大力支持和帮助，谨致以衷心感谢！

知识在更新，科技在进步，同时限于编者的水平，疏漏和不足之处在所难免，恭聆广大读者批评指正。



目 录

第一章 心脏负荷试验的历史、现状及展望	1
第一节 心脏负荷试验的历史	1
第二节 心脏负荷试验的现状 & 展望	3
第二章 心脏运动负荷试验的生理学基础	4
第一节 生物动能与身体运动	4
一、肌肉与身体运动	4
二、肌肉运动的能量供应	5
三、无氧运动、有氧运动与最大摄氧量	5
第二节 运动的类型与运动的生理反应	7
一、肌肉运动形式的分类	7
二、运动的生理反应	8
第三节 有氧运动能力的检测与评定	16
第三章 冠心病负荷试验的原理	19
第一节 冠脉循环的特点	19
一、正常冠脉循环的特点	19
二、影响冠脉血流的因素	19
三、冠脉血流的调节	20
第二节 冠脉狭窄的病理生理特点	21
第三节 冠心病病人对运动负荷试验的反应	22
第四章 心脏负荷试验概述	23
第一节 常用的活动平板心脏负荷试验	23
一、双倍二级梯心脏负荷试验	23
二、踏车心脏负荷试验	26
三、活动平板心脏负荷试验	27
第二节 心电图药物负荷试验	29
一、心电图硝酸甘油试验	29
二、心电图心得安试验	29
三、心电图西地兰试验	30
四、心电图异丙基肾上腺素试验	30
五、心电图潘生丁试验	31
六、心电图葡萄糖负荷试验	32
第三节 其他心电图心脏负荷试验	32



一、经食管心房调搏心脏负荷试验	32
二、冷加压试验	34
三、过度换气试验	34
四、心电图饱餐试验	35
五、心电图缺氧试验	35
六、精神应激试验	36
第五章 活动平板心脏负荷试验概述	38
第一节 活动平板心脏负荷试验的系统组成	38
第二节 活动平板心脏负荷试验的原理	38
第六章 活动平板心脏负荷试验的应用领域	40
第一节 活动平板心脏负荷试验的适应证	40
第二节 活动平板心脏负荷试验的禁忌证	40
第七章 活动平板心脏负荷试验的方法	42
第一节 活动平板心脏负荷试验前的准备	42
一、工作人员的准备	42
二、患者的准备	43
第二节 活动平板心脏负荷试验的方法	44
一、电极与导联系统的设置	44
二、活动平板心脏负荷试验方案的选择	45
三、操作程序	49
第三节 确保活动平板心脏负荷试验的安全要点	50
一、提前终止活动平板心脏负荷试验的指征	50
二、活动平板心脏负荷试验中常见紧急情况的处理	50
第八章 活动平板心脏负荷试验的结果分析	56
第一节 活动平板心脏负荷试验的正常表现	56
一、正常静息心电图	56
二、正常运动心电图的改变	59
第二节 活动平板心脏负荷试验的结果分析及图例	60
一、活动平板心脏负荷试验阴性	60
二、活动平板心脏负荷试验的可疑阳性	60
三、活动平板心脏负荷试验阳性	73
第三节 其他提示阳性的指标	90
一、T波正常化	90
二、最大ST/HR斜率, $\Delta ST/\Delta HR$ 指数	95
三、QT间期离散度(QTd)	95
四、变时功能不良	96
第九章 运动试验与心脏电交替	97
第一节 单纯性P波电交替	97



第二节 单纯性 QRS 波电交替	98
第三节 单纯性 ST 段电交替	98
第四节 单纯性 U 波电交替	98
第五节 单纯性 T 波电交替	99
一、T 波电交替现象	99
二、T 波电交替的形成机制	101
三、T 波电交替检测的时域分析方法	102
四、影响 TWA 的因素	103
五、T 波电交替检查的适应人群	104
第十章 活动平板心脏负荷试验的应用	105
第一节 初筛冠心病	105
第二节 筛选进行冠状动脉造影、介入手术或外科治疗的适应证	105
第三节 判断冠心病严重程度	106
第四节 冠心病疗效评价	106
第五节 冠心病患者的预后判断	107
第六节 制定冠心病运动处方及指导 II 级预防	107
第七节 早期发现高血压或血压异常	107
第八节 评价心律失常的性质和抗心律失常药物的疗效	108
第十一章 活动平板心脏负荷试验的敏感性特异性及临床价值	110
第一节 敏感性和特异性	110
第二节 临床应用评价	111
第三节 临床价值及对预后的判断	111
第十二章 运动处方的制订和康复运动方案	115
第一节 如何制订运动处方	115
一、制订运动处方	115
二、运动处方的内容	116
三、冠心病运动处方的制订	116
第二节 心脏康复运动研究的进展	120
一、心脏康复运动的机理研究	120
二、心脏康复的功能评定	122
三、心脏康复方案	123
第十三章 特殊人群活动平板心脏负荷试验	125
第一节 急性心肌梗死后活动平板心脏负荷试验	125
一、急性心肌梗死后活动平板心脏负荷试验的禁忌证和运动终止指标	125
二、急性心肌梗死后活动平板心脏负荷试验的临床应用	126
三、心肌梗死后活动平板心脏负荷试验各阳性指标的预后价值	127
第二节 老年人活动平板心脏负荷试验	127
第三节 青少年活动平板心脏负荷试验	129



第四节	女性活动平板心脏负荷试验	130
第五节	高血压病患者活动平板心脏负荷试验	131
第六节	心肌病患者活动平板心脏负荷试验	131
第七节	心脏瓣膜病患者活动平板心脏负荷试验	132
第十四章	多层螺旋 CT 在冠状动脉疾病中的应用	134
第一节	不同探测器层数 CT 冠脉扫描及图像特点	135
一、	4 层 CT 在冠脉显示中的应用	135
二、	16 层 CT 在冠脉显示中的应用	135
三、	64 层及 64 层以上 CT 在冠脉显示中的应用	136
第二节	冠脉 CT 扫描适应症及扫描方法	136
一、	适应证及禁忌证	136
二、	扫描前准备	136
三、	扫描方法	137
四、	扫描模式	137
第三节	MSCT 在冠脉疾病诊断中的应用	138
一、	冠状动脉钙化积分在冠心病诊断中的应用	138
二、	对冠脉狭窄及斑块性质的评估	139
三、	对心肌桥-壁冠状动脉 (MB-McA) 的评估	140
四、	对冠脉支架术后及冠脉搭桥术后血管的显示	141
五、	MSCT 定量评估左心功能	143
六、	对急性胸痛患者的评估	145
第四节	小 结	146
第十五章	超声心动图负荷试验	147
第一节	超声心动图负荷试验基本原理	147
第二节	超声心动图负荷试验的方法	148
一、	运动负荷超声心动图	148
二、	药物负荷超声心动图	148
第三节	超声心动图负荷试验的适应证	149
第四节	超声心动图负荷试验的禁忌证	149
第五节	超声心动图负荷试验终止指征	150
第六节	负荷超声心动图试验的阳性标准	150
第七节	室壁运动异常的判断和评估	150
一、	室壁节段的划分	150
二、	节段性室壁运动异常的观察与评估	152
第八节	超声心动图负荷试验中的新技术	153
第十六章	心血管核医学与心脏负荷试验	155
第一节	心血池显像及心功能测定	155
一、	概 述	155



二、历史回顾·····	155
三、显像原理·····	156
四、显像剂·····	157
五、显像方法·····	158
六、负荷试验·····	158
七、影像分析·····	159
八、适应证·····	164
九、临床应用·····	164
第二节 放射性核素心肌灌注显像·····	168
一、概 述·····	168
二、历史回顾·····	169
三、试验原理·····	169
四、检测方法·····	172
五、图像分析·····	174
六、适应证·····	181
七、心肌灌注显像的临床应用·····	181
第三节 心肌代谢显像评价心肌活力简介·····	186
一、 ^{18}F -FDG 心肌代谢显像 ·····	186
二、SPECT 心肌灌注显像评估心肌活力 ·····	188
三、 ^{123}I -BMIPP 心肌脂肪酸显像评估心肌活力 ·····	190
第四节 小 结·····	190
第十七章 冠心病无创检查方法的合理应用·····	198
一、活动平板心脏负荷试验·····	198
二、核显像检查·····	201
三、超声心动图检查·····	202
四、多层螺旋 CT 检查 ·····	202
五、核磁共振成像·····	203
主要参考文献·····	206



第一章 心脏负荷试验的历史、现状及展望

第一节 心脏负荷试验的历史

20 世纪初 Einthoven 研究发明了心电图机并描记了第一份心电图,而且最早发现运动导致 ST 段下移。

1918 年 Master 首创活动平板心脏负荷试验,首次记录到自发性心绞痛发作期三个标准导联 ST 段压低。

Feil 和 Siegel 于 1928 年证实,心绞痛时 ST 段可呈现长时间的压低。他们将运动引起的 ST 段和 T 波改变视同心绞痛,统称为“阳性反应”,并认为心绞痛病人的心电图异常是心脏供血减少所致。从所发表的心电图记录中可清楚地看到,当胸痛缓解或给心绞痛患者服用硝酸甘油后,上述心电图所见即可恢复正常。他们采用的运动试验是令病人做“坐-立”动作。

1929 年,Master 发表了第一篇有关运动负荷试验的论文。1941 年第一次提出在运动试验前后描记心电图,以检出冠状动脉机能不全。

Wood 和 Wolferth 于 1931 年述及病人运动后 ST 段改变在诊断中的价值。他们提出,为检出缺血性改变,胸导联比标准肢导联更有价值。

1932 年,Goldhammert Seherf 报道了 40 例心绞痛患者,其中 75% 的病人发生 ST 段压低,他们断言,运动对于确诊冠心病所致心肌缺血是有价值的。

1935 年,Katz 和 Landt 提出显示缺血性改变的最佳导联是 V_5 。他们试图使运动试验标准化,所采用的运动方式是令病人仰卧在桌上举哑铃。

Missal 起初是让健康人跑步登上 3~6 层楼梯,而后于 1938 年改用 Master 阶梯运动方法。他要求病人一直运动到发生心绞痛为止,并强调在运动停止后及时记录心电图的重要性。

1940 年,Riseman 等首次提到连续心电图监护的方法。他们指出,ST 段压低通常在心绞痛发作前即已呈现,并在胸痛消失后还持续一段时间。同时提到氧吸入的保护作用,指出健康人运动后 ST 段可出现轻度压低 1mm,而冠心病病人的 ST 段却呈显著压低 2~7mm。可是,他们的结论却认为,鉴于健康人和冠心病病人之间的差别很小,故运动试验的实用价值不大。Liebow 和 Feil 在 1941 年首次提出洋地黄作用引起心电图运动试验假阳性这个重要认识。

至 1942 年,Johnson 等发展了“哈佛梯级试验”,该试验与初期的 Master 试验极为类似,哈佛梯级试验在体育界广泛地用于评价运动员的体格健康情况。其中有一试验方



案 (Park 运动试验) 已用于挑选军人。

Hecht 在 1949 年提出用缺氧试验使冠心病诊断敏感性达到 90% 的试验。他强调胸痛并非试验终点的可靠指标, 因为只有 50% 胸痛病例显示缺血性改变。以往曾患心肌梗死的病人, 缺氧未必引起 ST 段改变。

1950 年, Wood 等报道了他们在伦敦国家心脏医院采用一种称奋力试验的试验。其方法是令病人在他们的实验室附近跑步登上 84 级阶梯, 并强调必须要让病人达到运动极量水平。结果, 与 Master 试验的可靠性为 39% 相比, 该试验的敏感性可达 88%。他们进而强调, 病人的运动量不应固定不变, 而应视病人的能力而调整, 为了使冠心病人的阳性试验率提高, 应给予最大运动量。

1952 年, Yu 和 Soffer 提出, 如在 Master 试验时采用连续心电图监护, 则下列心电图改变为心肌缺血的指标:

- (1) ST 段压低 $\geq 1.0\text{mm}$;
- (2) T 波方向从直立变为倒置或由倒置变为直立;
- (3) R 波振幅比静息心电图减少 50% 或以上;
- (4) 运动期间 Q-T/T-Q 比值延长到 2:1 以上。

他们强调了连续心电监护的重要性, 此外, 他们还报道了在连续心电图监护下, 用电机驱动的活动平板心脏负荷试验, 使实验效果提高了 10% ~ 20%, 且在活动平板心脏负荷试验时, 可采用从右肩到 V_5 部位的双级导联。

在 1955 年之前, 世界各地缺乏现代化运动实验室设施的地方, 通常都选择 Master 试验作为心电图运动试验。

自 1956 年以来, 采用电机驱动的活动平板心脏负荷试验已被广泛用于科研和临床医学中。1966 年 Blackburn 发现 90% 的缺血性改变发生在 CM_5 及 V_5 导联上, 使心脏负荷试验采用相对简单的导联系统成为可能。首次验证 ST 段下降预报价值的学者是 Robb 及 Marks, 他们认为水平型或下斜型 ST 段下降诊断冠心病更可靠, 且下降程度越大预后越差。

1964 年 Naimark 及 Wassermum 根据运动血乳酸浓度的变化, 首次提出无氧代谢阈的概念。其本质是通过增加运动负荷, 机体由有氧代谢转变为无氧代谢的转折点, 一般以血乳酸浓度急剧增加的起点为界。现今无氧代谢阈仍被认为是反映心肺运动功能的重要指标。自从冠脉造影问世以来一直被认为是冠心病诊断的金指标, 但由于有创伤、设备要求复杂且并不能全面反映所有病人的冠脉病变情况, 因此不能取代心脏负荷试验。

从 20 世纪 60 年代起, Bruce、Winter、Sheffield 等采用电子计算机技术分析运动心电图, 为心脏负荷试验走向自动化迈出了可贵的一步。1967 年 Sowton 首先用人工心脏起搏法, 提高受试者心率, 诱发心肌缺血从而诊断冠心病。

1976 年法国学者 Tauchert 创立了潘生丁负荷试验诊断冠心病的方法, 潘生丁广泛应用于心电图、超声心动图和核素显像负荷试验。Pennell 则将潘生丁及腺苷负荷试验方法引用到磁共振显像负荷试验并获得成功。这样心脏负荷试验就不仅仅依赖运动, 心房调搏、药物激发等方法同样可提示静息时不能表现出来的心肌缺血。

1979 年 Mason 用 M 型超声波进行心脏负荷试验, 同年, Wann 首先用二维切面超声



心动图运动负荷试验筛查冠心病,这个阶段超声设备尚不精良,人们经验不足,在运动负荷条件下采图的成功率较低,超声心动图心脏负荷试验当时只不过是研究室的一种方法。

1984年Chapman又成功选用经食管心房调搏进行心脏负荷试验,为无运动能力的病人提供了一种负荷试验方法,这种方法也用于超声心动图、核素显像。仅提高心率作为负荷试验方法,一般认为不如运动负荷那样符合生理学的要求。此后至20世纪80年代中后期,电子计算机技术的进步及数字化显像、电影回放技术和药物激发技术的应用,推动了超声心电图心脏负荷试验的进展,使放射性核素心肌灌注显像及心血池显像心脏负荷试验在冠心病诊断中发挥了重要作用。

第二节 心脏负荷试验的现状与展望

进入20世纪90年代后,风靡数十年的Master二级梯运动负荷试验基本被摒弃,取而代之的是活动平板和踏车运动负荷试验在临床上得到广泛运用。随着超声心动图负荷试验和核素显像及负荷试验的长足进展,目前已形成运动负荷试验与药物负荷试验、超声心动图负荷试验、经食道心房调搏超声心动图、核素显像及负荷试验紧密结合、相辅相成的景象。此外,随着科技的进步,诊断冠心病的技术还包括单光子发射计算机断层摄影、正电子发射断层显像、CT冠状动脉造影、磁共振心脏负荷试验、冠脉内血管镜检查、多普勒导丝检查、血管内超声检查等高科技方法,从而促进了运动负荷试验的蓬勃发展。负荷试验的种类已由早期的运动负荷试验发展到了分级运动负荷试验、心肺运动负荷试验、斑点追踪显像结合运动负荷试验及非运动负荷试验等多种方式,且仍在不断发展、扩宽和丰富之中。



第二章 心脏运动负荷试验的生理学基础

第一节 生物动能与身体运动

一、肌肉与身体运动

在生命过程中,人体不断进行着行走、跑步、跳跃、劳作、游泳、骑自行车、跳舞等运动。身体的运动是在神经系统的调控下由人体的运动系统进行和完成的,运动系统主要由骨骼、关节、肌肉所构成。运动系统的肌肉主要为骨骼肌,身体运动时骨骼肌的收缩与舒张,其为以骨骼为杠杆、以关节为支撑和枢纽的各种躯体运动提供动力。骨骼肌约占体重的40%,分布于全身。骨骼肌由大量的肌纤维成束组成,每一条肌纤维即为一个骨骼肌细胞。骨骼肌细胞为长条形、圆柱状,由多个肌原纤维和多个肌小节组成,肌原纤维有复杂的肌管系统围绕。每个肌小节内有多条粗细肌丝呈纵向平行排列,内含丰富的线粒体,其三磷酸腺苷(ATP)酶能催化ATP水解,为驱动粗细肌丝相互滑动使肌小节缩短而产生骨骼肌收缩及收缩后使细肌丝滑出,肌小节伸长,肌肉舒张提供能量。人体的神经系统可对骨骼肌的收缩与舒张进行精细的调控。骨骼肌组织血管丰富,血液循环可为骨骼肌的运动提供能源和氧分,并及时清除代谢产物。

人体的骨骼肌主要有两种类型,即Ⅰ型(慢肌纤维)和Ⅱ型(快肌纤维)。

1. Ⅰ型肌纤维的特点

在形态结构方面是其肌纤维直径较小,线粒体多,毛细血管丰富,肌红蛋白较多、呈红色,运动神经元较小。在代谢方面是其氧化酶活性高,有氧代谢能力较强。在功能方面是其运动耐力持久,神经传导较慢,运动耐力较强、不易疲劳。Ⅰ型肌纤维适合于进行耐力持久的运动,如长时间维持张力性姿势的运动及以有氧代谢为主的长时间耐力性运动,如慢跑、登山、中长跑等。

2. Ⅱ型肌纤维的特点

在形态结构方面是其肌纤维直径较大,肌质网较多,肌红蛋白较少、呈白色,运动神经元较大。在代谢方面是其ATP酶及无氧代谢酶活性较高,无氧代谢能力较强。在功能方面是其运动耐力较差,神经传导较快,运动耐力较差、易疲劳。Ⅱ型肌纤维则适于进行以无氧代谢为主的短暂的力量、速度性运动,如随意运动、力量运动、跳跃运动及短跑等。



二、肌肉运动的能量供应

1. 肌肉运动的能量供应的直接能源

人体通过食物获得营养和能源,但食物中的营养物质并不能为细胞直接提供能量,来自食物的营养物质所具有的能量必须经过体内一系列生物化学作用过程转变为含有高能键的磷酸化合物即 ATP,再由细胞代谢过程中 ATP 酶的作用使 ATP 高能键裂解释放出能量,才能为细胞所利用,肌细胞运动做功的直接能源就是 ATP。

2. 肌肉运动的能量供应的三个系统

肌肉中 ATP 的储存量、肌细胞运动做功时对 ATP 的分解利用速率及再合成速度对肌肉的运动能力有着重要的影响。由于肌肉中 ATP 的含量有限,肌肉运动做功时 ATP 消耗很快,运动过程中肌细胞需通过以下途径迅速且不断地对所消耗的 ATP 进行恢复和补充:

(1) 磷酸肌酸-三磷酸腺苷 (CP-ATP) 系统:在无氧条件下,体内储存的 CP 能分解释放能量生成 ATP,供肌肉运动做功。因为肌肉内的 CP 储量有限,CP - ATP 无氧代谢速度极快,所以它主要为骨骼肌短时间 (≤ 10 秒)、大强度剧烈运动提供能量;

(2) 无氧酵解-乳酸系统:在无氧条件下,肌细胞内的糖原可酵解生成乳酸并释放能量生成 ATP,供肌肉运动做功。而这一无氧代谢过程生成的 ATP 数量有限,其代谢产物乳酸可导致疲劳。无氧酵解主要为骨骼肌较短时间 (1~3 分钟) 的大强度运动过程供能;

(3) 有氧代谢系统:在有氧条件下,肌细胞对糖原和脂肪进行有氧代谢,能不断生成大量的 ATP,为肌肉运动做功提供能量。有氧代谢的糖原、脂肪等能量物质较为丰富,氧化代谢效能较高,不产生乳酸等容易导致疲劳的代谢产物,可持续长时间地为肌肉运动做功提供能量,成为耐力运动的主要供能方式和途径。

人体的运动能力,特别是有氧运动耐力,不仅与运动系统有直接的关系,还与心血管系统及呼吸系统密切相关,以有氧运动耐力检测为基本方法的心脏运动负荷试验,对检测和评价心肺运动功能有着重要的意义。

三、无氧运动、有氧运动与最大摄氧量

1. 无氧运动与有氧运动

人体在进行不同强度、速度和持续时间的运动时,肌肉运动做功的供能方式是不同的。人体进行短时间、高速度、大强度的运动时,如举重、投掷、跳跃、100~400 米跑等,短时间内需要大量快速供能,而有氧代谢是不能满足这样的供能要求,因此主要依赖于 CP-ATP 及糖原酵解的无氧供能。当机体进行较低强度、较慢的速度、持续较长时间的运动时,如散步、中长跑、登山等,则主要以肌糖原、肝糖原、脂肪等大量能源物质的有氧氧化供能。前者为运动的无氧供能,后者为运动的有氧供能。以无氧供能为主要供能方式的运动称之为无氧运动,而以有氧供能为主要供能方式的运动称之为有氧