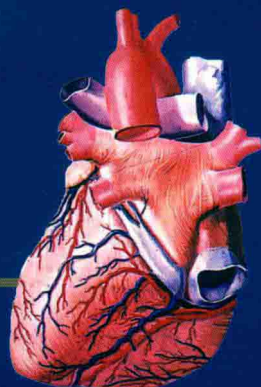


# 慢性心力衰竭 心脏康复

Chronic Heart Failure Cardiac  
Rehabilitation

主编 沈玉芹 张 健



人民卫生出版社  
PEOPLE'S MEDICAL PUBLISHING HOUSE

# 慢性心力衰竭心脏康复

主 审 王乐民 黄 峻

主 编 沈玉芹 张 健

编 者 (以姓氏汉语拼音为序)

黄 峻 (江苏省人民医院)

李广鹤 (同济大学附属同济医院)

马文林 (同济大学附属同济医院)

倪 奕 (同济大学附属同济医院)

沈玉芹 (同济大学附属同济医院)

宋浩明 (同济大学附属同济医院)

王乐民 (同济大学附属同济医院)

许佳毅 (上海市闵行区中心医院)

杨正雄 (中国疾病预防控制中心)

张 健 (中国医学科学院阜外医院)

赵文华 (中国疾病预防控制中心)

人民卫生出版社

图书在版编目(CIP)数据

慢性心力衰竭心脏康复/沈玉芹,张健主编.—北京:人民卫生出版社,2017

ISBN 978-7-117-25103-7

I. ①慢… II. ①沈…②张… III. ①心力衰竭-康复  
IV. ①R541.609

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第218056号

人卫智网	<a href="http://www.ipmph.com">www.ipmph.com</a>	医学教育、学术、考试、健康, 购书智慧智能综合服务平台
人卫官网	<a href="http://www.pmph.com">www.pmph.com</a>	人卫官方资讯发布平台

版权所有,侵权必究!

慢性心力衰竭心脏康复

主 编:沈玉芹 张 健

出版发行:人民卫生出版社(中继线010-59780011)

地 址:北京市朝阳区潘家园南里19号

邮 编:100021

E-mail: [pmph@pmph.com](mailto:pmph@pmph.com)

购书热线:010-59787592 010-59787584 010-65264830

印 刷:中国农业出版社印刷厂

经 销:新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:8

字 数:195千字

版 次:2017年11月第1版 2017年11月第1版第1次印刷

标准书号:ISBN 978-7-117-25103-7/R·25104

定 价:78.00元

打击盗版举报电话:010-59787491 E-mail: [WQ@pmph.com](mailto:WQ@pmph.com)

(凡属印装质量问题请与本社市场营销中心联系退换)

# 主编简介

## 沈玉芹

医学博士，同济大学附属同济医院心血管内科主任医师，副教授，博士研究生导师。中华医学会心血管病分会心脏康复学组委员，中国医师协会康复医师分会心脏康复专委会副主任委员，中国康复医学会心血管病专业委员会常务委员兼青年委员会副主任委员，中国心脏联盟心血管预防与康复学会常务委员，中国医师协会中西医结合分会心脏康复专业委员会技术指导专家，世界中医药学会联合会心脏康复专业委员会常务委员，上海康复医学会重症康复专业委员会主任委员，中国心脏联盟心血管预防与康复学会上海联盟主任委员，上海康复医学会康复医养融合工作委员会委员，上海康复医学会心脏康复专业委员会心衰康复学组组长，上海康复医学会心脏康复专业委员会委员，《慢性稳定性心力衰竭运动康复中国专家共识》撰写专家。发表论文 20 余篇，主持国家自然科学基金及局级课题，参与国家 973 项目及省部级课题多项，作为第二完成人获得上海市康复医学科技进步奖一等奖，获第 20 届日本心脏康复年会国际论坛最佳发言奖。





### 张 健

教授、主任医师。现任中国医学科学院阜外医院心力衰竭中心主任，国家心血管病临床医学研究中心副主任。兼任中国医师协会心力衰竭专业委员会主任委员，中华医学会心血管病分会心力衰竭学组副组长，中国康复医学会心血管病专业委员会常委，中国医师协会中西医结合分会常委，北京心脏学会副会长。欧洲心血管协会会员（FESC）和美国心脏学院会员（FACC）。《中华心力衰竭和心肌病杂志》总编辑，《中华心血管病杂志》和《中国循环杂志》编委等。

从事心血管病临床工作 30 多年，在心血管病，特别是疑难和危重症的诊治和抢救方面拥有丰富的临床经验。曾承担国家、省部委和自然科学基金等项目和课题。在国内外重要杂志发表科学论文 50 多篇，如 JACC 等。由人民卫生出版社出版著作三部《心血管病临床用药》《心力衰竭》和《肥厚型心肌病合并心力衰竭—理论精要与典型病例》。近十多年来，在我国心力衰竭防治方面做了大量工作，如：“十二五”期间组织国内 132 家医院开展了“中国心力衰竭注册研究”（China-HF），结果揭示了我国住院心力衰竭患者的特点及其与欧美等国家的差异，为我国心力衰竭防治提供了科学数据。为培养基层骨干，开展了中国心力衰竭规范化诊治项目，2015 年倡议创立了“中国心力衰竭日”等。

# 序

心衰患者开展心脏康复，特别是在运动指导下的有氧运动康复，10余年前对国内的心内科医师还很陌生，提起这一新概念，更多的是困惑和不解。

近年经过心脏康复理念的导入，知识的更新和临床实践，特别是中国康复学会心脏康复专业委员会推出的系列心血管疾病康复共识，中国心脏康复包括心衰康复逐渐被同行广泛接受，并陆续在医疗机构开展起来。

国内外报告的数据表明，个体化康复方案的实施对心衰患者是有益的，不但可以提高患者的生活质量，对反复再入院率的降低也有效果，这无疑增加了改善心衰临床疗效的方法，值得尝试，但的确也存在风险，需要心内科医师的全面医疗评估。

沈玉芹教授是国内最早开展稳定性心衰康复的心内科医师，10多年来积累了数量可观的稳定性心衰患者心肺储备功能的指标和在其指导下开展运动处方的经验，并在此基础上，善于临床的学术总结，多篇心衰康复论文陆续发表在中华系列杂志和国际心脏康复杂志。

此专著是作者从事心脏康复10余年来的结晶，重点描述了心脏康复过程中，开展心肺运动试验的条件、方法、指标的判读，和指导稳定性心衰患者的有氧运动、抗阻运动等运动疗法的体会，这些内容也恰恰是稳定性心衰患者康复治疗中的难点和风险突出的环节。

我相信此专著的出版对心衰患者疾病的全面管理提供了新思维和帮助，对开展稳定性心衰康复的同行提供了理论和实践启示，为此，我愿意为此专著作序，并推荐给开展心脏康复医疗机构的医师、康复师、护士团队同道以及心脏病患者阅读。

同济大学附属同济医院

王乐民

2017年6月

# 前言

心力衰竭（简称心衰）是心脏结构或功能异常导致心室充盈或射血能力受损的一组临床综合征，主要临床表现为呼吸困难与乏力（活动耐量受限）以及液体潴留〔肺淤血或（和）外周水肿〕。根据心衰发生的时间、速度、严重程度分为急性心衰与慢性心衰，在原有心脏疾病基础上逐渐出现心衰症状与体征的称为慢性心衰。心衰是各种心脏疾病严重预后的终末阶段，据估算我国目前共有约450万心衰患者，且主要病因已经从风湿性心脏瓣膜病转变为冠状动脉粥样硬化性心脏病，心衰患者具有病死率高、发病率高、再住院率高等几大特点。因此，心衰已经成为全球性的公共健康问题。作为医务工作者，我们不能漠视这一健康问题，我们有责任和义务努力寻找办法降低心衰的发病率及延缓心衰的进展，提高终末期心衰患者的寿命及生活质量。

心衰的治疗方法有很多，包括一般治疗、药物治疗和非药物治疗。以运动为核心的心脏康复是心衰的有效治疗方法，目前日益受到重视，但是什么时间应该介入其中值得深思，利用心脏康复的方法从源头预防心衰的发生是最有效的手段。当然，一旦发生心衰了，我们就有责任为慢性心衰患者制订运动处方并进行运动康复的相关指导，同时更需要多学科协作对慢性心衰进行综合管理以落实心脏康复方案，从而实现五大处方（运动处方、药物处方、营养处方、心理处方和控制危险因素-戒烟处方是典型代表）的真正落地，以发挥全面的治疗和康复效果，使慢性心衰患者生活有质量、生命有尊严。

对于慢性心衰而言，回顾心脏康复的核心内容——运动康复的历史，慢性心衰运动康复始于20世纪70年代末，经历了禁忌证、质疑、各大指南强力推荐（证据级别：I A）这三个阶段。得益于HF-ACTION（Heart Failure and A Controlled Trial Investigating Outcomes of Exercise Training）研究、ExTra MATCH及Cochran等多项荟萃分析结果均为慢性心衰的运动康复提供了有力的循证医学依据，证明其安全性与有效性。运动康复可降低CHF患者病死率，显著降低反复住院次数，改善患者运动耐力，改善患者生活质量，合理控制医疗成本。

国内慢性心衰以运动康复为核心的心脏康复尚处于起步阶段，在目前缺乏本

土强有力的循证证据情况下，为了促进这项事业的开展，在胡大一教授的倡导下，在王乐民教授、黄峻教授等的大力支持下，经过国内专家多次讨论后，《慢性稳定性心力衰竭运动康复中国专家共识》于2014年9月由中国康复医学会心血管病专业委员会和中国老年学学会心脑血管病专业委员会联合发布，给国内同行提供了慢性心衰运动康复的参考。

鉴于国内有关慢性心衰心脏康复的书籍较少，为了满足大家的需求，经过2年的准备，本书终于和各位读者见面。本书本着理论与实践相结合的原则，帮助大家容易理解并易于操作，并在深层次方面理解运动康复效果的本质原因。并附初步研究结果，希望能给大家在慢性心衰心脏康复研究方面带来启示。

衷心感谢恩师王乐民教授和黄峻教授在百忙中对本书逐行逐字进行审校，及黄峻教授亲自执笔撰写药物处方部分，对他们严谨治学的精神致以崇高的敬意。衷心感谢胡大一教授的引领，衷心感谢各位作者的辛勤笔耕，感谢李广鹤康复师在本书编辑工作中给予的帮助，感谢在我们前进路上给予支持和帮助的所有同仁和朋友，感谢我们的家人，感谢我们的患者，向您们致以最诚挚的敬意！正因为有了您们，我们才能不断前行！感谢国家自然科学基金资助（81570359）。为了进一步提高本书的质量，以供再版时修改，因而诚恳地希望各位读者、专家提出宝贵意见。

沈玉芹 张 健

2017年6月1日于上海



# 目录

<b>第一章 心脏康复总论</b> .....	1
一、心脏康复的定义与内容 .....	1
二、医学评估 .....	1
三、运动处方 .....	2
四、心理处方 .....	4
五、营养处方 .....	4
<b>第二章 运动生理学</b> .....	5
一、机体的全身反应 .....	5
二、骨骼肌 .....	5
三、能量代谢 .....	6
四、气体交换动力学 .....	7
五、内呼吸与外呼吸的耦联 .....	9
六、循环呼吸系统的变化 .....	9
七、自主神经系统的变化 .....	11
八、运动康复效果的评价 .....	12
<b>第三章 机体运动能力的评估</b> .....	15
一、有氧运动能力评估 .....	15
二、肌力测试 .....	28
三、平衡能力测试 .....	30
<b>第四章 运动处方</b> .....	31
一、适应证和禁忌证 .....	31
二、CHF 运动处方基本原则 .....	32
三、CHF 运动处方内容 .....	32
四、CHF 运动处方 .....	34
<b>第五章 慢性心力衰竭的运动康复</b> .....	40
一、开展慢性心力衰竭运动康复的条件 .....	40
二、运动康复的实施 .....	40

三、运动康复疗效 .....	45
四、运动康复的安全性及注意事项 .....	50
五、慢性心力衰竭运动康复实例分析 .....	53
<b>第六章 慢性心力衰竭患者的药物处方 .....</b>	<b>72</b>
<b>第七章 慢性心力衰竭患者的心理处方 .....</b>	<b>80</b>
一、心力衰竭患者伴发抑郁的临床表现、筛查、诊断 .....	81
二、慢性心力衰竭伴发抑郁的治疗 .....	82
三、心力衰竭伴发焦虑的识别和处理 .....	84
四、对治疗的反应监测、预后评估以及向精神医学专业机构转诊的指征 .....	84
五、慢性心力衰竭伴发心理问题的未来的研究方向 .....	84
<b>第八章 慢性心力衰竭患者的营养处方 .....</b>	<b>86</b>
一、CHF 医学营养治疗 (medical nutrition therapy, MNT) 的主要目标 .....	86
二、CHF 医学营养治疗的原则 .....	86
三、CHF 营养处方制订 .....	87
<b>第九章 慢性心力衰竭危险因素控制 .....</b>	<b>89</b>
一、HFrEF 的危险因素控制 .....	89
二、HFpEF 的危险因素控制 .....	93
<b>第十章 慢性心力衰竭心脏康复流程 .....</b>	<b>95</b>
展望 .....	96
<b>参考文献 .....</b>	<b>99</b>
<b>附录 .....</b>	<b>111</b>
附录 1. 抑郁筛查量表 .....	111
附录 2. 抑郁评估量表 .....	111
附录 3. 焦虑评估量表 .....	112
附录 4. HADs .....	112

# 心脏康复总论

## 一、心脏康复的定义与内容

心脏康复是通过综合性的康复医疗，消除因心脏疾病引起的体力和心理的限制，减轻症状，提高功能水平，达到全身较佳的功能状态，使病人在身体、精神、职业和社会活动等方面恢复正常和接近正常。

世界卫生组织（WHO）对心脏康复的定义：确保心脏病患者获得最佳的体力、精神、社会功能的所有方法的总和，以便患者通过自己的努力在社会上尽可能恢复正常的功能，过一种主动的生活。

心脏康复是一种方案，其内容包括：

1. 医学评估。
2. 运动处方。
3. 心理处方。
4. 营养处方。
5. 健康教育及危险因素控制等方面。

其中运动疗法是心脏康复的重要组成部分，运动疗法也称之为运动康复。心脏康复的短期目标：控制心脏症状、改善心脏功能状态、限制由心脏疾病产生的心理和生理的不利影响、促进心理和职业回归。长期目标：改变心脏疾病的自然发展过程，从而降低发病率和病死率，减低猝死和再梗死等心血管事件风险，稳定和逆转动脉粥样硬化。因此，心脏康复具有疾病的二级预防作用，有改善心血管疾病的预后作用，提高生活质量和功能状态，降低病死率和再次住院率，减少心脏疾病复发。

心脏康复方案由多学科合作的团队完成，团队由临床心血管医师、康复师、护士、技师、营养师和心理治疗师组成。

## 二、医学评估

实施心脏康复前，医师对患者初始所有医学信息进行收集，包括病史、体格检查、辅助检查、运动试验结果等，然后对患者进行综合评估，以进一步制订个体化的心脏康复方案。病史应包括患者的主诉症状；既往心血管疾病和合并症的诊断；是否有高血压、糖尿

病、肥胖、血脂异常、吸烟和缺乏体力活动等危险因素；药物及非药物治疗情况；平时运动水平方面的信息，如运动频率、持续时间、强度和类型；工作史：工作的种类及强度；社会心理史：包括生活条件、家庭婚姻状况、交通需要、家庭需要、家庭和情感问题；抑郁、焦虑或其他心理问题；睡眠情况等。体格检查应集中在静息心率、血压、肺、心脏、血管和骨骼肌肉方面。辅助检查包括血生化检查（血糖、血脂、肝肾功能、电解质）、血常规、心肌标志物、心电图、超声心动图、运动试验（包括运动平板、心肺运动试验、6分钟步行试验），必要时行冠状动脉 CT 成像或造影、下肢血管 B 超等。并对以上信息进行记录，记录内容如表 1-1 所示：

表 1-1 记录内容

一般信息	临床相关情况
①性别、身高、体重	①疾病诊断
②身体活动的水平	②体格检查
③职业情况	③静息心电图
④有无饮酒、药物滥用及吸烟史	④用药情况
⑤患者自我感觉的运动受限种类	⑤可选的其他辅助检查：胸片、下肢血管 B 超、静息肺活量、静息动脉血气结果、血常规
⑥抑郁、焦虑或其他心理问题（GAD-7、PHQ-9）、睡眠情况（匹兹堡睡眠质量指数量表）；生活质量（常用 SF-36 量表）	⑥评估患者有无运动禁忌证
⑦营养状态	
⑧前期的相关检查（运动试验结果、EKG、超声心动图等）	

### 三、运动处方

运动处方（exercise prescription）的概念于 20 世纪 50 年代由美国生理学家卡波维奇提出。20 世纪 60 年代以来，随着康复医学的发展及对冠状动脉粥样硬化性心脏病等的运动康复的开展，运动处方开始受到重视。1969 年世界卫生组织（WHO）开始使用运动处方术语，从而在国际上得到认可。运动处方的完整概念是：康复医师或康复师，对体育锻炼者或患者，根据医学检查资料（包括运动试验和体力测验），按其健康、体力以及心血管功能状况，用处方的形式规定运动种类（type）、运动强度（intensity）、运动时间（time）及运动频率（frequency），并提出运动中的注意事项。运动处方是指导患者有目的、有计划 and 科学地锻炼的一种方法。

肌肉运动具有两大特性：机械性和代谢性，机械性又分为动力和静力，代谢分有氧代谢和无氧代谢。动力运动可使四肢运动，而静力运动不产生四肢运动。大多数运动既包括动力与静力的运动，同时也包括有氧和无氧运动，主要是哪类占主导，从而产生不同的生理反应。动力性的有氧运动是耐力运动，耐力运动能最大限度增加运动者的最大摄氧量（ $VO_2\max$ ），即大量肌肉群交替收缩和舒张（与抗阻运动和等长运动不同），如：步行、跑步、游泳、登车和爬楼梯等。

其他运动有抗阻运动和柔韧性运动。抗阻运动即重复运用低中度阻力而进行活动，常需借助于一定器械，虽然抗阻运动对心血管疾病的危险因素影响作用较耐力运动小，但能改善患者力度和可能增加患者肌肉体积及基础代谢率。柔韧性运动主要通过牵拉肌肉群而提高关节的活动范围，其目的是为了促进运动顺利进行，常在热身运动和整理运动阶段进行。慢性心力衰竭患者多倾向于选择可以改善心肺功能的有氧运动，辅助抗阻运动、柔韧性运动等。

### （一）有氧运动

1. 概念 是指增加氧气输入与运送为主要目的的耐力运动，在整个有氧运动过程中，人体吸入的氧气与需求相等，达到生理上的平衡状态。有氧运动可以改善心肺功能，减少体内脂肪，增加骨骼密度，改善心理平衡程度。从生物化学角度看，有氧运动是机体氧化效率最高的运动。

2. 种类 步行、快走、慢跑、滑冰、游泳、骑自行车、爬楼梯、跳健身舞、跳绳或做韵律操等等。有氧运动特点是强度低、有节奏、不中断和持续、时间长。慢性心力衰竭患者可以根据自己的情况选择适合自己的有氧运动方式。

### （二）抗阻运动

1. 概念 肌肉在克服外来阻力时进行的主动运动。阻力的大小根据肌力而定，以经过用力后能克服阻力完成的运动为度。

2. 种类 分为等张运动、等长运动和等速运动。等张运动（动力性运动）应用较多，阻力可由器械（如哑铃、沙袋、弹簧、弹力带、橡皮筋等）进行，也可由他人、自身的肢体提供阻力（俯卧撑、下蹲起立、仰卧起坐）。等长运动（静止性运动）指肌肉静态收缩，不引起关节活动，是一种简单有效的训练方式。等速运动是指保持恒定运动速度的肌肉抗阻训练方法，是由专门器械设定（等速运动仪）使肌肉保持适宜的速度进行训练。

### （三）柔韧性运动

1. 概念 训练各肌肉、关节、韧带等组织的伸展活动能力和弹性的运动。柔韧性运动主要通过牵拉肌肉群、韧带而提高关节的活动范围，其目的是为了<sup>1</sup>提高柔韧性，从而提高运动幅度、动作速度、动作力量以及完成一些难度动作和高质量动作的基础，同时减少运动性损伤。

2. 种类 包括动力拉伸和静力拉伸两种方法。动力拉伸法是指通过多次重复某一动作的拉伸方法。静力拉伸法是指通过缓慢的动力拉伸，将肌肉、肌腱、韧带等软组织拉长，并停留一定时间的练习方法。这两种方法均可采用主动拉伸和被动拉伸。主动的动力性拉伸方法是借助自身的重力或力量拉伸。被动的动力性拉伸方法是依靠外力的拉伸。在训练过程中，通常是把动力拉伸法和静力拉伸法、主动拉伸法和被动拉伸法结合起来运用。

传统的拉伸技术有三种：弹震伸展、静力拉伸、本体感觉神经肌肉易化牵伸。弹震伸展是通过弹跳运动来拉伸肌肉的活动度；静力拉伸是通过缓慢的动力拉伸；本体感觉神经肌肉易化牵伸是指身体部位已经移动至关节活动范围的末端时，在外力的帮助下被移动到

更远的位置，运动员训练时最常见。

#### 四、心理处方

心理处方是倾向于对患者或健康人群进行心理评估后，针对心理问题给予心理疏导、认知行为干预、运动、药物等多方面心理干预的措施，以恢复心理健康方法的总和。

#### 五、营养处方

营养处方是倾向于对患者或健康人群进行客观的营养评估后，准确地营养诊断，科学地营养干预（包括营养教育、行为干预、运动指导、膳食结构调整、能量平衡、营养素的平衡等），并全面地营养监测的所有手段。

# 运动生理学

## 一、机体的全身反应

运动状态比起静息状态，机体的能量需求增加，而且随着运动强度的增加而增大，此时，机体需要通过血液把更多的氧气和营养物质输送到工作组织或器官，为完成上述功用，机体需要动员中枢和外周双重功能，完成机体运动状态下的全身反应-摄氧量增加。大脑作为总司令部的中枢，通过神经-内分泌网络系统及机体化学感受器和压力感受器接受刺激，调节自主神经功能，把血流合理再分配到全身组织和器官，尤其是工作肌肉中。运动状态下，神经内分泌系统激活后刺激心率加快，心脏收缩加强，外周肌肉收缩使回心血量增加，从而增加心脏的前负荷，外周血管舒张后心脏后负荷降低，从而心排量增加。肺随着运动负荷的增加，肺通气量、氧摄入量 and 二氧化碳排出量均增加，肺通气效率改善，肺的弥散功能加强，从而使更多的氧气进入血液回到心脏。外周方面主要是肌肉和外周血管，通过增加肌肉收缩，外周血管舒张，供应肌肉的血液大大增加，使肌肉的摄氧量增加。

## 二、骨骼肌

骨骼肌由肌细胞所组成，肌细胞又称为肌纤维。数条由膜包裹后的肌纤维构成肌束，肌束亦有膜包裹，构成骨骼肌，骨骼肌中密布血管与神经，形成骨骼肌的能量供应与神经支配。

根据肌纤维的收缩性能和生物化学特性，可将人的骨骼肌分为两类基本纤维即慢缩肌纤维（I型纤维）和快缩肌纤维（II型纤维），I型纤维兴奋后需要相对较长的时间（大约80毫秒）才能达到收缩的峰值，而II型纤维仅需30毫秒。

两类纤维间的生物化学差异主要集中在各自的氧化作用和糖酵解作用的能力上，这与肌纤维的组织成分有关，慢缩肌纤维即I型纤维富含肌红蛋白，因而被称为红纤维，氧化酶含量高；而快缩肌纤维即II型纤维含肌红蛋白少，被称为白纤维，氧化酶含量少，具有更强的糖酵解活性和相关的酶谱。II型纤维可进一步分为IIa型和IIb型，IIa型纤维氧化性能较高而糖酵解能力较弱，IIb型纤维糖酵解能力较强，表2-1所示为骨骼肌三类肌纤维的特点。

表 2-1 骨骼肌三类肌纤维特点

	I 型纤维 慢缩肌纤维	II a 型纤维 快缩肌纤维	II b 型纤维 快缩肌纤维
收缩速度	慢, 80~100ms	快	快, <20ms
纤维大小	小	中	大
颜色	红	红	白
肌红蛋白浓度	高	高	低
线粒体含量	高	高	低
有氧代谢能力	高	中	低
糖酵解能力	低	高	最高
疲劳阻力	高	中	低
运动单位肌力	低	高	高

因此, 骨骼肌类型的比例是判断一个人运动潜能的重要因素, 慢缩肌纤维收缩速度慢, 产生的力量小, 但是有氧化产生的能量 (三磷酸腺苷, ATP) 强, 有很强的抗疲劳性, 因而适合于长时间有氧运动, 如走或慢跑; 快缩肌纤维有氧代谢能力低, 无氧酵解产生的 ATP 的能力强, 可以在无氧条件下短时间内快速产生大量能量, 因此收缩速度快, 产生的力量大, 但容易疲劳, 适合于以速度和爆发力为主的运动, 如跳、快跑、举重等。肌纤维的类型与遗传、训练有关, 长期进行耐力训练后, 骨骼肌的慢缩肌纤维的比例增加。越来越多的证据显示, 肌肉的长期失用和 (或) 慢性疾病可使 II 型纤维的含量比例增高。

单个运动神经元可支配多个肌纤维, 这种功能组件称为一个运动单元, 同一个运动单元的肌纤维在特征上是相同的“纤维类型”, 收缩单元中的每根纤维的底物消耗方面也相当一致。

### 三、能量代谢

肌肉收缩时并不直接利用底物的自由能 (即化学能中可用于做功的部分), 三磷酸腺苷 (adenosine triphosphate, ATP) 是肌肉收缩的直接能源。ATP 的末端磷酸键在消解时可释放出较高的自由能 ( $\Delta G$ ), 并将其称之为高能磷酸键 ( $\sim P$ )。生理条件下, 肌肉收缩时每个高能磷酸键释放出的自由能高达  $12 \sim 14 \text{ kcal/mol}$  ( $1 \text{ kcal} = 4.2 \times 10^3 \text{ J}$ )。因此, 肌肉还可以看做一个数字元件, 它利用多个不连续的  $\sim P$  作为能源而工作。每个肌球蛋白横桥利用一个  $\sim P$ , 并最终由肌动蛋白释放出来。肌肉利用这种能量而发生的构象变化, 并最终表现为肌肉张力的增强或减弱。

肌肉收缩所需的能量主要是在氧供应充分的情况下, 体内的糖类和脂肪酸分解代谢产生的三碳 (如丙酮酸) 和二碳 (如乙酸) 等代谢中间产物的氧化所产生的 ATP, 这个过



程称之为有氧供能系统，是耐力能力的基础，长跑等耐力项目或长时间活动需要有氧供能系统供能。有氧代谢是维持人类生存所需要的长时间运动的能量供应系统。另一小部分能量则来自细胞质中将葡萄糖或糖基单元（来自糖原）代谢为丙酮酸所释放的能量，这些能量均转化为高能磷酸化合物，主要是磷酸肌酸和 ATP。

线粒体的电子传递链将  $H^+$  和电子传递给氧，自胞质至线粒体的通路 A 是需氧糖分解的主要环节，该通路充分利用糖作为底物再生 ATP 以满足肌肉收缩的需要。无氧时，则通过 B 通路进行无氧糖酵解，乳酸生成增加。

当人体剧烈活动时，肌肉中的 ATP 促使磷酸肌酸（CP）分解并同步合成 ATP 以供能，磷酸立即参与糖的无氧快速酵解产生 ATP 以补充肌肉中的 ATP 浓度。这个过程称之为磷酸原供能系统（即 ATP-CP 系统，又称非乳酸能系统），这一供能过程非常迅速，仅能持续 6~8 秒，不超过 10 秒，主要用于短跑等高效率、短时间的活动。是速度与力量项目运动时的主要供能系统。

当磷酸原供能系统供能接近生理允许的极限消耗时间（7.7 秒）时，开始启用糖的无氧酵解供能系统，这个过程亦无须氧气参与，磷酸原供能系统和糖的无氧酵解供能系统统称无氧肌肉收缩或无氧运动。一般可持续供能 2~3 分钟。葡萄糖→丙酮酸阶段是无氧进行的，在有氧的情况下丙酮酸进入线粒体参加三羧酸循环，而在无氧的条件下继续降解产生乳酸，乳酸堆积可导致疲劳。

## 四、气体交换动力学

磷酸原供能系统、糖的无氧酵解供能系统以及有氧氧化系统是 ATP 的再生来源，ATP 又是运动时肌肉的直接能量来源，而有氧氧化系统通过代谢底物，即糖、脂肪和蛋白质可最终氧化成水和二氧化碳，同时释放出能量供 ATP 再合成。有氧氧化系统代谢方式最经济、产生的能量最多，而且不会产生乳酸而导致肌肉疲劳。但是，有氧氧化系统得以顺利进行的首要条件是有充足的氧供，使单位时间获得的氧与机体所需要的氧相适应。

### （一）氧摄取动力学

摄氧量（oxygen uptake,  $VO_2$ ）指经肺泡与肺血流摄取的氧量。耗氧量（oxygen consumption,  $QO_2$ ）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程度。通常情况下需氧供氧平衡，耗氧量即为摄氧量，机体通过血液循环将氧输送至运动肌群。最大摄氧量是人体进行力竭运动时，氧输送系统中的心肺功能和肌肉的氧利用能力达到机体的极限度时单位时间内的氧利用量。根据 Fick 公式： $VO_2 = HR \text{ (beats/min)} \times SV \text{ (ml/beat)} \times (C_{(a-v)} O_2) \text{ (ml/100ml)}$ ，心率（HR）乘以每搏量（SV）等于每分钟心排量（CO），即  $VO_2 = CO \times C_{(a-v)} O_2$ ，从而可见，随着运动负荷的增加，心排量与  $C_{(a-v)} O_2$  均会增加，摄氧量随之增加。 $C_{(a-v)} O_2$  反映了氧利用率，因此中央机制（心脏）与外周机制（氧利用率）是摄氧量的决定因素。

氧摄取动力学通常可分为第 I 相、第 II 相、第 III 相（图 2-1）。第 I 相被认为是心血管动力期，能量是由 ATP-CP 系统供给，第 I 相的特征为在运动开始的 15 秒气体交