

体育系通用教材

运动生理学



体育院、系教材编审委员会
《运动生理学》编写组编

体育系通用教材

运动生理学

体育院、系教材编审委员会
《运动生理学》编写组 编

人民体育出版社

前 言

本教材系在1961年体育院校教材编审委员会编选的《人体生理学》基础上，总结近几年来教学实践和累积的有益经验，吸收了一些国外的科研成果并依据当前各体育院系教学实际情况编写而成。为了使本教材与《运动解剖学》、《运动医学》相互联系而又避免不必要的重复，属于儿童少年解剖生理特点的内容，这次主要在本教材中讲述。在编写过程中，对个别材料的采舍有争议，这次是以多数同志的意见来定的。教材内容可能对各院系的不同情况不能完全适用，各单位可根据自己的需要有所调整。教师讲课时，在院系领导或有关部门同意下，可以补充介绍其他学术观点。

参加编写《运动生理学》教材工作的有(以姓氏笔划为序)王义润、王锦雯、毛传模、韦俊文、刘汉扬、杨范昌、张问礼、胡静波。由于我们的水平有限，选编时间仓促，错误之处在所难免，望读者提出宝贵意见和批评，以便再版时修正。

在编写工作中，国家体委体育科学研究所曾给予大力协助，在此一并表示感谢。

体育院、系教材编审委员会《运动生理学》编写组

1978年3月

目 录

绪言	1	脊髓和延髓的机能	37
第一章 神经和肌肉	3	中脑的机能和脑干网状结构功能	38
第一节 应激性和兴奋性	3	小脑的机能	40
第二节 神经和肌肉装置	3	间脑的机能	41
运动终板和运动单位	3	植物性神经系统的机能	41
肌纤维的结构和功能	4	第四节 中枢神经系统对人体	
白肌和红肌	7	运动机能的调节	44
第三节 肌肉收缩	8	肌紧张反射	44
肌肉的理化特性	8	维持身体基本姿势的各种反射	45
肌肉的收缩	9	大脑皮质对骨骼肌运动的调节	48
肌肉的工作和机械效率	11	第五节 大脑皮质的机能	49
第四节 刺激和兴奋	13	大脑皮质的机能定位	49
引起兴奋的刺激条件	13	大脑皮质的感觉、语言和边缘	
直流电刺激的极性作用和电紧张	16	系统的机能	50
第五节 神经和肌肉的电现象	17	大脑皮质的生物电现象	51
膜电位	17	第三章 高级神经活动	53
膜电位的离子学说	17	第一节 条件反射及其形成	53
动作电位	19	非条件反射和条件反射	53
第六节 神经的传导机能	22	建立条件反射的生理过程和条件	54
第七节 肌电图在运动实践中		第二节 大脑皮质的抑制过程	56
的运用	23	非条件性抑制	56
第二章 中枢神经系统	29	条件性抑制	57
第一节 神经元和突触的结构		第三节 大脑皮质兴奋与抑制	
与功能	29	过程的活动规律	60
神经元	29	第四节 大脑皮质的分析和综	
突触	30	合机能与动力定型	61
第二节 反射及反射中枢活动		第五节 人类高级神经活动的	
的一般规律	32	特征	62
反射及反射弧	32	第六节 高级神经活动类型	63
兴奋通过反射中枢的规律	33	第四章 感官	64
中枢的抑制现象	34	第一节 视觉	64
兴奋与抑制的相互关系	35	第二节 听觉	69
反射活动的协调	36	第三节 位觉	70
第三节 中枢神经系统各部位		第四节 本体感觉	72
的机能	37	第五节 皮肤感觉	73

第六节 感觉机能的相互作用	74
第五章 内分泌	76
第一节 主要内分泌腺及其	
作用	76
甲状腺	76
甲状旁腺	77
胰岛腺	78
肾上腺	78
性腺	80
脑垂体	81
第二节 内分泌的相互关系和	
神经调节	83
第六章 血液	85
第一节 内环境和血液概述	85
体液	85
血液	86
血液的机能	86
第二节 血液的化学组成和	
理化特性	87
血液的化学组成	87
血液的理化特性	87
第三节 血液内的细胞	90
红细胞(红血球)	90
白细胞(白血球)	91
血小板	92
第四节 血量和血型	93
血量	93
血型	94
第五节 运动对血液系统的	
影响	94
安静时白细胞、红细胞和血红	
蛋白数量的变化	94
运动时白细胞、红细胞和血红	
蛋白数量的变化	96
第七章 循环	99
第一节 心脏的机能	99
心脏的结构特点	99
心肌特性	99
心动周期	101
心尖搏动和心音(心声)	102
心搏频率和心输出量	103
心脏的电变化	104

第二节 血管的机能	107
动脉血压与动脉脉搏	107
毛细血管的机能	109
静脉的机能	110
第三节 心脏血管活动的调节	110
神经调节	110
体液调节	113
第四节 运动对心脏血管系统	
的影响	114
第八章 呼吸	116
第一节 呼吸运动和肺功能	117
呼吸运动	117
肺内压和胸内压	118
肺的通气功能	119
第二节 气体交换和运输	121
气体交换	121
气体运输	122
第三节 呼吸运动的调节	127
呼吸中枢及其节律性	127
血液中化学成分对呼吸运动的影响	128
影响呼吸机能的其他因素	130
大脑皮质对呼吸运动的调节	130
第四节 运动时的需氧量和	
氧债	131
需氧量与吸氧量(耗氧量)	131
氧债	134
第五节 运动中的呼吸	137
合理的呼吸方法	137
武术运动中的呼吸方法	138
合理运用憋气和闭气	139
第九章 消化和吸收	141
第一节 口腔内消化	141
第二节 胃内消化	142
第三节 小肠内消化	143
第四节 大肠内消化	144
第五节 吸收	144
吸收的部位	144
第六节 肝脏的功能	146
第七节 肌肉运动对消化机能的	
影响	146
第十章 物质和能量代谢	147

第一节 物质代谢	147	第一节 力量素质	186
糖代谢	147	力量的重要性	187
蛋白质代谢	151	力量素质的生理基础	187
脂肪代谢	153	发展力量素质中的几个问题	189
水盐与维生素代谢	154	肌肉力量的训练方法	191
第二节 能量代谢	155	第二节 速度与速度耐力素质	193
基础代谢	156	速度与速度耐力素质的生理基础	193
测定能量消耗的方法	156	发展速度素质的因素	194
人体运动时的能量供应	157	第三节 一般耐力素质	195
运动训练与能量利用的节省化	161	一般耐力的生理基础	196
第十一章 体温	162	促进耐力素质发展的因素	197
第一节 正常人体的温度	162	第四节 灵敏和柔韧素质	197
第二节 产热和散热	164	第十五章 运动过程中人体机能状态	
第三节 体温的调节机制	166	变化的规律	200
第四节 运动时体温的变化和		第一节 赛前状态	200
调节	167	第二节 进入工作状态	201
第十二章 排泄	168	第三节 稳定状态和疲劳	203
第一节 肾脏结构的特点	168	第四节 恢复过程	204
肾小体	168	第五节 提高和恢复工作能力的	
分泌小管(肾小管)	169	几种措施	206
第二节 尿和尿的生成	169	第十六章 运动训练的生理学	
尿的成分和尿量	169	基础	208
尿的生成	170	第一节 身体练习及其分类	208
第三节 肾脏在维持水和酸碱		第二节 训练程度的生理学	
平衡中的作用	171	评定	210
第四节 运动对肾脏机能的		安静状态时训练程度的生理学指标	211
影响	172	有训练的和没有训练的人体对定量	
运动性尿蛋白	172	负荷的反应	214
血尿	173	最大运动负荷时有训练运动员的生理机	
尿乳酸	174	能反应	215
第十三章 运动技能的形成	175	第三节 运动训练的若干生理学	
第一节 运动技能的条件反射		问题	216
本质	175	系统性	216
第二节 运动技能形成过程与		全面身体训练和专项运动训练相	
发展	176	结合	218
运动条件反射形成过程	176	大运动量训练	220
形成运动技能的过程及其发展	180	区别对待	226
第三节 影响运动技能形成与发展		几种运动训练法的生理学分析	227
的因素	182	运动训练周期	235
第十四章 身体素质的生理学		第四节 过度训练的生理反应	237
基础	186	第十七章 各项运动生理特点	239
		第一节 田径运动生理特点	239

短跑.....	239	高山气候对人体的影响.....	276
中跑和长跑.....	241	人体对高山环境的适应.....	280
超长跑.....	243	第九节 滑冰运动生理特点	281
竞走、跳跃和投掷.....	247	第十节 滑雪运动生理特点	282
第二节 体操运动生理特点	249	第十八章 儿童少年的解剖生理特点	
竞技体操.....	249	与体育锻炼.....	284
生产操、早操、课间操.....	254	第一节 儿童少年生长发育的基本	
第三节 球类运动生理特点	255	规律	284
第四节 武术运动生理特点	259	第二节 儿童少年各器官系统的解	
心血管系统的机能变化.....	259	剖生理特点	287
呼吸系统的机能变化.....	261	运动系统的特点.....	287
位觉和中枢神经系统的机能变化.....	262	心血管系统的特点.....	289
第五节 游泳运动生理特点	263	呼吸系统的特点.....	290
中枢神经系统与感官的作用.....	263	物质代谢的特点.....	293
能量消耗与体温调节.....	265	神经系统的特点.....	294
血液和心血管系统机能变化.....	266	第三节 身体素质发展的年令	
呼吸和排泄机能的变化.....	267	特征	295
第六节 自行车运动生理特点	269	力量素质的年令变化.....	295
第七节 举重运动生理特点	271	速度和耐力素质的年令变化.....	297
中枢神经系统和运动器官的机能		柔韧和灵敏的年令特点.....	298
变化.....	271	第四节 《国家体育锻炼标准》与早	
能量消耗和体重问题.....	272	期专项训练的生理学分析	299
心血管和呼吸系统的机能变化.....	273	《国家体育锻炼标准》的生理学分析.....	299
第八节 登山运动生理特点	275	早期专项训练.....	300
登山过程中造成人体缺氧的因素.....	275		

绪 论

运动生理学是人体生理学的一个分支，解放后在毛主席革命体育路线指引下，获得了迅速的发展和显著的成就。运动生理学论述人体在体育活动和运动训练作用下，结构和机能方面发生了哪些变化，这些变化有哪些规律，以便科学地、有效地组织与安排体育活动和运动训练。因此，运动生理学是体育科学的一门基础理论学科。

人体的结构和机能决不是一成不变的。人类在同大自然进行的斗争中改变着自己身体的结构和机能。在体育运动影响下，人的神经系统和各种器官的机能可以达到惊人的灵敏和精确，肌肉愈用愈发达，感官愈练愈敏锐，正是“勤体育则强筋骨，强筋骨则体质可变，弱可转强，身心可以并完”，这阐明了体育运动对整个身体的积极作用。而运动生理学的任务就是要研究各种体育活动或运动训练对人体的影响、运动技能形成和发展的生理学规律、人体运动能力提高的生理机制以及各种训练制度和方法的科学性等。

运动生理学是在正常人体生理学基础上发展起来的新兴学科。因此，在运动生理学教学过程中，首先要学习和掌握人体解剖学，生理学和生物化学等方面的基础知识，然后把这些知识应用到运动实践中去，并通过体育教学和运动实践不断总结经验来加以丰富和充实。为了达到这一学习目的，必须明确以下几个观点和问题。

一、对立统一的观点 人体的细胞组织、器官，系统各有不同的结构和机能，它们之间的关系是非常复杂的，外界环境也经常变动，人体如何能保持正常的生命活动，这是对认识中的一个非常重要的问题。坚持运用对立统一的根本规律，就能概括人体正常的生命活动。如人体新陈代谢中的同化和异化，能源物质的分解和合成，肌肉的收缩和放松，呼吸和吸气，神经的兴奋和抑制等等，无一器官，无一过程不是“矛盾着的对立面又统一，又斗争，由此推动事物的运动和变化”。一种物质变为另一种物质，一种能量转换为另一种能量，一种状态变化为另一种状态，无时无刻不在人体内广泛进行着，并在神经系统的统一指挥下，完成人体的整体活动。古语说“动则生，静则死”。这就是说，体育运动可给予人体整体活动以新的、更为积极的对立统一关系，对增强体质、预防疾病、提高健康水平具有巨大意义。相反，如果人体因某种原因，这种对立统一的关系发生障碍，人体的工作能力就会降低，健康状况下降，甚至发生病变。

所以，在运动实践中，应以对立统一的基本观点来分析研究人体活动，了解人体在运动过程中结构和功能的变化规律，并掌握这些规律去指导运动实践。

二、社会因素特别是思想意识对人体的能动作用 人不仅能适应外界环境的变化，还能能动地改造环境，使之适于人类的生存。人不仅受生物学规律所支配，还受社会发展规律所影响。在无产阶级革命事业中，无数革命先烈艰苦卓绝的光辉事迹，可以无可辩驳地说明社会因素对人体具有能动作用。我国登山运动员，以高度的无产阶级觉悟，以顽强意志忍受了低气压和极度缺氧所造成的人体机能障碍，充分发挥人的主观能动作用，胜利地登上了被资产阶级生理学家定为死亡线的8000米以上的珠穆朗玛峰，把毛主席的光辉形象和五星红旗树立在地球之巅。由此可见，用纯生物学观点来解释人的行为，是十分错误的。

在体育教学和运动训练过程中，既要遵守发挥人体结构和功能潜力的生物学规律，按科学态度办事，也要充分调动人的主观能动作用，提倡为革命而刻苦锻炼身体，辩证地处理好教学和训练中的问题，使之更有效地增强体质，提高运动技术水平。

三、整体和局部的统一 人体是完整统一的机体，局部器官、系统的结构和功能是整体不可分割的一部分，而不能代替整体。整体的结构和功能又可以在局部得到反映。如果把人体各个器官、系统孤立起来，忽视了整体，撇开身体内部总的联系去进行研究，就会陷入形而上学的局部观点。恩格斯对神经系统在人体整体统一中的作用做了深刻的辩证的概括：“神经系统在发展到一定程度的时候（由于蠕虫的头节向后延伸），便占有整个身体，并且按照自己的需要来组成整个身体”（《自然辩证法》，中文版，第264页，人民出版社，1955年）。由此可见，人体各器官系统虽有特定的生理机能和活动规律，但在整个生命过程中，都在神经系统统一指挥下，进行着互相联系、互相影响和互相制约的协调活动，这是人体具有高度完整性的根本保证。

所以，在研究器官和系统的局部现象与规律时，要有整体观念，这样才能得到客观的结果。例如，在评定训练程度时，假使只以某个器官功能良好与否作为依据，就不可能得出关于整体训练水平的正确结论。

四、理论联系实际 理论来源于实践，反过来又为实践服务。运动生理学是从体育和运动实践中总结出来的，也是为体育教学和运动训练服务的。因此，学习运动生理学，就是要掌握人体活动的基本原理与规律，并运用到体育教学和运动训练工作中。当然，有些基础理论的实际意义对我们来说还有个认识和实践的过程，应在运动实践中坚持不懈地总结经验，使之不断充实和丰富。这样既能培养我们分析问题和解决问题的能力，也有利于指导教学和运动训练工作。

第一章 神经和肌肉

为了了解机体的各种生理功能，必须首先了解活组织的最基本的生理特性。从功能角度看，活组织最基本的特性是能对环境的变化进行主动性的反应。这一特性在神经和肌肉组织比较容易观察和研究，所以本章便以这两种组织为对象，讨论一些有关活组织的基本生理特性的问题。

第一节 应激性和兴奋性

应激性是指活组织或有机体在环境发生变化时发生相应的反应的能力。这种反应可表现为生理活动方面或生物化学方面的某些变化。

活组织的反应是环境的变化所引起的。通常把能够引起活组织产生反应的环境变化称为刺激。

刺激的种类很多，如电的、机械的、射线的、压力的、温度的和化学的等等。一般，在生理学实验中经常用的是电刺激，因为电刺激的强度、频率和作用时间都可以精确地加以控制，而且在一定范围内对组织也无损害。由于微观技术的发展，在生理学的研究中扩大了认识范围，特别是电子学和组织化学领域中，对活组织的观察和研究更为深入和细致。

组织受刺激后发生什么样的反应，决定于它的结构和机能特点。一种组织受刺激后，可以同时产生几种不同的变化。但是不论那种组织，它们对刺激发生的最基本的反应是物质代谢的改变。以物质代谢的变化为基础，各种组织可以产生它们所特有的反应，如神经可产生兴奋，肌肉除产生兴奋外，还可发生收缩等。

兴奋和兴奋性 兴奋是指活组织在刺激作用下所产生的一种可传播的，并伴有电活动现象的反应过程。组织能够产生兴奋的能力称为兴奋性。在人体中，神经和肌肉组织是具有兴奋性的组织。其他组织，如骨组织等虽受到刺激后也能发生代谢变化或其他反应，但不能产生象神经和肌肉组织那样的兴奋过程。所以象骨组织只具有应激能力，而不具有兴奋性。

兴奋在神经上发生后，就沿神经传导；当传导到和它有生理性联系的另一组织时，将影响后一组织的活动：或增强它的活动，使它也发生兴奋，或减弱它的活动，使之抑制。兴奋由神经传到肌肉，如果引起肌纤维兴奋就收缩，如果引起抑制，就减弱收缩或放松。

第二节 神经和肌肉装置

运动终板和运动单位

运动终板 神经纤维和肌肉纤维本来是两种完全不同的组织，它们之间没有原浆的

连续。运动神经纤维和肌纤维之间的联系叫**神经肌肉接点**，它属于突触性的结构（突触的概念见下一章）。其结构特点如图1。运动神经纤维在接近肌纤维处失去髓鞘，并分为

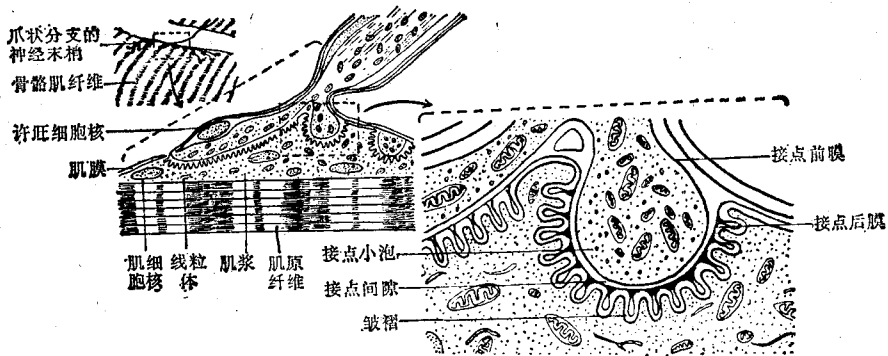


图1 神经和肌肉接点纵切面模式图
(连续放大)

许多终末小枝。神经纤维的终末紧密地复盖在肌纤维上。在神经纤维终末和肌纤维膜之间，有一宽约200—500 Å^①的间隙（接点间隙）。这一间隙的神经纤维终末方面的界面，叫做**接点前膜**。在神经纤维终末的轴浆中有线粒体和许多直径为500 Å左右的接点小泡，每个小泡中有一定量（约10⁶分子）的乙酰胆碱。接点间隙的肌纤维方面的界面，叫做**接点后膜**，即**运动终板或终板**。这部分膜是一般肌膜的延续，但这一部位有很多皱褶，使膜面积增大。终板和一般肌膜不同，它不能因电流的刺激而发生兴奋，但对乙酰胆碱作用很敏感，其敏感程度比一般肌膜大1000倍。所以，兴奋由神经末梢向肌纤维的传导不是借助于电活动的机制，而是依靠化学介质（乙酰胆碱）的作用。

运动单位 一个运动神经元连同它所支配的肌纤维，统称为一个运动单位（机能单位）。一个运动单位包括3—100余根肌纤维。一块肌肉包括很多运动单位，最多的有700个。因为参加活动的运动单位数目不同，肌肉收缩的程度和力量也就不同。范斯坦(Feinstein, 1955)曾运用神经支配比例来了解肌肉的功能。所谓神经支配比例，是指一个运动神经元所支配的肌纤维的数量。如果一个运动神经元支配100条肌纤维，那末一个运动单位的神经支配比例为1:100。这样，小的运动单位支配的肌纤维少，如面部、手指的肌肉；大的运动单位所支配的肌纤维多，如躯干肌和四肢肌等。

肌纤维的结构和功能

肌纤维的微细结构 每块骨骼肌都由肌束群所组成，每条肌束包含有上千根肌纤维（即肌细胞）。人体内肌纤维的数量在出生后4—5个月就固定下来，以后不再改变。出生时肌纤维的粗细是成年人的肌纤维的1/5（洛克哈特 Lockhart, 1960）。在运动训练影响下，肌纤维的粗细可以发生显著变化。

骨骼肌纤维是一条圆柱形细胞，肌纤维的长短参差不齐，不同肌纤维的粗细甚至在同一条肌束内也不一样（直径约为10—100微米^②），很多肌肉中长的肌纤维可起止于两端

注：① Å（埃）为长度的微细单位（1/1,000,000毫米）。

② 微米=1/1000毫米。

的肌腱上。现已证明在肌肉里有着比 30 厘米还长的肌纤维。每条肌纤维（肌细胞）内有核，有的在一条肌纤维内可有数百个核（沃尔斯 Walls, 1960）。

每条肌纤维还有肌膜、肌原纤维和肌浆等结构。肌膜是一层有弹性的无核薄膜，其厚度小于 100 \AA ，复盖在肌纤维周围。它的结构像其他细胞（如神经细胞等）的内膜，膜上有小孔或开放的小泡。这种结构从形态学上表明，它有运输功能（沃尔斯 Walls, 1960）。肌膜还有显著的导电性能。

肌纤维有收缩功能的成分是肌原纤维。近年来，借助于电子显微镜的观察和对肌原纤维进行生物化学的研究与分析，进一步了解了肌肉的结构和功能。

每条肌纤维包含许多条肌原纤维，每条肌原纤维长 1—3 微米，相互平行、均匀地排列成束。图 2 是从一块肌肉到一条肌原纤维的剖析。图中 2 是一段肌节，肌节边缘有很

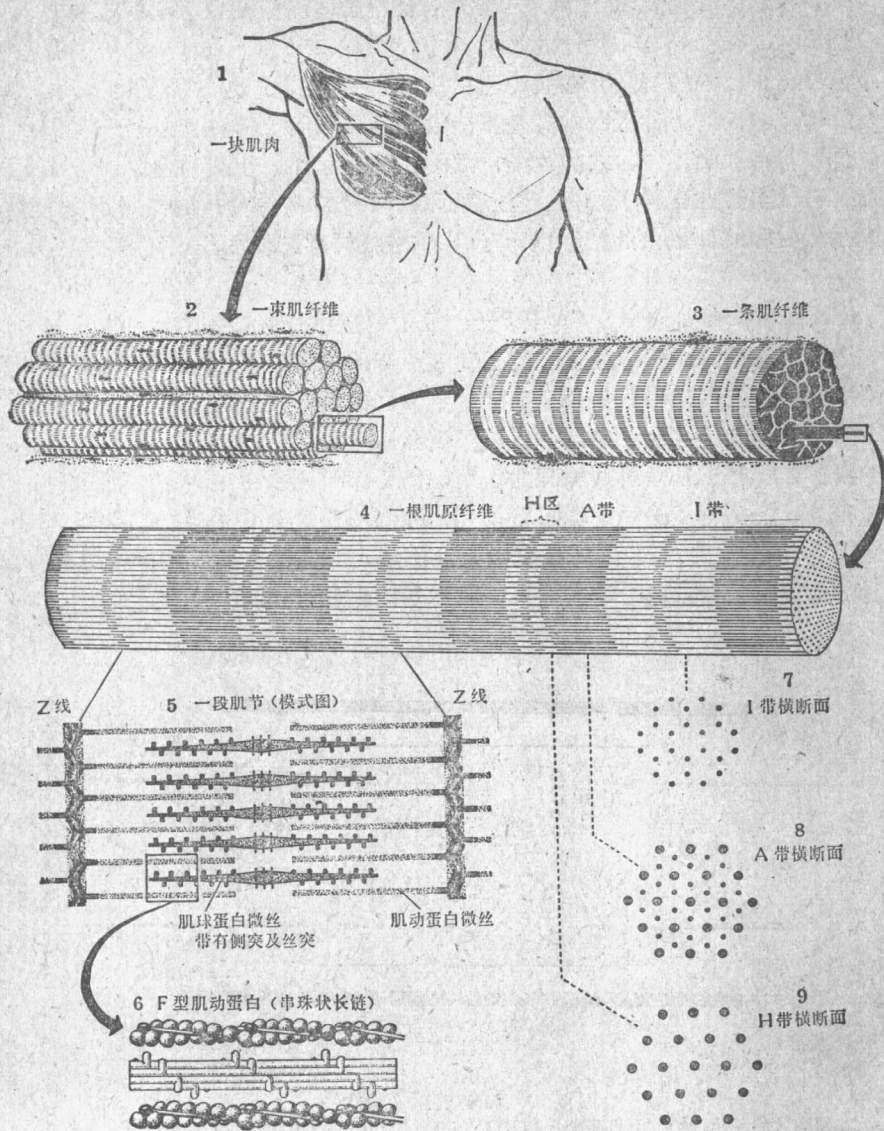


图 2 肌纤维结构模式图

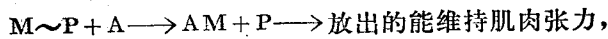
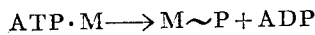
窄的肌膜叫Z线，肌节两端是单折光带，也叫I带（明带），中间是双折光带，也叫A带（暗带），A带正中间叫H区，静止时H区折光能力比A带小。

图2的5可看到粗细不同的蛋白丝平行地配布在肌原纤维上：粗的呈杆状形的蛋白丝叫肌凝蛋白丝或肌球蛋白丝，大约长1.5微米，粗150Å，纵长排列在A带上；细的呈丝状形的蛋白丝叫肌纤蛋白丝或肌动蛋白丝，约粗50Å，排列在I带并延伸到A带上至H区始点为止。这就可以看出，粗蛋白丝排列在H区，细蛋白丝排列在I带，而H区两侧的A带则为粗细两种蛋白丝交错排列构成横桥系统。如将交错重叠的部分作一横切，就可看到一个有规则的模型(图2之8)。肌凝蛋白丝在中间，肌纤蛋白丝呈六角形排列在肌凝蛋白丝周围。

肌浆有细胞内质和网状物质。肌浆的细胞内质里有可溶性蛋白（如肌红蛋白）、糖元、脂肪滴、磷酸化合物及离子等。肌浆的网状物质是许多精密小泡组成管道，通向肌原纤维和肌纤维，行使导电和代谢的功能。

肌纤维收缩和放松的机制 在肌肉蛋白质中，50%以上是肌凝蛋白(M)，25%以上是肌纤蛋白(A)。仅这两种蛋白本身是不能收缩的，然而这两种蛋白在一定条件下形成另一种蛋白，即肌纤凝蛋白，才能收缩。那么在什么条件下使两种蛋白结合为肌纤凝蛋白呢？必须有三磷酸腺苷(ATP)、三磷酸腺苷酶、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等物质的作用下才能实现。

在肌凝蛋白和肌纤蛋白的结合中，ATP磷酸根转移起供能作用：



~P是高能磷酸键。三磷酸腺苷被三磷酸腺苷酶催化，分介为二磷酸腺苷(ADP)释放出的能给肌纤凝蛋白作功。如果三磷酸腺苷酶的活性能持续发生作用，肌纤蛋白和肌凝蛋白之间所发生的反应也可继续，直至三磷酸腺苷的供应耗尽。

三磷酸腺苷酶激活了三磷酸腺苷的作用，仍要靠肌凝蛋白中 Mg^{2+} 的催化作用，使肌纤蛋白和肌凝蛋白分子之间出现重新排列，提高三磷酸腺苷的浓度，即 $ATP + AM \rightarrow M \cdot ATP + A$ 。如果ATP酶持续发生激活作用，肌纤维收缩反应也持续进行，也就是肌纤蛋白持续向肌凝蛋白滑动或插入，肌肉长度也就缩短(图3)。

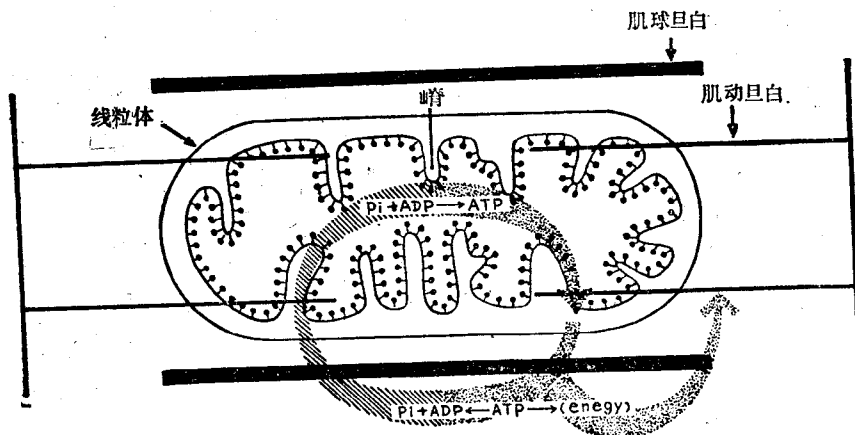
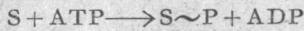


图3 A. 肌肉细胞中能的发生
当肌肉收缩开始，Pi(无机磷酸)和ADP(二磷酸腺苷)在嵴上结合生成高能分子ATP(三磷酸腺苷)。在能被释放时，ADP和Pi形成并进入粒体以合成ATP

引起肌纤蛋白的滑动，同横桥有关，因肌凝蛋白丝的横桥含有丰富的三磷酸腺苷酶，并有结合肌纤蛋白的能力。当肌纤维处在静止状态时，此酶被抑制，不能和肌纤蛋白结合，横桥也不和肌纤蛋白接触。一旦肌纤维接受神经冲动发生兴奋，三磷酸腺苷酶被分介，横桥和肌纤蛋白接触，形成肌纤凝蛋白，导致肌纤蛋白向肌凝蛋白滑动。

肌纤维又是怎样宽息或放松的呢？肌纤维放松也需要有能的供应，同样靠三磷酸腺苷供能。因此，三磷酸腺苷的功能有两重性：上面说的肌纤蛋白和肌凝蛋白相结合靠它，肌纤凝蛋白的分离同样也要靠 ATP 供能。



S 代表放松的因素，它和肌浆内网状物质释放和回收钙离子的功能有关。当肌纤维放松时，不存在游离的 Ca^{++} ，这是由于网状物质出现膜电位变化时，把游离的 Ca^{++} 回收。当网状物质释放 Ca^{++} ，它就能激活三磷酸腺苷酶，致使肌纤蛋白和肌凝蛋白结合，出现肌纤维收缩。所以钙离子有制约肌纤维放松作用。由此可见，钙离子的释放和回收，或它的激活和制约作用，都与肌膜电位变化相关（洛朗德和莫尔纳，Lorund and Molnar, 1962）。

综上所述，肌肉收缩和放松是肌纤维中的肌纤蛋白、肌凝蛋白、三磷酸腺苷和它的酶及钙离子等的相互作用的结果。当神经冲动传到肌肉时，肌纤维的膜电位发生变化，肌纤维中网状物质的钙离子被释放出来，激活了三磷酸腺苷酶的活性，触发肌凝蛋白和肌纤蛋白间的横桥作用，使肌凝蛋白和肌纤蛋白交替地附上和拆开，肌纤蛋白向肌凝蛋白滑动，即使肌纤维缩短。

然而，这时肌凝蛋白分子会利用三磷酸腺苷放出的能来恢复肌细胞中 Ca^{++} 的含量，即肌浆网状物质回收游离的 Ca^{++} ，肌纤维也就回复它原来的松弛状态。

此外，关于肌纤维收缩的理论还有肌蛋白折叠学说等。

白肌和红肌

很早就知道，由白肌纤维所组成的白肌，收缩快，但不能持久；由红肌纤维所组成的红肌，收缩慢，能耐久。近年来，通过电子显微镜的观察以及生物化学等方法研究，并采用针型活组织抽取技术，对人类骨骼肌纤维的类型、结构、机能和生物化学等方面研究有了很大的发展。在七十年代瑞典等国的生理学者实验室中，对运动员的某些肌群

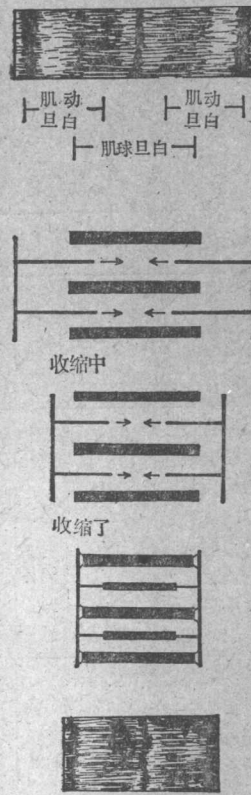


图 3 B. 肌肉收缩的机制

当肌肉收缩时，一条肌原纤维中一个单位内重叠着的粗丝和细丝（肌动蛋白和肌球蛋白）互相滑进。这就引起带形的密度变化（对上图和下图电子显微镜图象进行比较就可看出这种变化）

(如股四头肌、腓肠肌和三角肌等)进行了生理学和组织化学的研究,取得了一些有意义的成果,引起许多国家的教练员和运动员的注意,为运动生理学增添了新内容。根据国外的有关资料,把白肌和红肌、或快肌和慢肌的分类与名称基本上可以归纳为快缩肌纤维(FT)和慢缩肌纤维(ST),以及介于这两种之间的中间型肌纤维。

表 1 白肌和红肌的特点(依日本菊地)

	白 肌 (FT)	红 肌 (ST)
结 构	肌原纤维细 横纹多 前注细胞大 神经支配少	肌原纤维粗 横纹少 前注细胞小 神经支配多
机 能	属锥体系路径 担任姿势(位置)的调整 潜伏期短,反应快 易疲劳 短时间的收缩 兴奋性高 收缩强度小 呼吸氧化能力弱	属锥体外系路径 担任时相运动的调整 潜伏期长,反应慢 不易疲劳 持续收缩时间长 兴奋性低 收缩强度大 呼吸氧化能力强
生 物 化 学 成 份	肌红蛋白量少 线粒体少,小 蛋白质占 85% 糖元含量多 高能磷酸物含量多 肌酸和肌酸酐含量多 颗粒少 颗粒少	肌红蛋白量多 线粒体多,大 蛋白质占 75% 糖元含量少 高能磷酸物含量少 肌酸和肌酸酐含量少 颗粒多 颗粒多

人的每块骨骼肌都是上述三种不同的肌纤维混杂在一起的,所以只能说某块肌肉是某种肌纤维占优势。因此,人的骨骼肌的机能特点也就不只是受一种肌纤维的影响,而是几种肌纤维的综合影响。现将这两种肌纤维的结构、机能和生物化学成份作如下比较(见表 1)。

根据白肌和红肌的结构与机能特点,给运动生理学(如运动员速度和耐力等素质的训练,不同强度工作时肌肉内生物化学的变化,以及运动训练的手段与运动选材等问题),提供了许多理论依据。

有人报道,运动训练对各类肌纤维都有影响,影响的程度取决于运动项目的性质:如短跑运动员的白肌纤维可高达 92%,而长跑运动员的红肌纤维高达 90%(均在腓肠肌内取样,科斯蒂尔)。优秀短

距离游泳运动员在三角肌中有 70% 的白肌纤维和 30% 的红肌纤维,而优秀长距离游泳运动员的白肌纤维只占 9%,红肌纤维竟达 91%(康西尔曼,1977)。

多数人认为,在运动训练影响下各种类型肌纤维的数量并没有变化,改变的则是质量的改变。同时也认为,在中枢神经系统的影响下,通过运动实践,各种肌纤维的性能可以得到改造(阿斯特兰德, Astrand, 菊地邦雄, 罗达尔, Rodahl, 1975 等)。

第三节 肌肉收缩

肌肉的理化特性

展长性和弹性 肌肉具有展长性和弹性。肌肉的展长程度和外力(牵引或负重)并不成直线比例,而是负重逐渐增大,其长度的增加程度将逐渐减小。当外力除去后,肌肉也不是立即恢复其原来长度,这是由于肌浆的粘性较大所致。所以肌肉是一个既有展长性和弹性、又有高度粘性的组织。

兴奋性和收缩性 肌肉具有兴奋性、收缩性,即肌肉在刺激作用下能兴奋发生缩短的反应。肌肉的兴奋性和收缩性是紧密联系而又互不相同的两种基本生理特性。肌肉兴奋,

必然引起肌肉收缩，肌肉兴奋发生在前，肌肉收缩在后，两者不是同一性质的过程。在实验室里，可以对离体的神经-肌肉制备或动物的活体肌肉，用人工的刺激引起肌肉的兴奋和收缩。

肌肉的收缩

等张收缩和等长收缩 肌肉收缩是指肌纤维接受刺激后所发生的机械性反应。这种机械性反应有两种表现：一是肌纤维的长度缩短，一是肌纤维的张力增加。

肌肉在没有负重而能自由缩短的情况下收缩时，肌肉的长度缩短而张力没有改变。这种长度缩短而张力不变的收缩，称为等张收缩。

当肌肉在两端被固定或负有不能拉起的重量的情况下收缩时，肌肉的长度不可能缩短，只能产生张力。这种长度没有改变而张力增加的收缩，称为等长收缩。

机体在自然条件下进行活动时，不会产生单纯的等张收缩和等长收缩，而是既有张力改变又有长短改变的混合性收缩。在不负重的情况下，四肢的运动近于等张收缩，但也不是纯粹的等张收缩，因为即使未负重，肢体本身还具有一定的重量。在试图举起力所不及的重物时，近似等长收缩，但也不是纯粹的等长收缩，因为机体是多关节的结构，重物虽未举起，而身体本身会或多或少发生一些移动，关节或多或少会发生一些屈曲，肌肉的长度还会有所缩短。在动力性运动中，肌肉长度的缩短表现得很明显，而在静止用力中，张力的增加则表现得很明显。但动力性运动仍产生一定程度的张力，静止用力时仍产生肌肉长短的某些改变。

单收缩 肌肉接受一个短促的刺激(例如单个感应电震)，产生一次短促的收缩，称为单收缩。用记

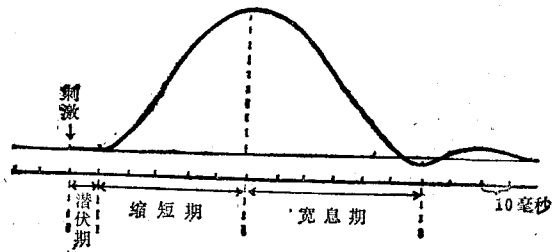


图4 肌肉单收缩曲线(蛙腓肠肌)

纹鼓可以记录单收缩的曲线(图4)。分析此曲线，可划分三个时期：(一)潜伏期，从施予刺激到肌肉开始缩短的一段时期，称为潜伏期。肌肉在此期产生兴奋电位及相应的化学过程。蛙腓肠肌的潜伏期约为10毫秒；(1毫秒= $\frac{1}{1000}$ 秒)(二)缩短期，是肌肉开始缩短到缩短达最大程度的一段时期。蛙腓肠肌缩短期为50毫秒；(三)宽息期，是从最大程度的缩短到恢复原状的一段时期。蛙腓肠肌的宽息期约为60毫秒。宽息期不是被动的放松，而是象缩短期一样，是主动过程，正如上面说过的，与肌肉内部的生物化学和物理化学过程相联系。

潜伏期、缩短期和宽息期时间的总和，是完成单收缩所需的全部时间。单收缩进行的速度，可以作为肌肉机能活动的指标。单收缩时间愈短，肌肉的机能活动也愈高。

单收缩进行的速度，决定于当时肌肉的机能状态。凡是影响肌肉机能状态的因素，都会影响完成单收缩所需的时间。

一块完整肌肉的单收缩强度，在一定范围内与刺激的强度有关系。随着刺激强度的增加，收缩程度也逐渐增大。当刺激强度增大到一定数值时，虽再增强刺激，单收缩强度也不会再行增大，这时的肌肉收缩叫最大收缩。达到引起最大收缩的那一强度的刺

激，叫最大刺激。一块完整肌肉的单收缩强度随刺激强度而增大的原因是，一块肌肉由许多肌纤维组成，刺激弱时，只能引起少数距刺激电极较近、较敏感的肌纤维收缩；随刺激强度增加，则有较多的肌纤维同时收缩。当肌肉中的全部肌纤维同时被引起收缩时，这就是最大的收缩。此外，肌肉收缩的强度不仅决定于刺激的强度，而且还决定于肌肉所处的各种条件和肌肉的机能状态。

强直收缩 单收缩是肌肉受一个单一刺激所引起的。在正常机体中，肌肉的单收缩

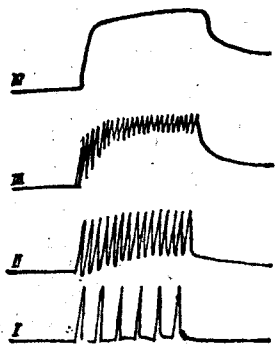


图 5 完全强直缩及不完全强直缩状态。I—单收缩；II及III—不完全强直；IV—完全强直。

是极少见的，因为在完整机体中，肌肉受中枢神经系统支配，从中枢神经系统沿运动神经中的神经纤维向肌肉传来的冲动是成排、成串的。当肌肉接受一系列彼此间隔时间很短的连续的兴奋冲动或刺激时，由于各个刺激间的时间间隔很短，后一个刺激都落在由前一刺激所引起的收缩尚未结束之前，就又引起了下一次收缩，因而在一连串的刺激过程中，肌肉得不到充分时间进行完全的宽息，而一直维持在缩短状态中（图 5 之 III、IV）。肌肉因这种成串刺激而发生的持续性缩短状态，叫强直收缩。引起强直收缩的刺激叫强直刺激。

如果强直刺激的频率不太高，相继的两个刺激中后者距前者的时间长于一次收缩的缩短期，那么，在强直曲线上仍可分辨出各刺激分别所引起的收缩波的波峰，这叫不完全强直或锯齿状强直（图 5 之 III）。如果刺激频率较高，相继的两个刺激相隔时间短，前一刺激所引起的收缩尚未发生宽息之前，后一刺激所引起的收缩即已开始，这时在强直曲线上便分辨不出每一个单收缩的波峰，即各次收缩发生了完全的融合，这就叫完全强直（图 5 之 IV）。

强直收缩曲线的高度，在一定范围内随着刺激频率和刺激强度的增加而增加。超过了一定限度后，刺激频率和强度的增加反使强直收缩曲线的高度降低。维金斯基将引起肌肉最大强直收缩的刺激称为良性刺激，将过频、过强、使强直收缩减弱的刺激称为劣性刺激（参看本章第四节）。维金斯基发现在良性刺激强度和良性刺激频率作用下，强直收缩曲线高度大大超过单收缩机械重叠所予期的效果，而在劣性刺激作用下，强直收缩曲线又远远小于单收缩的机械总和。所以强直收缩并不是许多同等大小的单收缩的机械总和，而是生理综合。因为肌肉接受一次刺激产生兴奋后，其兴奋性发生一系列变化。如果后一刺激引起的兴奋，发生于前一刺激引起的兴奋性升高的时期（超常期），则后一刺激引起的单收缩将比通常的大；若后一刺激引起的兴奋发生于前一刺激引起的绝对不应期或相对不应期（参看本章第四节），则后一刺激或者不能引起收缩，或者只能引起比通常小的单收缩。所以，强直收缩的大小不仅取决于刺激强度和刺激频率，也取决于肌肉的机能状态（兴奋性、机能活动性）。

负荷和初长度对肌肉收缩的影响 在离体肌肉标本上用同样的最大刺激来兴奋有负荷的肌肉，在负荷较轻的范围内，肌肉收缩所做的功将随负荷的逐渐加重而增大。当负荷达到一定限度后，若再加重负荷量，肌肉收缩时作的功将减小。这不仅说明，负荷可以影响肌肉收缩的作功能力，而且还说明要使肌肉达到最大效力，应给予一个适宜的负荷。