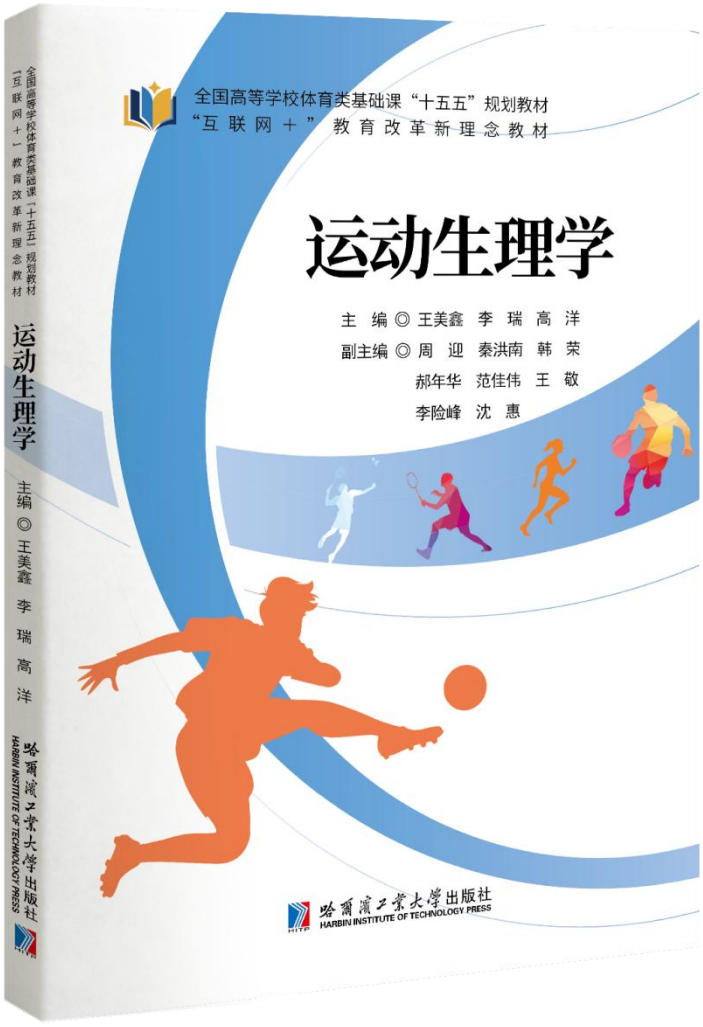
运 动 生 理 学



类目：体育类
书名：运动生理学
主编：王美鑫 李 瑞 高 洋
出版社：哈尔滨工业大学出版社
开本：正 16 开
书号：978-7-5767-3053-1
使用层次：通用
出版时间：2026 年 6 月
定价：49.80 元
印刷方式：双色
是否有资源：有

策划编辑：闻　竹
责任编辑：孙　晶
封面设计：旗语书装



运动生理学

YUNDONG SHENGLIXUE



ISBN 978-7-5767-1017-1
9 787576 730531 >
定价：49.80元

全国高等学校体育类基础课“十五五”规划教材
“互联网+”教育改革新理念教材
运动生理学
主编◎王美鑫　李　瑞　高　洋
哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

全国高等学校体育类基础课“十五五”规划教材
“互联网+”教育改革新理念教材

运动生理学

主　编◎王美鑫　李　瑞　高　洋
副主编◎周　迎　秦洪南　韩　荣
郝年华　范佳伟　王　敬
李险峰　沈　惠





哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

全国高等学校体育类基础课“十五五”规划教材
“互联网+”教育改革新理念教材

运动生理学

主　编◎王美鑫　李　瑞　高　洋
副主编◎周　迎　秦洪南　韩　荣
郝年华　范佳伟　王　敬
李险峰　沈　惠



哈爾濱工業大學出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书系统阐述了运动生理学的基础理论与应用实践。全书共有 9 个项目，内容涵盖运动生理学基础，生命活动的基本特征，血液，神经系统的调节功能，内分泌调节，免疫与运动，运动时的物质与能量代谢，有氧、无氧工作能力，身体素质等。全书兼顾经典理论与前沿成果，为运动训练和健身实践提供了科学支撑。

本书兼具理论深度与实践指导性，可作为体育专业学生的教材，也可供运动训练从业者及运动爱好者学习参考。

图书在版编目（CIP）数据

运动生理学 / 王美鑫，李瑞，高洋主编 . —哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2026. 6. —ISBN 978-7-5767-3053-1

Ⅰ. G804.2

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 20269LH443 号

策划编辑　闻　竹
责任编辑　孙　晶
出版发行　哈尔滨工业大学出版社
社　　址　哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号　邮编　150006
传　　真　0451-86414749
网　　址　http://hitpress.hit.edu.cn
印　　刷　三河市祥达印刷包装有限公司
开　　本　787 mm × 1 092 mm　1/16　印张　14.5　字数　292 千字
版　　次　2026 年 6 月第 1 版　2026 年 6 月第 1 次印刷
书　　号　ISBN 978-7-5767-3053-1
定　　价　49.80 元

（如因印装质量问题影响阅读，我社负责调换）

前　言

PREFACE

运动生理学作为人体生理学的重要分支，是研究人体在体育运动影响下机能活动变化规律及适应机制的核心学科，既是体育科学体系的基础理论支撑，也是指导科学训练、全民健身与运动康复的重要实践依据。随着现代体育科学与生命科学的深度融合，运动生理学的研究已深入细胞、分子水平，新的研究技术与成果不断涌现，为学科发展注入了新的活力，也对教材与书籍的编写提出了更高的要求——既要坚守经典理论的科学性与系统性，又要吸纳前沿研究成果，兼顾理论深度与实践导向。

书中开篇立足运动生理学基础，清晰阐释运动生理学的核心概念，深入剖析生命活动的基本特征，详解机体内环境与稳态的核心原理，系统梳理人体生理功能活动的调节机制及反馈与前馈调节模式，为后续学习奠定扎实的理论根基。

首先，本书聚焦生命活动基本特征与肌肉活动，深入探讨运动与骨骼肌的关联，解析肌纤维的结构与功能特性，阐述骨骼肌的收缩形式、收缩原理及力学特征，厘清肌纤维类型与运动能力的内在联系，助力读者理解肌肉运动的生理本质。

其次，本书分别讲解血液的组成、理化特性、功能及运动对血液的影响；神经系统的组成细胞及功能、功能活动的基本原理、感觉分析功能及对姿势和运动的调节；内分泌与激素的核心知识、主要内分泌腺功能及运动对内分泌功能的影响；免疫学基础及运动与免疫的相互作用；运动过程中物质代谢与能量代谢的规律，以及能量代谢的测量与计算方法。

最后，本书落脚于运动实践核心能力，详解有氧工作能力与无氧工作能力的相关知识，并全面覆盖力量、速度、耐力、平衡、灵敏性、柔韧性和协调性等关键身体素质的生理机制。

本书的特色模块如下。

1. 理论架构系统完整

以基础理论为起点，循序渐进地搭建运动生理学知识体系，涵盖核心概

念和生命活动特征等基础内容。

2. 聚焦肌肉运动本质

围绕骨骼肌相关内容展开深入讲解，清晰解析肌纤维的结构功能、收缩原理与形式，厘清肌纤维类型与运动能力的关联，助力读者精准把握肌肉运动的生理机制。

3. 多系统整合视角

整合血液、神经、内分泌、免疫等多系统与运动的相互作用，全面呈现运动状态下人体多系统的协同调节规律，拓宽读者对运动生理过程的整体认知。

4. 理论实操深度融合

设置能量代谢专项内容，不仅深入探讨运动时的物质与能量代谢规律、代谢测量与计算方法，同时还详解有氧工作能力、无氧工作能力及各类身体素质的生理机制。

本书可作为体育教育、运动训练、运动人体科学等专业的核心教材，也可作为教练员、运动员、健身指导人员及体育科研工作者的参考用书。我们深知，学科发展日新月异，尽管编写过程中反复推敲、精益求精，吸纳了众多专家、学者的研究成果与教学经验，但限于我们的学识水平，书中难免存在疏漏与不足，恳请广大读者、同行与专家批评指正，以期不断完善，共同推动运动生理学学科的发展与普及，为我国体育事业的高质量发展提供坚实的理论支撑。

编　　者

2026 年 3 月

目　录
Contents

项目1　运动生理学基础 …… 001

任务 1.1　运动生理学的概念 …… 002

任务 1.2　生命活动的基本特征 …… 008

任务 1.3　机体内环境与稳态 …… 012

任务 1.4　人体生理功能活动的调节 …… 016

项目2　生命活动的基本特征 …… 022

任务 2.1　运动与骨骼肌 …… 023

任务 2.2　肌纤维的结构及功能 …… 030

任务 2.3　骨骼肌的收缩形式 …… 038

任务 2.4　肌纤维的收缩过程 …… 044

项目3　血液 …… 050

任务 3.1　血液的组成和理化特性 …… 051

任务 3.2　血液的功能 …… 057

任务 3.3　运动对血液的影响 …… 062

项目4　神经系统的调节功能 …… 068

任务 4.1　组成神经系统的细胞及其一般功能 …… 069

任务 4.2　神经系统功能活动的基本原理 …… 075

任务 4.3　神经系统的感觉分析功能 …… 084

任务 4.4　运动生理学的概念 …… 094

项目5　内分泌调节 …… 103

任务 5.1　内分泌与激素 …… 104

任务 5.2 主要内分泌腺的功能 …… 110
任务 5.3 运动与内分泌功能 …… 119

项目6 免疫与运动 …… 127
任务 6.1 免疫学基础 …… 128
任务 6.2 运动与免疫 …… 134

项目7 运动时的物质与能量代谢 …… 146
任务 7.1 物质代谢 …… 147
任务 7.2 能量代谢 …… 168
任务 7.3 运动时能量代谢的测量与计算 …… 175

项目8 有氧、无氧工作能力 …… 182
任务 8.1 有氧工作能力 …… 183
任务 8.2 无氧工作能力 …… 196

项目9 身体素质 …… 203
任务 9.1 力量素质 …… 204
任务 9.2 速度素质 …… 211
任务 9.3 耐力素质 …… 215
任务 9.4 平衡、灵敏性、柔韧性和协调性 …… 218

参考文献 …… 226



项目 1

运动生理学基础



项目导读

运动生理学是探究人体运动相关生理规律的核心学科，从运动生理学的核心定义、研究方法，到人体生命活动的五大基本特征，再到内环境稳态的维持及生理功能的各类调节系统，其知识贯穿人体生命活动与运动实践的全过程。本项目围绕四大核心内容，通过情境探究、小组协作等方式，引导学生系统掌握运动生理学基础知识点，理解人体生理活动的核心规律，为后续深入学习运动相关生理知识、指导运动实践奠定坚实的基础。

学习目标

知识目标

1. 掌握运动生理学的概念、研究对象、任务及研究方法。
2. 理解生命活动的五大基本特征的核心内涵及区别。
3. 明确内环境的定义、稳态的意义及生理机能的调节方式。
4. 掌握三类生理功能调节系统的定义及核心特点。

能力目标

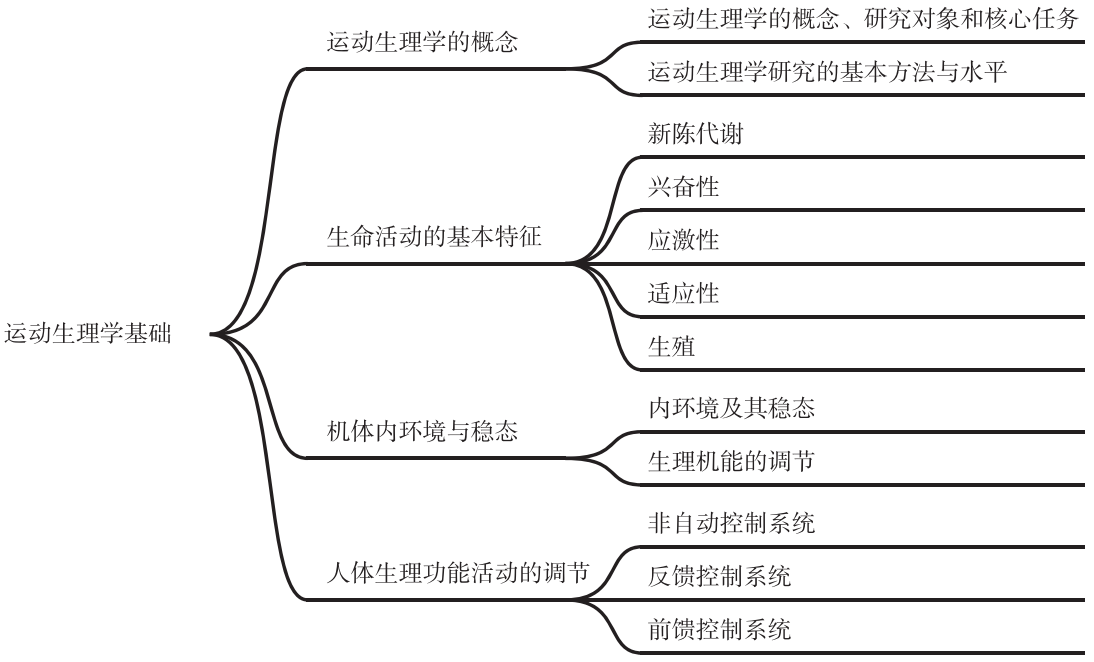
1. 能准确阐述知识点及其内在关联。
2. 能结合日常情境解读生命活动的特征及生理调节机制。
3. 具备区分易混淆知识点（如兴奋性与应激性）的能力。

素养目标

1. 培养严谨的科学思维，尊重生理学的客观规律。

2. 树立理论联系实际的意识，学会用知识解读生活。
3. 培养自主探究能力，养成梳理知识、总结反思的习惯。

思维导图



任务 1.1 运动生理学的概念

任务描述

当运动员进行高强度训练时，心率会加快、肌肉会疲劳，而长期科学训练又能让心肺功能增强、运动耐力提升，这些现象背后都藏着运动生理学的奥秘。本节任务中，我们将从运动生理学的核心概念入手，探究其研究对象、核心任务及基本方法，为后续学习人体运动相关的生理规律奠定基础。

任务分析

本节任务的核心是掌握运动生理学的概念、研究对象和核心任务，理解其研究的基本方法与不同研究水平的特点，重点明确概念的核心内涵以及各研究方法、研究水平的区别与联系，达成能清晰梳理两个模块的逻辑，准确阐述核心知识点，为后续生理知识学习搭建框架的目标。

知识梳理

运动生理学以运动状态下的人体为研究对象，其核心是揭示运动过程中人体各系统机能变化规律与长期训练带来的机体适应机制，依靠多层级实验、现场测试等方法开展研究，学习其概念、研究任务与研究层次，能够搭建人体运动生理知识框架，为科学运动训练打下理论基础。

1.1.1　运动生理学的概念、研究对象和核心任务

1. 运动生理学的基础概念

（1）生理学。

生理学作为生命科学的重要分支，主要研究生物体的各类生命现象，重点探索机体各组成部分的功能，以及实现这些功能的内在机制。根据研究对象的不同，生理学可分为细胞生理学、植物生理学、人体生理学等多个分支。

（2）人体生理学。

人体生理学聚焦人体生命活动的现象与规律，主要研究正常状态下人体内各细胞、器官、系统的具体功能，以及在整体层面上各器官、系统之间的协同配合过程，探讨人体如何适应外界环境的变化，揭示其背后的规律与机制。

（3）运动生理学。

运动生理学隶属于人体生理学，是体育科学中重要的应用基础理论学科。其核心是研究人体的运动能力，以及人体对运动的反应与适应过程，重点剖析运动时人体各细胞、器官、系统的机能变化及其协同工作的能力与内在机理，同时关注运动对人体形态和机能所产生的适应性影响。

2. 研究对象

运动生理学的研究对象围绕人体与运动的关联展开，具体包括运动过程中人体各细胞、器官、系统的机能变化特点；各器官、系统在运动过程中的协同工作机制；人体运动能力的形成与发展规律；运动对人体形态、机能产生适应性变化的具体表现及内在逻辑。

3. 核心任务

在掌握人体生命活动基本规律的基础上，运动生理学的核心任务主要有以下几点：揭示体育运动对人体机能影响的规律及内在机理，明确运动与人体机能变化的关联；阐明运动训练、体育教学和运动健身过程中的生理学原理，为相关实践提供理论支撑；指导不同年龄、性别、训练程度的人群开展科学运动锻炼，满足多样化需求。最终实现提高竞技运动水平、增强体质、延缓衰老进程、提升工作效率和生活质量的目标。

1.1.2 运动生理学研究的基本方法与水平

实验研究法是运动生理学研究的基本方法。研究者通过实验观察和分析人体在运动过程中机能活动的变化过程及其因果关系。

1. 运动生理学研究的基本方法

根据生物进化观点，人与动物（特别是哺乳动物）有许多结构和功能上的相似之处。因此，可用动物实验研究结果间接地探讨人体的生理功能变化及其机制。

（1）动物实验。

在生理学及运动生理学的研究中，动物实验是不可或缺的核心研究手段，根据实验周期、操作方式及研究目的，其主要分为慢性动物实验和急性动物实验两大类。

① 慢性动物实验。慢性动物实验以完整、清醒、健康的动物机体为实验载体，实验前需对动物进行一段时间的适应性饲养，待其机体状态稳定后，通过摘除、破坏或植入探针等方式处理特定器官，随后长期观察该器官的生理功能、活动规律，以及其与机体其他系统的协同作用。此类实验能更贴近机体正常生理状态，所得结果更具持续性和参考价值。例如，通过切除动物的肾上腺，观察其运动耐力、应激反应的变化，为运动生理学中“内分泌系统与运动能力关联”的研究提供数据支撑。

② 急性动物实验。急性动物实验具有操作便捷、实验周期短的特点，可进一步分为在体实验和离体实验。在体实验需先对动物进行麻醉处理，或破坏其神经中枢高级部位以消除意识干扰，再通过解剖暴露目标器官，直接观察该器官在机体完整状态下的功能表现及调节机制；离体实验则是从活的或刚处死的动物体内快速摘取目标器官、组织或细胞，将其置于模拟体内生理环境的人工培养液中，严格控制温度、pH、氧气浓度等条件，通过检测组成成分、代谢产物等观察其生理活动规律，为解析器官、细胞的独立功能提供精准依据。

需要明确的是，当前生理学与运动生理学领域的诸多核心知识均来自大量规范的动物实验。动物实验为两门学科的理论体系构建、研究突破提供了不可替代的支撑。但需重点注意的是，人类与动物在机体结构、生理功能、代谢机制等方面存在显著差异，尤其是在运动生理学研究中，人体的运动调节能力、运动适应特点与动物存在本质区别。因此，在应用动物实验结论时，必须充分考量这种物种差异，结合人体生理特征进行合理推演和验证，不可简单地生搬硬套，确保研究结论的科学性、适用性，为运动生理学的实践应用奠定可靠基础。

（2）人体实验。

除动物实验外，人体实验也是运动生理学研究中常用且核心的研究方法。其以人体为直接研究对象，能更直接、精准地反映运动对人体生理机能的影响，所得结论更具针对性和实践价值，是连接理论研究与运动实践的重要桥梁。根据测试环境

和操作方式的不同，运动生理学中的人体实验主要分为实验室测试法和运动现场测试法两大类，两种方法各有优劣，相辅相成，共同支撑运动生理学研究的开展。

① 实验室测试法。实验室测试法以可控性强、测试精度高为核心特点，研究时需让受试者进入标准化实验室，按照预设的研究目的、严格的实验设计制订运动方案，让受试者在跑台、功率自行车等专业设备上完成规定运动。在实验过程中，借助生理记录仪、气体代谢分析仪、肌电仪等精密仪器，实时监测并记录受试者运动过程中的心率、血压、血氧饱和度、乳酸浓度、肺通气量等各项生理指标的动态变化。通过对比分析不同运动强度、运动形式下指标的差异，明确运动对人体呼吸、循环、代谢、神经等系统生理机能的具体影响，为运动方案的科学设计提供精准的数据支撑，广泛应用于运动强度界定、运动疲劳机制等基础研究中。

② 运动现场测试法。运动现场测试法则强调研究的真实性和实用性，无须将受试者置于实验室环境，而是在运动员训练、比赛等真实运动现场，直接监测其运动前、运动中及运动后恢复过程中的相关生理机能变化。该方法能真实反映不同运动项目的生理特点，以及不同年龄、训练水平的人群在完成同一运动项目时的生理反应差异。例如，在田径赛场用心率遥测仪实时监测运动员长跑过程中的心率变化，可直观掌握其运动强度与心率的关联，为训练强度的调整提供依据。但该方法也存在明显局限性，运动现场的温度、湿度、风速等环境因素难以精准控制，且运动过程中受试者的动作幅度、发力状态等存在不确定性，导致测试难度较大、数据稳定性略低于实验室测试法，因此在运动生理学研究中往往受到实验条件的限制，常与实验室测试法结合使用，以实现研究的科学性与实用性的统一。

【知识前沿】

运动生理学中的人体实验法的核心是通过直接对人体进行有控制的观察与测试，揭示运动与生理机能之间的因果关系，是连接理论研究与运动实践的核心桥梁，其分类（实验室测试法、运动现场测试法）的划分逻辑，本质是“控制条件”与“实际场景”的平衡取舍。两种方法并非相互独立，而是互补共生，共同支撑运动生理学研究的落地，同时在应用中需兼顾科学性、安全性与实用性。

2. 运动生理学研究的水平

运动生理学的研究根据研究任务和实验对象的不同，可分为三个层次，分别是整体水平、器官和系统水平、细胞和分子水平。其中，整体水平、器官和系统水平的研究属于宏观研究范畴，侧重从机体整体及各系统协同层面开展探索；细胞和分子水平的研究属于微观研究范畴，聚焦机体微观结构的机能变化，三者相互补充、层层递进，构成了运动生理学完整的研究体系。

（1）整体水平研究。

整体水平研究是运动生理学研究的重要组成部分，其核心是在整体层面上，研究人体在特定环境条件下运动时的机能变化规律、各器官与系统之间的相互作用关系，以及人体对运动的长期和短期适应过程。该研究始终将人体视为一个有机整体，不孤立看待单个器官或系统的功能，重点关注运动时各系统的协同配合效应。例如，研究人体在有氧运动过程中，心血管系统的泵血功能、呼吸系统的气体交换功能、内分泌系统的激素调节功能、物质与能量代谢的动态变化，以及肌肉组织的摄氧和用氧能力等多方面的协同变化，同时探究这些变化如何共同影响人体的运动耐力、运动表现，以及长期运动后人体整体机能的适应性改变，均属于整体水平的研究范畴。

（2）器官、系统水平研究。

人体运动时的整体机能表现，本质上是各器官、系统机能水平提升及密切协同配合的结果，因此探讨人体运动时的机能变化必须深入研究各器官、系统的具体功能特点。器官、系统水平研究，主要聚焦单个器官或系统，探究其在运动过程中的机能变化特征、变化的发生发展机制、影响变化的条件及制约因素，以及这种变化对人体整体运动机能的影响。例如，运动过程中心血管系统会出现明显的机能调整，表现为心率加快、血压升高、心输出量增加。通过实验探究引起这些生理指标变化的核心因素（如神经调节、体液调节的作用）、变化的时间规律及与运动强度的关联，这类研究就属于典型的器官、系统水平研究，为理解整体运动机能变化提供了重要的局部理论支撑。

（3）细胞、分子水平研究。

器官由具有特定功能的细胞群构成，各器官、系统的生理机能取决于这些细胞群的功能状态，而细胞的生理功能又依赖于构成细胞的各类生物分子的作用，因此细胞、分子水平的研究是运动生理学微观研究的核心。该水平的研究主要聚焦运动时细胞内各亚微结构（如线粒体、内质网、核糖体等）的机能变化，以及细胞内各类生物分子（如蛋白质、核酸、酶等）的特殊理化变化过程，从微观层面揭示运动影响人体机能的本质机制。目前，在运动生理学领域中，关于大负荷运动后骨骼肌超微结构的损伤与修复、骨骼肌收缩蛋白和骨架蛋白的组成变化、线粒体的能量代谢功能改变、生物膜的通透性变化及酶系统的活性调节等相关研究均属于细胞、分子水平研究，为宏观研究提供了微观层面的理论依据，推动了运动生理学研究向精准化、深层次发展。

【课堂讨论】

结合运动生理学的研究水平与研究手段，谈一谈如何更科学地探究运动对人体机能的影响。

3. 宏观研究和微观研究的关系

运动生理学的宏观研究（整体水平、器官和系统水平）与微观研究（细胞和分子水平）并非相互独立，而是相辅相成、辩证统一的关系，二者共同推动运动生理学研究的深入发展，缺一不可。

（1）从宏观水平研究深入到微观水平研究。

从宏观水平研究向微观水平研究延伸是运动生理学学科发展的必然要求和重要趋势。宏观水平研究主要聚焦于人体整体及各器官与系统的机能表现，能直观反映运动对人体的整体影响，但无法揭示这些机能变化和形态适应背后的本质机制。例如，仅通过整体水平观察到运动可提升人体耐力，却无法明确耐力提升与细胞能量代谢、酶活性变化的关联。因此，运动生理学研究必须突破宏观层面的局限，深入细胞和分子水平，探究运动训练和健身过程中人体机能变化的内在机理，为宏观研究的现象提供科学的微观解释，推动学科研究向精准化、深层次发展。

（2）宏观研究指导微观研究。

细胞和分子水平的微观研究具有直接、客观的优势，可精准分析某一局部生理现象的发生机制，但也存在一定局限性。微观研究中采用的单个或少数几个指标，往往只能解释孤立的微观生理现象，难以反映机体整体的生理状态，易出现研究视角的片面性和完整性不足的问题。因此，运动生理学研究不能只重视微观研究，必须以宏观研究为指导，明确微观研究的方向和重点，再将微观研究的结果进行综合分析，回归整体水平解读人体机能的变化。以运动性疲劳研究为例，当整体水平研究无法充分解析疲劳产生的原因时，研究者便将研究深入到细胞和分子层面，探究细胞物质能量代谢、酶活性、肌纤维组成、生物膜功能及细胞内蛋白质结构等变化，从多个微观角度挖掘疲劳成因，最终为整体水平阐明运动性疲劳的机制提供坚实的理论依据。

综上所述，在运动生理学研究中，宏观研究为微观研究指明方向、提供整体视角，微观研究为宏观研究补充机理、夯实理论基础，二者相互支撑、不可偏废，共同构成了运动生理学完整、系统的研究体系。

任务实施

（1）学生自由分组，每组 5 人，选出 1 名小组负责人。

（2）组员 1 负责梳理“从宏观水平研究深入到微观水平研究”的必要性及核心逻辑，明确其对运动生理学发展的意义；组员 2 负责梳理“宏观研究指导微观研究”的内涵，微观研究的优缺点，提炼二者的内在关联；组员 3 负责结合运动性疲劳的研究案例，拆解宏观与微观研究的具体应用及相互支撑关系；组员 4 负责整合以上内容，总结二者相辅相成、不可偏废的核心原则，最后共同讨论总结，完成知识点梳理与案例分析，确保全员掌握宏观与微观研究的关系，能结合案例解读二者的协

同作用，达成任务探究目标。

（3）将梳理内容与改进建议制作成 PPT，小组负责人在课堂上汇报。

（4）教师按表 1–1 的评分标准打分。

表 1–1　活动评价表

评价标准	分值	得分	备注
资料搜集充分、全面	30		
分析和总结准确、到位	30		
PPT 制作精美，讲解流畅、通顺	20		
小组成员积极参与、密切配合	20		

任务 1.2　生命活动的基本特征

任务描述

我们每天吃饭吸收营养，运动消耗能量，受伤后伤口慢慢愈合，长期运动后耐力逐渐提升，见到强光会下意识眯眼，这些日常现象本质上都是人体生命活动基本特征的体现。本节任务中，我们将探究新陈代谢（metabolism）、兴奋性（excitability）、应激性（irritability）、适应性（adaptability）、生殖（reproduction）等五大生命活动的基本特征，读懂生命活动的核心规律，为后续生理调节相关知识的学习筑牢基础。

任务分析

本节任务的核心是掌握新陈代谢、兴奋性、应激性、适应性、生殖五大生命活动基本特征的核心内涵，明确各特征的定义、核心特点及典型表现，重点区分易混淆的兴奋性与应激性，理解五大特征的内在关联，达到能结合日常情境解读各类特征、清晰梳理模块逻辑、准确阐述核心知识点的目标。

知识梳理

生物体的生命现象主要表现为以下五个方面的基本特征，即新陈代谢、兴奋性、应激性、适应性和生殖。

1.2.1　新陈代谢

新陈代谢是生物体自我更新最基本的生命活动过程，也是生命活动的核心特征，

贯穿于生物体生命活动的全过程，一旦新陈代谢停止，生物体的生命活动即终止。新陈代谢的核心是同化过程（assimilation）与异化过程（dissimilation）的对立统一，二者相互依存、同时进行，共同完成机体的自我更新。

同化过程又称合成代谢（synthesis），是指生物体不断从体外环境摄取有用物质，通过一系列生物化学反应将其合成、转化为机体自身组成物质的过程，该过程需要消耗能量，为机体生长、修复和功能维持提供物质基础。异化过程又称分解代谢（catabolism），是指生物体将体内自身组成物质不断分解，将分解产物排出体外，同时释放能量，为机体各项生命活动（包括运动、呼吸、代谢调节等）提供能量支持的过程。

在新陈代谢过程中，物质代谢（material metabolism）与能量代谢（energy metabolism）始终同时进行、不可分割，是同一过程的两个方面。任何物质都蕴含一定能量，物质的合成与分解必然伴随能量的吸收、释放、转移和利用，而能量的转移也必定依托于物质的转化过程。此外，生物体内同化与异化过程所涉及的一系列复杂生物化学反应均依赖酶的催化作用得以高效、有序地进行，酶的活性直接影响新陈代谢的速率与效率，进而影响机体的生理机能与运动能力。

1.2.2　兴奋性

机体所处的环境是经常变化的，在正常生理状态下，机体能够精准感受外界环境变化的刺激，并及时做出适当的反应，以维持自身生理功能的稳定，这一过程依赖于机体可兴奋组织的兴奋性。

在生物体内，可兴奋组织具有感受刺激、产生兴奋的特性，这一特性被称为兴奋性。能引起可兴奋组织产生兴奋的各种环境变化，称为刺激（stimulus）。神经、肌肉和腺体等组织具有较高的兴奋性，受刺激后能迅速产生可传导的动作电位，即发生兴奋，因此这类组织被称为可兴奋组织。在生理学中，将可兴奋组织接受刺激后所产生的生物电反应过程及表现，称为兴奋（excitation）。可见，可兴奋组织感受刺激、产生兴奋的能力高低直接反映了该组织兴奋性的强弱。

可兴奋组织有两种基本的生理活动过程，二者对立统一、相互协调。一种是由相对静止状态转变为活动状态，或者兴奋性由弱变强，这类活动称为兴奋活动；另一种是由活动状态转变为相对静止状态，或者兴奋性由强变弱，这类活动称为抑制（inhibition）活动。人体的各种生理功能活动均是兴奋活动与抑制活动共同作用的结果，二者既相互对抗又相互协调，且在一定条件下可相互转化。兴奋和抑制作为对立统一的生理活动过程，共同维持机体生理功能的有序进行，也是运动生理学研究中探讨机体运动反应与适应的重要基础。

【案例分析】

小明进行 10 min 快速跑步后，呼吸急促、出汗增多，小腿肌肉有酸胀感；休息片刻后酸胀感逐渐缓解，呼吸恢复平稳。

思考：

1. 在跑步过程中，小明身体的同化与异化过程发生了怎样的变化？这体现了物质代谢与能量代谢的什么关系？

2. 跑步时肌肉收缩、神经传导兴奋，体现了可兴奋组织的哪些特性？肌肉酸胀与新陈代谢的哪个过程相关？

1.2.3 应激性

兴奋性与应激性是两个密切相关但又存在本质区别的生理学概念。人体内各种组织对外界环境变化（刺激）的反应存在差异：可兴奋组织（肌肉、腺体、神经等）受到刺激后可产生兴奋，其表现形式各有不同，如肌肉组织表现为收缩，腺体组织表现为分泌；神经组织则表现为产生并传导神经冲动；而上皮、骨骼等不可兴奋组织受到刺激后无法产生兴奋，但可引起细胞代谢改变等反应，这种代谢层面的变化也是机体对刺激的一种应答。

机体或一切活体组织对周围环境变化具有发生反应的能力或特性，称为应激性。活体组织应激性的表现形式具有多样性，既可以是可兴奋组织特有的生物电活动，也可以是细胞代谢变化、形态改变等非生物电形式的反应，它是所有活体组织都具备的基本生命特性。而兴奋性则是一个更具特异性的概念，它仅指可兴奋组织受到刺激后发生生物电变化（产生动作电位）的过程，是应激性的一种特殊表现形式。

二者的关系可总结为：具有兴奋性的组织（可兴奋组织）必然具有应激性，因为其生物电活动本身就是应激性的表现之一；而非可兴奋组织仅具有应激性，只能通过细胞代谢变化等形式对刺激做出反应，无法产生兴奋性所特指的生物电变化，因此不具备兴奋性。明确二者的区别与联系是准确理解机体对刺激反应机制的重要基础。

【课堂讨论】

结合实例，说一说兴奋性与应激性的核心区别。

1.2.4 适应性

生物体长期生存在某一特定的生活环境中，在客观环境的持续影响下，可逐渐形成一种与环境相适应、适合自身生存的反应模式。生物体所具有的这种适应环境、维持自身生存与发展的能力，称为适应性。适应性是生物体在长期进化和个体生长过程中形成的

扫一扫

适应性

重要生理特性，是机体应对环境变化、保障生命活动正常进行的重要基础，也是运动生理学研究中探讨人体运动适应机制的核心内容之一。

适应性的表现形式具有多样性，可体现在机体形态、生理机能等多个层面，且与环境条件密切相关。例如，长期居住在高原地区的居民，由于高原环境缺氧，其机体通过长期调节，血液中的红细胞数量远远超过平原地区居民。这种适应性反应对高原居民的生存至关重要，红细胞数量增多能显著提高血液运输氧气的能力，有效克服高原缺氧给人体带来的乏力、缺氧等不良影响，为机体在缺氧环境中正常生存创造了必要条件。

在运动领域，适应性表现得更为突出。运动员经过长期系统的专项训练，机体可产生针对性的适应变化：长期力量训练可使骨骼肌的横截面积增大、肌纤维增粗，进而使肌肉力量和体积显著增加；长期耐力训练可改善肌肉的有氧代谢能力、提升心肺功能，增强机体的抗疲劳能力。这些变化均是人体对运动环境、训练刺激产生适应性反应的结果，也是运动训练提升运动能力的生理基础。

1.2.5　生殖

生物的生命具有有限性，无法实现永恒存续，因此必须通过生殖过程进行自我复制和繁殖，使生命过程得以延续，这是生物体维持物种繁衍的核心方式。对于人体而言，当发育到一定生理阶段，男性和女性的生殖细胞发育成熟，在适宜的环境条件下相互结合，便可孕育出与亲代相似的子代个体，这一生理过程即为生殖。

生殖是生命最基本的活动之一，是所有生物物种得以延续的根本保障，也是人体生理活动的重要组成部分。但随着近几年生物技术的快速发展，克隆技术的出现和应用打破了传统生殖模式的局限，使生命复制无须通过生殖细胞结合即可实现，这一技术突破使传统的生殖理论、伦理观念受到了重大挑战，也为生命科学及运动生理学相关领域的研究带来了新的思考与探索方向。

任务实施

（1）学生自由分组，每组 5 人，选出 1 名小组负责人。

（2）组员 1 负责梳理新陈代谢的核心内涵、同化与异化过程及物质与能量代谢的关系；组员 2 负责梳理兴奋性、应激性的定义、核心区别及可兴奋组织的特点；组员 3 负责梳理适应性、生殖的核心定义，提炼典型实例（高原居民适应、运动员训练适应等）；组员 4 负责整合五个特征的内在关联，明确各特征在生命活动中的作用，区分易混淆知识点（如兴奋性与应激性），最后共同讨论总结，完成知识点梳理与实例分析，确保全员掌握五个生命活动基本特征的核心内容，能区分易混淆概念、结合实例解读特征内涵，达成任务探究的目标。

（3）将梳理内容与改进建议制作成 PPT，小组负责人在课堂上汇报。

（4）教师按表 1–2 的评分标准打分。

表 1–2　活动评价表

评价标准	分值	得分	备注
资料搜集充分、全面	30		
分析和总结准确、到位	30		
PPT 制作精美，讲解流畅、通顺	20		
小组成员积极参与、密切配合	20		

任务 1.3　机体内环境与稳态

任务描述

我们运动后会大量出汗、口渴，补充适量水分后身体又能恢复舒适，即便外界温度、饮食发生变化，体内的温度、血糖等指标也能保持相对稳定，这背后离不开机体内环境稳态的维持，以及生理机能的精准调节。本节任务中，我们将探究内环境与稳态的核心内涵，解锁生理机能的调节方式，理解机体如何适应内外环境的变化，维持正常生命活动。

任务分析

本节任务是掌握内环境及其稳态的定义、核心特点，理解生理机能的主要调节方式，重点明确内环境的组成、稳态的意义，以及各类生理机能调节的核心逻辑，厘清两个子模块的内在关联，达成能结合日常情境解读内环境稳态的维持及生理机能调节过程、准确阐述核心知识点的目标，为后续体液调节、反馈控制等知识的学习奠定基础。

知识梳理

细胞外液构成人体内环境，稳态指内环境理化性质相对稳定的状态，是生命活动正常开展的基础。机体依靠神经、体液、自身三种调节方式协同调控，运动出汗、补水等场景均是稳态调节的典型体现，三类调节相互配合，共同抵御内外环境波动，维持机体平衡，这也是后续体液、反馈调节内容的理论基础。

1.3.1　内环境及其稳态

人体是由各类细胞、组织和器官共同组成的有机整体，各组成部分的生理活动在

空间和时间上紧密配合、相互协调，共同维持机体的正常生命活动。人体细胞、组织并不直接与外界环境接触，而是共同生存于细胞外液中，细胞外液成为细胞与外界环境进行物质交换的媒介。细胞新陈代谢所需的营养物质由细胞外液提供，细胞代谢产生的废物也排放到细胞外液中，再通过细胞外液与外界环境完成物质交换。因此，细胞外液被称为机体的内环境（internal environment），以此区别于整个机体所生存的外界环境。

细胞的正常生存与功能发挥要求内环境的各项理化因素（如温度、pH、渗透压、营养物质浓度等）保持相对稳定。需要明确的是，内环境的理化性质并非绝对静止不变，而是在各种物质不断交换、转化过程中，维持着相对平衡的动态状态，这种动态平衡状态被称为稳态（homeostasis）。

细胞持续进行新陈代谢，而新陈代谢过程本身会不断扰乱内环境的稳态。尤其在运动过程中，人体代谢速率显著加快，部分代谢产物（如乳酸）急剧增多，可能导致内环境的理化性质发生急剧变化；同时，外界环境的剧烈变化（如高温、低温、缺氧等）也会对稳态产生影响。为此，必须持续对机体的血液循环、呼吸、消化、排泄等生理功能进行调节，及时清除代谢废物，补充营养物质，从而维持内环境的相对稳定，为细胞正常生理活动提供保障。

稳态是一种复杂的动态平衡过程：一方面，细胞代谢等过程不断破坏稳态的平衡状态；另一方面，机体通过神经调节、体液调节等多种调节机制，及时纠正稳态的偏差，使其重新恢复平衡。总之，整个机体的生命活动正是在稳态不断受到影响，又不断得到维持的循环过程中，得以顺利进行的。稳态的维持也是运动生理学研究中探讨机体运动适应、保障运动能力的重要生理基础。

1.3.2　生理机能的调节

机体与外界环境之间保持相互联系和彼此影响，人体对内、外环境变化能产生适应性反应，正是因为人体具有十分完善的调控机制，可对各种生理功能进行相应调节。人体内环境相对稳定及生物节律的维持，显然也是通过体内调控机制实现的。人体各种生理机能的调节，主要通过神经调节（neuroregulation）、体液调节（humoral regulation）、自身调节（autoregulation）和生物节律（biorhythm）四种途径实现。

1. 神经调节

神经调节是指在神经活动的直接参与下所实现的生理功能调节过程，是人体最重要的调节方式。神经活动的基本过程是反射（reflex），如图 1-1 所示，反射活动的结构基础是反射弧（reflex arc）。反射弧包括感受器（receptor）、传入神经纤维（afferent nerve fiber）、反射中枢（reflex center）、传出神经纤维（efferent nerve fiber）和效应器（effector）五个环节。各环节功能明确、协同作用：感受器能接收刺激并产生神经冲动；传入神经将感受器所产生的神经冲动传入反射中枢；反射中枢位于

脑和脊髓，能对各种刺激进行分析判断并产生反应信息；传出神经将反射中枢的反应信息传递至效应器；效应器对刺激产生相应的生理反应。例如，当血液中氧分压下降时，颈动脉体等化学感受器感受到血氧浓度下降的信息而发生兴奋，通过传入神经将信息传至呼吸中枢并使之兴奋，再通过传出神经使呼吸肌运动加强，吸入更多氧气使血液中氧分压回升，从而维持内环境的稳态。需要注意的是，反射弧的任何一个部分的结构或功能受到损伤，反射活动都无法完成。

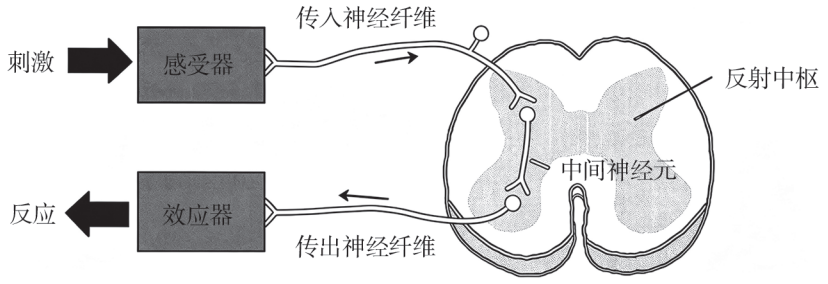


图 1–1　反射弧示意图

反射活动分为非条件反射（unconditioned reflex）和条件反射（conditioned reflex）两类。非条件反射是人体先天具有的维持生命的基本反射活动，其反射弧和反应都是固定的，如膝跳反射、吞咽反射等；条件反射是后天通过学习获得的，是个体在生活过程中逐渐建立起来的反射活动，具有灵活性和适应性，如望梅止渴、谈虎色变等。

神经调节具有反应快、准确、作用时间短的特点，能快速应对内、外环境的突发变化，保障机体生理功能的即时稳定。

2. 体液调节

人体血液和其他体液中的某些化学物质可借助血液循环的运输到达全身或特定器官、组织，引起特殊的生理反应，这种通过体液运输实现的调节过程，称为体液调节。参与体液调节的化学物质主要包括三类：一是内分泌腺分泌的激素（hormone），如胰岛素、肾上腺素等；二是某些组织或细胞产生的化学物质，如组胺、5– 羟色胺、细胞因子等；三是细胞的代谢产物，如 CO_2、乳酸等。被调节的细胞或组织称为靶细胞（target cell）或靶组织（target tissue）。

例如，胰岛 β 细胞分泌的胰岛素能调节组织、细胞的糖与脂肪代谢，具有降低血糖的作用。当血糖浓度升高时，胰岛 β 细胞分泌活动加强，胰岛素分泌增多，机体对血糖的吸收和利用随之加强，最终使血糖浓度保持相对稳定。

如图 1–2 所示，人体内很多内分泌腺本身直接或间接地受到神经系统的调节。在这种情况下，体液调节是神经调节的一个传出环节，是反射传出通路的延伸，这种情况可称为神经 – 体液调节。例如，肾上腺髓质接受交感神经的支配，当交感神经系统兴奋时，肾上腺髓质分泌的肾上腺素和去甲肾上腺素增加，共同参与机体的调节。

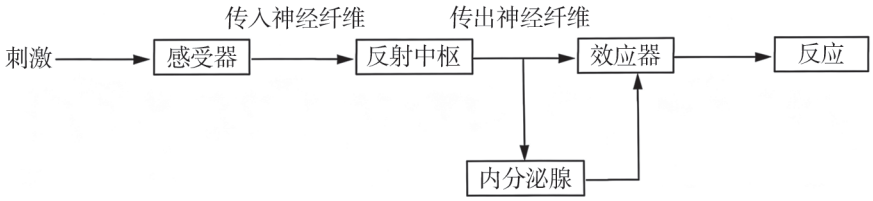


图 1–2　神经 – 体液调节示意图

神经调节的特点是比较迅速而精确，体液调节的特点是比较缓慢、持久而弥散，两者相互配合使生理功能的调节更趋于完善。

【知识前沿】

体液调节是指血液及其他体液中的化学物质，借助血液循环运输引发特殊生理反应的调节方式，被调节的细胞或组织称为靶细胞或靶组织。参与调节的化学物质主要包括三类：内分泌腺分泌的激素（如胰岛素、肾上腺素）、组织或细胞产生的化学物质（如组胺、细胞因子）及细胞代谢产物（如 CO_2、乳酸）。其中，胰岛素可调节糖与脂肪代谢，维持血糖稳定，是体液调节的典型实例。此外，体液调节还包括两种特殊形式：一是旁分泌调节，即局部组织或细胞产生的化学物质，不随血液运输，仅在局部组织液中扩散调节邻近细胞的活动；二是神经 – 体液调节，多数内分泌腺受神经系统支配，体液调节作为神经调节的延伸环节，如交感神经兴奋可促进肾上腺髓质分泌肾上腺素和去甲肾上腺素，协同参与机体调节。

3. 自身调节

自身调节是指组织、细胞在不依赖于外来的神经或体液调节的情况下，自身对刺激产生的适应性反应过程。例如，骨骼肌或心肌收缩前的长度对其收缩力量有调节作用，在一定范围内，肌肉的初长度增加时，收缩力量会相应增加，初长度缩短时收缩力量则减小，这种调节无须神经、体液参与，属于典型的自身调节。

此外，有时一个器官在不依赖于外来神经或体液调节的情况下，自身对刺激发生的适应性反应过程也属于自身调节。一般来说，自身调节的幅度较小，也不十分灵敏，但对于局部生理功能的稳定调节仍具有重要意义，是神经调节和体液调节的重要补充。

4. 生物节律

生物体在维持生命活动过程中，除了需要进行神经调节、体液调节和自身调节外，各种生理功能活动会按一定的时间顺序发生周期性变化，这种生理机能活动的周期性变化称为生物的时间结构，或称为生物节律。

生物节律可按其发生频率的高低分为三大类：超日节律、近似昼夜节律和亚日节律。生物体内生理活动的节律性变化使生物体对内、外环境的程序性变化具有生

物“预见性”，能够提前调整生理功能以适应环境变化，从而产生更完善的适应过程，对维持机体稳态、保障生命活动有序进行具有重要作用。

【课堂讨论】

结合运动场景，分析四种生理机能调节途径如何协同作用维持机体稳态？

任务实施

（1）学生自由分组，每组 5 人，选出 1 名小组负责人。

（2）组员 1 负责梳理体液调节的核心定义、参与调节的化学物质类型及靶细胞或靶组织的含义，结合胰岛素调节血糖的实例拆解调节过程；组员 2 负责梳理旁分泌调节的定义、特点，明确其与全身性体液调节的区别；组员 3 负责梳理神经 – 体液调节的定义，结合肾上腺髓质受交感神经支配的实例解读其调节机制；组员 4 负责整合三者的内在关联，区分不同调节方式的核心差异与适用场景，最后共同讨论总结，完成知识点梳理与实例分析，确保全员掌握各类体液相关调节的核心内容，能结合实例解读调节过程，达成任务探究的目标。

（3）将梳理内容与改进建议制作成 PPT，小组负责人在课堂上汇报。

（4）教师按表 1–3 评分标准打分。

表 1–3　活动评价表

评价标准	分值	得分	备注
资料搜集充分、全面	30		
分析和总结准确、到位	30		
PPT 制作精美，讲解流畅、通顺	20		
小组成员积极参与、密切配合	20		

任务 1.4　人体生理功能活动的调节

任务描述

我们进食后血糖浓度会升高，身体能自动分泌激素将血糖浓度调节至正常水平，见到食物时会提前分泌唾液做好消化准备，偶尔受到突发刺激时身体也会做出快速反应，这些生理调节背后，对应着不同的生理功能调节系统。本节任务中，我们将探究非自动控制系统（non-automatic control system）、反馈控制系统（feedback control system）和前馈控制系统（feedforward control system）的核心内涵，解锁人体生理功能精准调节的奥秘，理解不同调节系统的作用逻辑。

任务分析

本节任务是掌握非自动控制系统、反馈控制系统、前馈控制系统的定义、核心特点及作用机制，重点明确三类控制系统的区别与联系，理解反馈控制的可逆性与前馈控制的前瞻性优势，达成能结合日常生理情境解读各类调节系统的作用、清晰梳理三个子模块逻辑、准确阐述核心知识点的目标，为后续体液调节、神经调节相关知识的深化学习奠定基础。

知识梳理

运用控制论（cybernetics）原理分析人体的调节活动时，人体的各种功能调节可分为三种控制系统，其中非自动控制系统是最基础的类型之一，其核心特征是无反馈调节机制，具体如下。

1.4.1　非自动控制系统

在控制系统中，控制部分的活动不受受控部分的影响，即受控部分无法通过反馈活动改变控制部分的活动，这种控制系统称为非自动控制系统。

非自动控制系统的核心特点是“刺激决定反应，反应不影响控制”，属于开环系统（open-loop system）。例如，在应激反应中，当应激性刺激特别强大时，可能导致下丘脑神经元和垂体对血中糖皮质激素的敏感性减退，即使血液中糖皮质激素浓度升高，也无法通过反馈作用抑制下丘脑和垂体的活动，进而应激性刺激引起促肾上腺皮质激素与糖皮质激素的持续分泌。此时，肾上腺皮质只能不断根据应激性刺激的强度做出相应反应，而无法通过自身反应反向调节控制部分的活动。

需要明确的是，非自动控制系统无自动控制能力，在人体内的活动较为少见，仅在特定极端条件下（如强烈应激反应）短暂存在，是人体调节控制系统中的特殊类型。

1.4.2　反馈控制系统

在控制系统的运行过程中，控制部分与受控部分之间并非单向作用关系，而是存在持续、动态的信息交互与相互影响，这种双向作用机制是保障系统精准调控的核心前提。其中，受控部分在接收控制部分发出的调控指令后，会依据指令启动相应的生理、物理或工程活动，同时在活动执行过程中，通过自身的感知元件或监测模块，不断采集自身的功能状态、活动变化趋势及最终执行结果，并将这些实时信息以反馈信号的形式，通过特定的反馈通路反向输送回控制部分。控制部分接收反馈信息后，会快速对其进行分析、整合与比对，将反馈结果与系统预设的目标参数进行差值计算，进而及时调整输出指令的强度、频率或方向，最终修正、改变受控部分的后续活动，

确保系统活动始终朝着预设目标推进。这种由控制部分、受控部分与反馈通路共同构成，依靠信息往返传递实现闭环调控的系统，被正式定义为反馈控制系统。

反馈控制系统属于典型的闭环系统（closed-loop system），其核心特征在于信号传递形成完整的闭合回路。区别于开环系统中信号单向开放的直线传导模式——开环系统仅能实现控制部分对受控部分的单向指令输出，无法感知受控部分的执行效果，易受外界干扰而偏离目标，而反馈控制系统则通过反馈通路的信号回溯，构建“指令输出—执行反馈—指令调整—再执行”的循环机制。凭借反馈信息对控制过程的持续纠偏与动态调节，该系统具备显著的自动控制、自动稳定、自适应调节等核心能力，能够在外界环境出现随机干扰、系统内部状态发生波动、预设目标出现合理调整时，自主启动调控流程，修正偏差、补偿波动，从而维持系统整体功能的相对稳定。反馈控制系统广泛应用于生物机体、工程技术及自动化领域，是各类复杂系统实现精准调控的最常见、最重要的方式之一，例如生物体内的体温调节、血糖调控系统，工程领域的自动导航、温度控制系统，均是反馈控制机制的典型应用。

如图 1–3 所示，反馈控制系统分为比较器、控制部分、受控部分和感受装置四个主要环节。输出变量的部分信息经感受装置检测后转变为反馈信息，回输到比较器，由此构成闭合回路。在不同的反馈控制系统中，传递信息的方式是多种多样的，可以是电信号（神经冲动）、化学信号（某些化学成分的浓度）或机械信号（压力、张力等），但最重要的是，这些信号的数量和强度变化中所包含的准确和足够的信息。

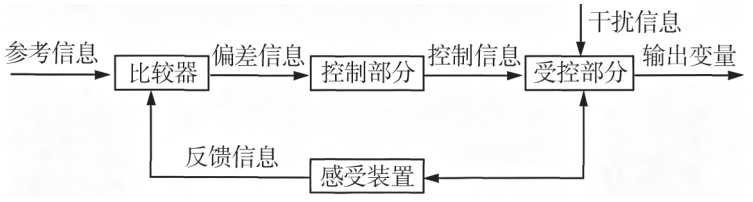


图 1–3　反馈控制系统示意图

在人体生理功能调节的自动控制系统中，如果受控部分的反馈信息能减弱控制部分的活动，这种反馈称为负反馈（negative feedback）。负反馈是可逆的，是维持人体生理机能活动经常处于稳态的重要调节机制。在人体正常体温、血压、心率和某些激素水平等指标的维持过程中，负反馈调节发挥着重要作用。

与负反馈相反，如果反馈信息能促进或加强控制部分活动，这种反馈称为正反馈（positive feedback）。正反馈往往是不可逆的，是不断增强的调控过程，直到整个生理过程结束。排尿反射、分娩过程、血液凝固等均属于正反馈调控过程。

【课堂讨论】

反馈控制系统作为闭环系统，其控制部分与受控部分信息交互的核心作用是什么？

1.4.3　前馈控制系统

在生物机体的稳态调控中，负反馈调节是维持系统稳定的核心途径，其核心作用是当系统受控变量偏离预设稳态范围时，通过反馈通路启动反向调控，将受控变量恢复到正常水平，它是人体维持内环境稳态的基础机制。但需要明确的是，负反馈调节存在固有的局限性：只有在外界干扰因素作用于系统，导致受控变量出现明显偏差之后，反馈信号才能被控制部分感知并触发调控反应，因此负反馈调节总是滞后一段时间才能发挥作用，进而纠正偏差。同时，在纠正偏差的过程中，由于反馈信号的传递、控制部分的指令调整及受控部分的执行均存在一定的时间差，且调控强度难以实现绝对精准的把控，因此负反馈调节在纠正偏差时容易产生小幅度波动，呈现“偏差—纠正—轻微反向偏差—再纠正”的动态循环过程。

尽管负反馈调节存在上述局限性，但人体中各种生理功能依然能在外界温度、营养摄入、代谢负荷等各种干扰因素的不断作用下，较好地保持稳态，维持正常的生理活动秩序。这一现象表明，仅依靠负反馈调节无法完全实现机体的精准稳态调控，必然还有另外的控制系统在协同发挥作用，与负反馈调节形成互补，弥补其滞后性和易波动的不足，共同构建人体复杂而高效的稳态调控网络，确保各项生理功能的有序运行。这类补充控制系统通常具备前瞻性调控能力，能够在受控变量尚未出现明显偏差时，提前感知干扰信号并启动调控，从而减少偏差的产生，降低负反馈调节的负担，进一步提升机体稳态的稳定性和精准度。

在调控系统中，有时干扰信息在作用于受控部分引起输出效应发生变化的同时，还可以直接通过感受装置作用于控制部分。这种干扰信息对控制部分的直接作用称为前馈（feedforward），前馈控制系统模式图如图 1–4 所示。在前馈调控过程中，机体的控制部分可在其输出效应尚未发生偏差而引起反馈之前，即对受控部分发出纠正信息，使机体的控制过程不出现较大的波动和反应滞后现象，从而能更有效地保持生理功能活动的稳态。因此，前馈控制系统所起的作用是预先监测干扰，防止干扰的扰乱；或者超前洞察原因，及时做出适应性反应。条件反射活动是一种前馈控制系统活动。例如，动物见到食物就引起唾液分泌，这种分泌比食物进入口腔后引起唾液分泌来得快，而且富有预见性，更具有适应性意义。

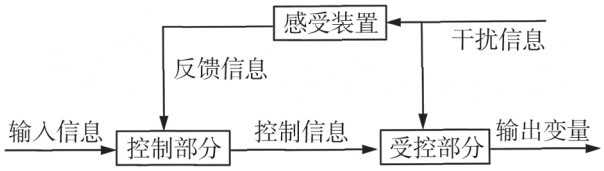


图 1–4　前馈控制系统模式图

任务实施

（1）学生自由分组，每组 5 人，选出 1 名小组负责人。

（2）组员 1 负责梳理反馈控制系统的定义、四大组成环节及闭环系统的特点，明确信息传递方式；组员 2 负责梳理负反馈、正反馈的定义、核心特点（可逆或不可逆），结合体温维持、排尿反射等实例拆解调节过程；组员 3 负责梳理前馈控制系统的定义、作用机制，结合动物见到食物分泌唾液的条件反射实例解读其优势；组员 4 负责整合三类调控方式的内在关联，区分反馈与前馈的核心差异、负反馈与正反馈的适用场景，最后共同讨论总结，完成知识点梳理与实例分析，确保全员掌握各类控制系统的核心内容，能结合实例解读调控机制、区分易混淆知识点，达成任务探究目标。

（3）将梳理内容与改进建议制作成 PPT，小组负责人在课堂上汇报。

（4）教师按表 1–4 评分标准打分。

表 1–4　活动评价表

评价标准	分值	得分	备注
资料搜集充分、全面	30		
分析和总结准确、到位	30		
PPT 制作精美，讲解流畅、通顺	20		
小组成员积极参与、密切配合	20		

项 目 小 结

本项目主要围绕运动生理学的基础知识，首先介绍了运动生理学的概念、研究对象、核心任务，以及研究的基本方法与不同研究水平，明确了运动生理学的学科定位与研究逻辑；其次介绍了人体生命活动的五大基本特征，分别说明了新陈代谢、兴奋性、应激性、适应性和生殖的核心内涵，厘清了各特征的区别与内在关联；然后介绍了机体内环境及其稳态的定义、核心特点与意义，以及生理机能的基本调节方式，揭示了机体维持正常生命活动的内环境基础；最后介绍了人体生理功能活动的三类调节系统，详细说明了非自动控制系统、反馈控制系统（含负反馈、正反馈）和前馈控制系统的定义、核心特点及作用机制。通过本项目的学习，学生可以明确各类调节系统的功能差异与协同作用，为后续深入学习生理相关知识奠定坚实的基础。

思 考 练 习

一、选择题

1. 运动生理学的研究对象主要是（　　）。

A. 动物生理活动　　B. 人体运动相关生理规律

C. 植物生理功能　　D. 细胞代谢过程

2. 下列属于负反馈调节的是（　　）。

A. 排尿反射　　B. 分娩过程

C. 血糖稳定调节　　D. 血液凝固

3. 人体生命活动最基本的特征是（　　）。

A. 兴奋性　　B. 适应性

C. 新陈代谢　　D. 应激性

4. 下列关于神经 – 体液调节的描述，正确的是（　　）。

A. 与神经系统无关　　B. 内分泌腺不受神经系统支配

C. 是神经调节的延伸环节　　D. 仅依赖体液运输调节

5. 机体内环境稳态是指（　　）。

A. 体内理化性质绝对不变　　B. 体内理化性质相对稳定

C. 体内代谢产物不变　　D. 体内激素水平不变

二、填空题

1. 新陈代谢包括_____和_____两个相互依存的过程。

2. 体液调节中，被调节的细胞或组织称为_____或靶组织。

3. 前馈控制系统的作用是预先监测干扰，防止干扰扰乱，_____做出适应性反应。

4. 运动生理学研究的基本内容包括其概念、研究对象、核心任务及研究方法与_____。

5. 人体生理功能活动的调节系统主要包括非自动控制系统、反馈控制系统和_____。

三、简答题

1. 简述新陈代谢的核心内涵及包含的两个主要过程。

2. 简述负反馈与正反馈的核心区别，并各举 1 例人体生理实例。

知 识 回 顾

1. 明确运动生理学的概念、研究对象、核心任务，以及研究的基本方法与不同研究水平，掌握其学科核心定位。

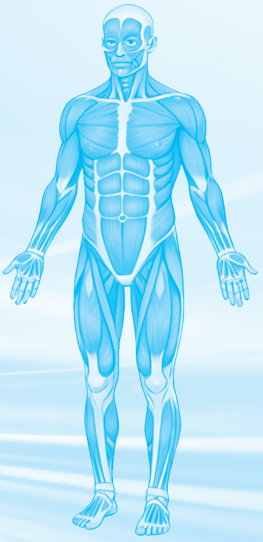
2. 梳理新陈代谢、兴奋性、应激性、适应性、生殖五大生命活动的基本特征，厘清各特征的核心内涵与区别。

3. 掌握内环境的定义、稳态的核心特点与意义，理解生理机能的基本调节方式及内在逻辑。

4. 熟记人体生理功能活动的三类调节系统（非自动、反馈、前馈控制系统），明确各类系统的定义与核心特点。

5. 区分反馈控制系统中负反馈与正反馈的作用机制、核心差异，能结合实例理解二





项目 2

生命活动的基本特征

项目导读

运动是人体生命活动的重要组成部分，从日常行走、跑步到专业体育竞技，每个动作都离不开骨骼肌的参与与调控。本项目围绕运动与骨骼肌展开，依次探究运动与骨骼肌的内在联系、肌纤维的结构与功能、骨骼肌的收缩形式及肌纤维收缩的完整机制，层层递进地解锁运动背后的骨骼肌生理奥秘，帮助学生系统掌握相关知识，提升应用能力。

学习目标

知识目标

1. 掌握运动与骨骼肌的相互关系及核心关联点。
2. 了解骨骼肌细胞生物电现象及神经 – 肌肉接头兴奋传递过程。
3. 掌握肌纤维类型划分及形态、功能、代谢三大特征。
4. 明确骨骼肌物理特性对收缩机能的影响及主要收缩形式。

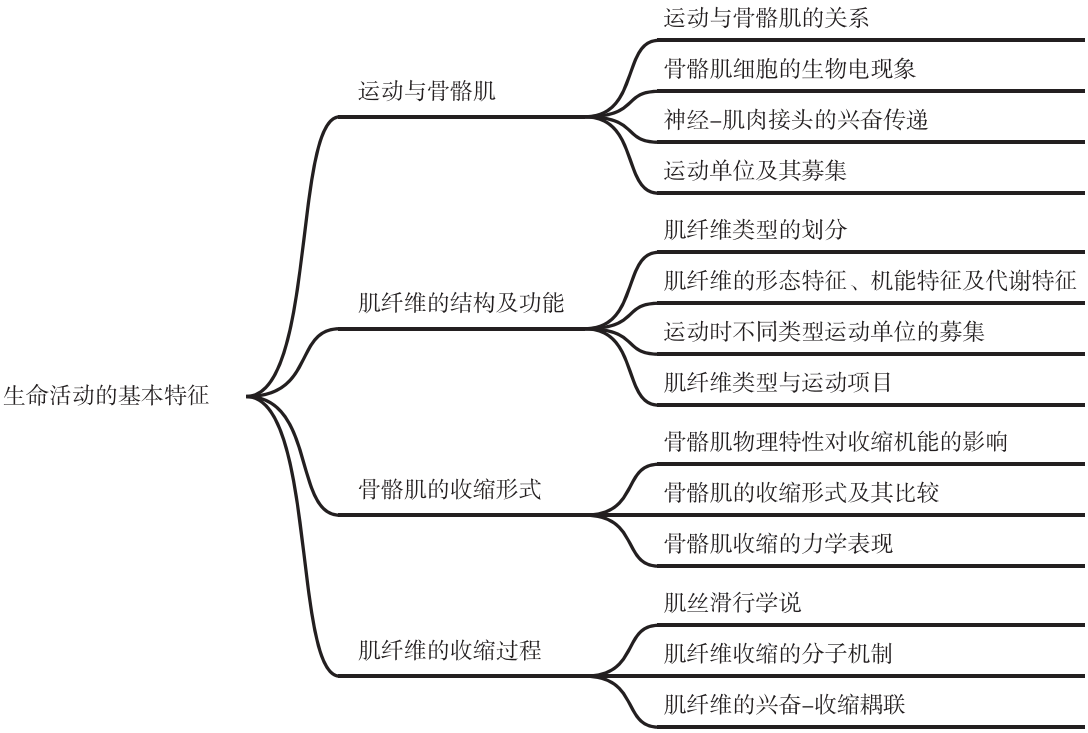
能力目标

1. 能准确区分不同类型肌纤维的特点及适配的运动项目。
2. 能判断不同运动场景下骨骼肌的收缩形式及力学表现。
3. 能解读运动单位的募集规律及在运动中的作用。

素养目标

1. 培养严谨的科学思维，尊重生理学的客观规律。
2. 树立理论联系实际的意识，提升知识应用素养。

思维导图



任务 2.1　运动与骨骼肌

任务描述

清晨的操场，同学 A 纵身跃起完成一记投篮，手臂肌肉瞬间紧绷发力，落地后又能平稳放松；旁边同学 B 坚持慢跑，腿部肌肉节律性收缩，带动身体持续向前。你是否好奇：投篮时手臂的骨骼肌为何能精准发力？慢跑时肌肉的收缩与放松为何能有序交替？其实，每一次肢体运动都离不开骨骼肌的配合，而这背后藏着骨骼肌细胞的电信号变化，神经与肌肉的信号传递，以及运动单位的协同工作。

任务分析

针对投篮时手臂骨骼肌的精准发力、慢跑时腿部肌肉的节律性收缩与放松，我们将逐步拆解：明确运动与骨骼肌的相互作用，解释场景中肌肉为何能配合运动完成发力与放松；探究骨骼肌细胞生物电现象，说明肌肉兴奋的基础是如何支撑肌肉快速收缩的；掌握神经 – 肌肉接头的兴奋传递，厘清神经如何调控肌肉实现精准发力；了解运动单位的构成及募集规律，解读不同运动强度下肌肉发力差异的原因，

破解情境中运动与骨骼肌配合的奥秘。

知识梳理

骨骼肌的生理功能围绕其核心作用展开，主要有运动、支持、保护和代谢四大功能。这些功能相互关联、协同发力，既能保障人体的正常运动能力，支撑躯体姿态，保护体内脏器，还能参与代谢调节，共同维持人体生命活动的稳定。

2.1.1 运动与骨骼肌的关系

运动与骨骼肌之间存在密不可分、相互依存且相互促进的关系。骨骼肌作为人体运动的核心动力器官，其收缩与舒张的协同作用是运动得以实现的基础，通过驱动骨骼、关节的活动，完成人体各类躯体运动，其功能状态直接决定运动能力的强弱。与此同时，科学规律的运动能够对骨骼肌产生正向调控作用，促进骨骼肌纤维增粗，增强肌肉力量与耐力，改善骨骼肌代谢效率，优化其营养供应，进而提升骨骼肌功能，为运动能力的提升提供支撑。二者形成良性循环，共同保障人体运动功能的正常发挥。

2.1.2 骨骼肌细胞的生物电现象

一切活组织的细胞都存在电活动，这种电活动称为生物电。生物电现象是一种普遍存在又十分重要的生命现象，是细胞能进行正常生理功能的重要体现。其中，可兴奋组织细胞在受到刺激发生兴奋时，会出现一种称为动作电位（action potential）的电变化，这种电变化对组织细胞产生生理反应起着先导和触发作用。因此，通常将动作电位的出现作为可兴奋组织细胞兴奋的标志，同时将组织细胞产生动作电位的能力称为兴奋性。

借助适当的仪器设备，可将动作电位精准记录下来。临床上和运动人体科学研究中广泛应用的心电图（ECG）、脑电图（EEG）和肌电图（EMG）所记录的就是各相应组织或细胞动作电位的综合电位变化。生物电在运动人体科学研究中的应用尤为广泛，例如，利用心电图可评定运动员的心脏功能，判断其运动负荷耐受度；利用脑电图可监测运动员的大脑机能变化，分析运动过程中大脑的调控机制；利用肌电图可评定骨骼肌的机能状态，同时用于运动技术分析，优化运动员的动作模式，为科学训练提供理论依据。

1. 静息电位

细胞的电活动分为安静状态和兴奋状态下的两种形式。其中，细胞处于安静状态时，细胞膜内外存在的电位差称为静息电位。这种电位差存在于细胞膜两侧，所

以又称跨膜电位，或简称膜电位。静息电位相对恒定，据测定，哺乳类动物神经细胞的静息电位绝对值为 70～90 mV。若以细胞膜外电位为零，细胞膜内电位则为 −90～−70 mV。

静息电位产生的原理可以用“离子学说”来解释，如图 2-1 所示。离子学说认为，细胞内外各种离子的浓度分布是不均匀的，细胞膜对各种离子的通透性具有选择性。

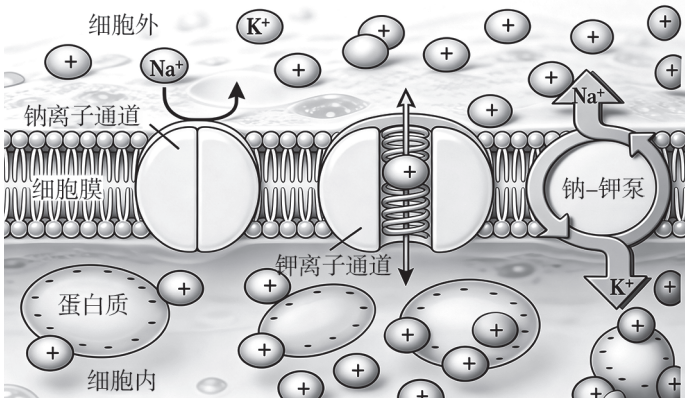


图 2-1　静息电位的产生原理

由于神经细胞和骨骼肌细胞静息电位与动作电位的产生原理相似，就以神经细胞为例叙述静息电位与动作电位的产生原理。哺乳动物神经细胞内的钾离子（K^+）浓度是细胞外的 28 倍，而钠离子（Na^+）、氯离子（Cl^-）的细胞外浓度分别是细胞内的 13 倍和 30 倍。另外，细胞内的负离子主要是大分子有机负离子，如蛋白质等（以 A^- 表示）。因此，如果细胞膜允许离子自由通过，它们将以扩散的方式顺浓度梯度产生 K^+ 和 A^- 的外流（由细胞内向细胞外流动），以及 Na^+ 和 Cl^- 的内流（由细胞外向细胞内流动）。但是，细胞膜对离子的通透性是有选择的。当细胞处于静息状态时，细胞膜对 K^+ 的通透性大，而对 Na^+ 的通透性较小，仅为 K^+ 通透性的 1/100～1/50，而对 A^- 则几乎没有通透性。所以，就形成静息时 K^+ 向细胞外流动。离子的流动必然伴随着电荷的转移，这一过程使细胞内因丧失带正电荷的 K^+ 而使电位下降，同时细胞外因增加了带正电荷的 K^+ 而使电位上升，这就必然造成细胞外电位高而细胞内电位低的电位差。所以，K^+ 的外流是静息电位形成的基础。随着 K^+ 外流，细胞膜两侧形成的外正内负的电场力会阻止细胞内的 K^+ 继续外流。当促使 K^+ 外流的、由浓度差形成的向外扩散力与阻止 K^+ 外流的电场力相等时，K^+ 的净移动量就会等于零。这时细胞内、细胞外的电位差稳定在一定的水平上，这就是静息电位。由于静息电位主要是 K^+ 由细胞内向细胞外流动达到平衡时的电位值，所以静息电位又称为 K^+ 平衡电位。

2. 动作电位

可兴奋细胞兴奋时，细胞内产生的可扩布的电位变化称为动作电位，它是一个

连续的电位变化过程。另外，它在细胞的某个部位一旦产生，就会迅速向四周扩布。动作电位是在静息电位的基础上产生的电位变化。

以神经轴突为例，用细胞内记录法得到的动作电位变化过程如图 2–2 所示。

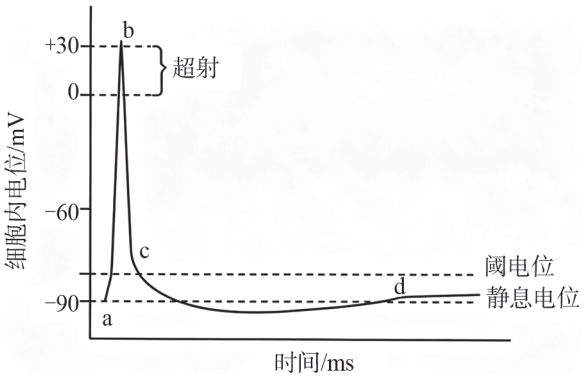


图 2–2　动作电位变化过程示意图（细胞内记录法）

ab—动作电位的上升支；bc—动作电位的下降支；abc—动作电位的锋电位；cd—动作电位的后电位。

（1）动作电位的变化过程。

在静息状态下，细胞膜呈现极化状态，即细胞膜两侧存在稳定的外正内负电位差，该电位即为静息电位，是细胞产生电活动的基础状态。

动作电位是在静息电位基础上，细胞膜电位发生的一次快速、可逆、可传导的电位波动，表现为电位迅速去极化、快速复极化，并伴随后续缓慢电位变化的完整过程。动作电位主要包含锋电位与后电位两个时相，其核心过程可概括为去极化与复极化两个阶段。其中，锋电位（尤其是电位上升支）是动作电位最具代表性的组成部分，通常文献与教材中所指的动作电位即为锋电位。

【课堂讨论】

静息电位的极化状态为什么是动作电位产生的前提？二者在电位变化上有怎样的内在联系？

（2）动作电位的产生原理。

动作电位的产生机制可通过经典的离子学说进行系统阐释。离子学说指出，细胞膜两侧存在显著的离子浓度差，其中细胞外 Na^+ 浓度远高于细胞内，Na^+ 具备由细胞外向细胞内扩散的势能，而离子跨膜转运主要依赖细胞膜上特异性离子通道的开闭调控。

细胞处于静息状态时，细胞膜上的 Na^+ 通道多处于关闭状态，膜电位维持稳定的外正内负的极化水平。当施加于细胞膜的刺激强度达到阈电位时，细胞膜上的 Na^+

通道被迅速激活并大量开放，Na^+ 顺浓度与电位梯度快速内流，使细胞内的正电荷数量迅速增多，膜电位快速去极化，原有负电位逐渐减小直至消失，进而转变为内正外负的反极化状态，形成动作电位的上升支。

当细胞膜内正电位形成的电场力足以抗衡 Na^+ 内流时，膜电位趋近 Na^+ 平衡电位。随后 Na^+ 通道快速失活关闭，而 K^+ 通道开放，K^+ 顺浓度与电位梯度迅速外流，细胞内电位快速回落，重新恢复至静息时的负电位水平，形成动作电位下降支，即复极化过程，为下一次兴奋做好准备。

3. 兴奋性的变化过程

在动作电位变化过程中，神经细胞的兴奋性也发生相应的变化。兴奋性变化分为绝对不应期、相对不应期、超常期和低常期，如图 2-3 所示。

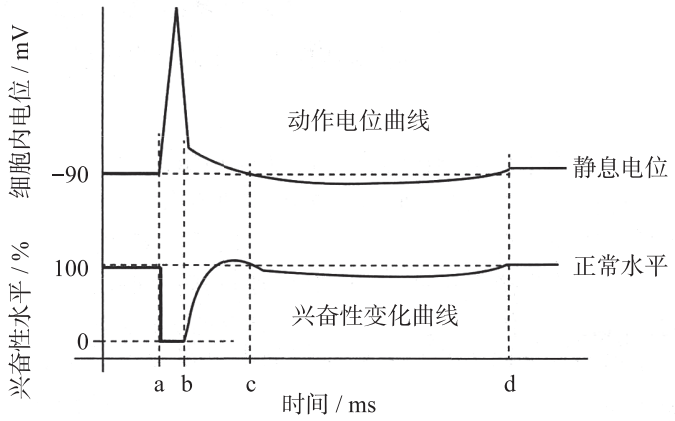


图 2-3　动作电位变化与兴奋性变化之间的关系

ab—锋电位（绝对不应期）；bc—后电位前部（相对不应期、超常期）；cd—后电位后部（低常期）。

动作电位具有三大典型特征。其一为“全或无”现象：只有当刺激强度使细胞膜去极化达到阈电位时，动作电位才会触发；一旦产生，其幅度即刻达到最大值，不会随刺激强度的增强而进一步增大。其二为不衰减性传导：动作电位在细胞膜某一部位产生后，可沿细胞膜向周围扩布，在传导过程中其电位幅度始终保持恒定，不会因传导距离增加而出现衰减。其三为脉冲式发放：细胞在兴奋后会出现不应期，使连续出现的多个动作电位无法相互融合，相邻动作电位之间必然存在一定时间间隔，从而以独立脉冲形式依次发生。

4. 动作电位的传导

动作电位在细胞膜上的某一位点产生后会沿膜面向四周扩布，直至整个细胞膜均依次产生动作电位。这种动作电位在同一细胞上的传导过程，称为传导。神经纤维上的动作电位传导具有双向性，可沿神经纤维向两端同时进行扩布。在无髓神经

纤维上，动作电位主要通过局部电流的方式完成传导，使相邻未兴奋部位的细胞膜依次去极化并达到阈电位，从而实现动作电位的连续、稳定地传导。

【知识前沿】

动作电位“全或无”与骨骼肌收缩的关联：动作电位的“全或无”特性决定了肌纤维收缩的同步性，即当神经冲动引发的动作电位达到阈值时，肌纤维会产生最大限度的兴奋，进而触发收缩，确保肌肉收缩的精准性和有效性，避免因刺激强度不足导致收缩无力或不协调。

2.1.3 神经 – 肌肉接头的兴奋传递

扫一扫

神经 – 肌肉接头的兴奋传递

细胞间的兴奋传递主要分为两种类型：一是神经细胞与神经细胞之间的兴奋传递；二是神经细胞与肌细胞之间的兴奋传递。这两种传递方式在基本过程、核心机制上存在诸多相似之处。

1. 神经 – 肌肉接头的结构

神经 – 肌肉接头的结构又称为运动终板（motor end plate）。运动神经的末梢发出许多细小分支，并且在终末部分膨大。此处的细胞膜较正常部位要厚些，被称为突触前膜，或称为终板前膜、接头前膜；与之相对应的骨骼肌细胞膜称为突触后膜，或称为终板后膜、接头后膜；突触前膜与突触后膜的间隙称为突触间隙，或称为终板间隙、接头间隙，如图 2–4 所示。

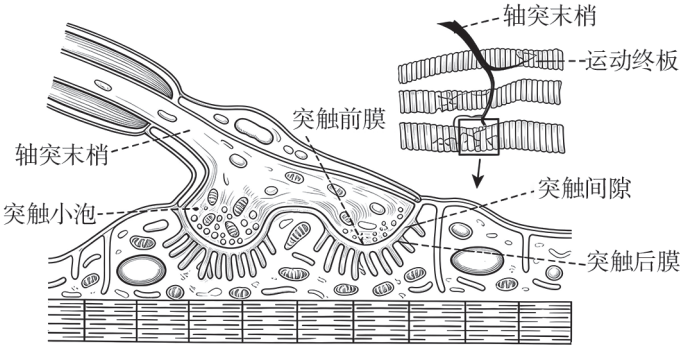


图 2–4 神经 – 肌肉接头示意图

【课堂讨论】

神经细胞与肌细胞之间的兴奋传递，和神经细胞之间的兴奋传递有相似之处，结合已有知识推测，二者可能在哪些核心环节上存在共性？

2. 神经 – 肌肉接头的兴奋传递

如图 2–4 所示，当动作电位沿神经纤维传到轴突末梢时，引起轴突末梢处的突触前膜上的钙离子（Ca^{2+}）通道开放，Ca^{2+} 从细胞外液进入轴突末梢，促使轴

浆中含有乙酰胆碱的突触小泡向突触前膜移动。当突触小泡到达突触前膜后，突触小泡膜与突触前膜融合进而破裂，并将乙酰胆碱释放到突触间隙。乙酰胆碱通过突触间隙到达突触后膜后，与突触后膜上的特异性的乙酰胆碱受体结合，引起突触后膜上的 Na^+、K^+ 通道开放，使 Na^+ 内流、K^+ 外流，结果使突触后膜处的膜电位幅度减小，即去极化。这一电位变化称为终板电位。当终板电位达到一定幅度（肌细胞的阈电位）时，可引发肌细胞膜产生动作电位，从而使骨骼肌细胞产生兴奋。

2.1.4　运动单位及其募集

1. 运动单位

运动单位（motor unit，MU）是指由一个 α 运动神经元及其所支配的全部肌纤维共同构成的最基本的肌肉收缩功能单位。

根据生理功能的差异，运动单位可分为快收缩运动单位与慢收缩运动单位两类。其中，快收缩运动单位的肌纤维兴奋时，冲动发放频率较高，收缩力量强劲，但抗疲劳能力较弱，肌纤维内氧化酶含量较低，属于快肌运动单位；慢收缩运动单位的肌纤维兴奋时，冲动发放频率较低，但发放可持续较长时间，肌纤维内氧化酶含量较高，属于慢肌运动单位。

不同运动单位的大小存在显著差异，其核心差异体现在一个运动单位所支配的肌纤维数量上，且该数量因肌肉类型不同而有一定差异。例如，眼外直肌的每个运动单位仅支配 5～7 条肌纤维，而腓肠肌的每个运动单位可支配 200 余条肌纤维。一般而言，一个运动单位支配的肌纤维数量越少，其运动灵活性就越高，但产生的收缩力量却越小；支配的肌纤维数量越多，产生的收缩张力就越大，但运动灵活性相对较差。此外，每个运动单位还可进一步分为多个亚单位，每个亚单位由 10～30 条肌纤维组成。

在同一运动单位内，所有肌纤维的兴奋与收缩活动具有同步性；而在同一块肌肉中，不同运动单位所支配的肌纤维活动则不一定同步，可根据收缩需求灵活激活。

2. 运动单位募集

运动单位募集（motor unit recruitment），又称运动单位动员（motor unit involvement，MUI），是指骨骼肌在完成收缩、需增加收缩力量时，逐步激活更多运动单位参与收缩的生理现象。

骨骼肌收缩时产生的张力大小，与参与收缩的肌纤维数量直接相关：参与收缩的肌纤维数量越多，产生的收缩张力越大。由于肌肉中的所有肌纤维均分别隶属于不同的运动单位，因此同一时刻被兴奋激活的运动单位数量直接决定了肌肉收缩张力的大小。

运动单位募集的本质是特定肌群中运动神经元被激活的数量，同时也反映了该肌群中被激活的肌纤维数量。在肌肉收缩力量逐渐增加的过程中，运动单位的募集遵循特定顺序，即从最小的运动单位逐步向最大的运动单位募集，对应于从慢收缩运动神经元到快收缩运动神经元的激活顺序，这一规律被称为亨尼曼大小原则。

任务实施

（1）学生自由分组，每组 6 人，选出 1 名小组负责人。

（2）组员 1 负责梳理骨骼肌核心知识点，组员 2 负责分析骨骼肌细胞生物电实例，组员 3 负责拆解神经 - 肌肉接头传递过程，组员 4 负责绘制兴奋传递调控示意图，组员 5 负责汇总成果并准备汇报；任务分为准备、实施、汇总展示三个阶段，全程要求知识点准确、实例贴合运动场景、分工落实，确保达成学习目标。

（3）将梳理内容与改进建议制作成 PPT，小组负责人在课堂上汇报。

（4）教师按表 2–1 的评分标准打分。

表 2–1　活动评价表

评价标准	分值	得分	备注
资料搜集充分、全面	30		
分析和总结准确、到位	30		
PPT 制作精美，讲解流畅、通顺	20		
小组成员积极参与、密切配合	20		

任务 2.2　肌纤维的结构及功能

任务描述

体育课堂上，短跑选手爆发力惊人，几秒内便能冲刺终点，腿部肌肉快速收缩释放巨大能量；长跑选手则耐力出众，能长时间匀速奔跑，肌肉持续供能不松懈；而体操选手凭借精准的肌肉控制，完成高难度的屈伸、旋转动作。同样是骨骼肌发力，为何不同运动项目中，肌肉的表现差异如此显著？其实，这都与肌纤维的类型、结构及功能密切相关。

任务分析

本节任务分析围绕情境中短跑、长跑、体操的肌肉表现差异展开，紧扣导入疑

问，聚焦肌纤维相关知识点。针对不同运动项目中肌纤维的不同表现，逐步拆解探究：明确肌纤维类型的划分依据，解释情境中不同运动选手肌纤维类型的差异；掌握各类肌纤维的形态、功能及代谢特征，说明其为何能支撑不同运动（爆发性、持续性、精准性）的需求；理解运动时不同类型运动单位的募集规律，厘清不同运动强度下肌纤维的激活特点；最终结合肌纤维类型与运动项目的适配关系，破解情境中不同运动选手肌肉表现差异的本质原因。

知识梳理

对骨骼肌纤维类型的划分，依据肌纤维的颜色、收缩速度、功能、代谢特点等有不同的分类方法。

2.2.1　肌纤维类型的划分

肌纤维的分类方法多样，不同分类方法基于不同的生理生化特征，各分类之间存在一定的对应关系，具体可分为以下 4 种类型。

1. 根据肌纤维的收缩速度划分

以肌纤维的收缩速度为核心分类依据，可将肌纤维明确划分为快肌纤维（fast-twitch，FT）和慢肌纤维（slow-twitch，ST）两大类。其中，快肌纤维收缩速度快、发力强劲；慢肌纤维收缩速度慢、持续时间长，与前文所述快收缩、慢收缩运动单位所支配的肌纤维特征相契合。

2. 根据肌肉的色泽划分

根据肌肉组织的色泽差异，可将肌纤维分为红肌纤维和白肌纤维。红肌纤维因富含肌红蛋白、线粒体及氧化酶，色泽呈红色；白肌纤维的肌红蛋白和线粒体含量较少，色泽呈白色。若结合肌纤维的收缩速度，可进一步将肌纤维细分为快缩白肌纤维、快缩红肌纤维和慢缩红肌纤维三种类型，兼顾色泽与收缩功能的双重特征。

3. 根据肌纤维的收缩速度及代谢特征划分

皮特（Peter，1997）等人通过肌原纤维 ATP 酶、琥珀酸脱氢酶（SDH）或 α-磷酸甘油脱氢酶染色法，结合肌纤维的收缩速度及能量代谢特征，将肌纤维划分为三类：快缩－糖酵解（fast glycolytic，FG）型、快缩－氧化－糖酵解（fast oxidative glycolytic，FOG）型和慢缩－氧化（slow oxidative，SO）型。其中，FG 型肌纤维以糖酵解代谢为主，收缩速度快但抗疲劳性差；FOG 型肌纤维兼具氧化代谢与糖酵解代谢能力，收缩速度较快且抗疲劳性中等；SO 型肌纤维以氧化代谢为主，收缩速度慢但抗疲劳性强。

4. 根据肌球蛋白重链同工型划分

肌球蛋白是肌纤维收缩的核心蛋白，由两条分子质量约为 220 ku 的重链（myosin heavy chain，MHC）和两条分子质量为 16～27 ku 的轻链（myosin light chain，MLC）组成，其中肌球蛋白重链的类型决定了肌球蛋白的功能。成年哺乳动物骨骼肌中存在四种主要的 MHC 异形体，分别为 MHC-Ⅰ、MHC-Ⅱa、MHC-Ⅱx（或 MHC-Ⅱd）和 MHC-Ⅱb，其中 MHC-Ⅱx（或 MHC-Ⅱd）被认为是一种过渡型异形体。

肌纤维的表现型变化及组成比例改变，是肌肉功能适应外界环境的重要基础。目前已明确，肌球蛋白重链同工型是反映肌纤维类型的标志性蛋白，多种因素可诱导其表型发生改变，如运动训练、衰老、电刺激、微重力环境、模拟失重及肌肉相关激素水平变化等，均会影响 MHC 的表达类型，进而改变肌纤维的功能特性。

上述不同肌纤维分类方法之间存在明确的对应关系，具体见表 2-2。

表 2-2　肌纤维分类对应表

速度和颜色	速度和代谢特征	肌球蛋白重链亚型	
快缩白	FG	MHC-Ⅱ	MHC-Ⅱb
快缩红	FOG		MHC-Ⅱa
慢缩红	SO	MHC-Ⅰ	

【案例分析】

某学生长期进行中长跑训练（耐力型），骨骼肌中 MHC-Ⅰ（慢肌标志）占比高，抗疲劳能力强但爆发力弱；改为 8 周短跑高强度训练后，MHC-Ⅰ占比下降，MHC-Ⅱa、MHC-Ⅱx 占比升高，爆发力提升但抗疲劳能力下降。

思考：

1. 为何 MHC 表型改变会影响爆发力和抗疲劳能力？

2.MHC-Ⅱx（过渡型异形体）在肌纤维类型转换中起什么作用？

2.2.2　肌纤维的形态特征、机能特征及代谢特征

1. 形态特征

快肌纤维与慢肌纤维在形态学结构及神经支配上存在显著差异，具体特征如下：在细胞形态上，快肌纤维的直径显著大于慢肌纤维，且细胞内含有更多的收缩蛋白，可为快速收缩提供充足的结构基础；同时，快肌纤维的肌浆网结构也更为完善，能够快速实现钙离子的贮存与释放，支撑其快速收缩。

慢肌纤维在氧供及能量代谢相关结构上更具优势：其周围的毛细血管网分布更为丰富，可高效运输氧气和营养物质；细胞内含有较多的肌红蛋白，肌红蛋白具有

结合和贮存氧气的功能，这也是慢肌纤维通常呈红色的核心原因。此外，与快肌纤维相比，慢肌纤维内的线粒体数量更多、体积更大，可通过氧化代谢持续为肌肉收缩提供能量，保障其长时间持续收缩的能力。

在神经支配方面，慢肌纤维和快肌纤维也存在明显区别：慢肌纤维由较小的运动神经元支配，其支配的运动神经纤维较细，神经冲动传导速度较慢，通常为 2～8 m/s；而快肌纤维由较大的运动神经元支配，对应的神经纤维较粗，神经冲动传导速度更快，可达到 8～40 m/s，这种差异也进一步决定了两类肌纤维收缩速度的不同。

【课堂讨论】

结合快肌纤维与慢肌纤维的形态学结构及神经支配差异，分析二者在收缩速度、抗疲劳能力上的差异与这些特征之间的内在联系。

2. 机能特征

（1）肌纤维类型与收缩速度。

快肌纤维收缩速度快，慢肌纤维收缩速度慢。

在人体的骨骼肌中，快肌运动单位与慢肌运动单位是相互混杂的，一般不存在单纯的快肌与慢肌。但在每块肌肉中，快肌与慢肌运动单位的分布比例是不同的。通过肌肉收缩时所表现出的肌肉力量－速度曲线［图 2-5（a）］，肌肉中如果快肌纤维的百分比较高，肌肉的收缩速度较快，肌肉力量－速度曲线向右上方偏移。

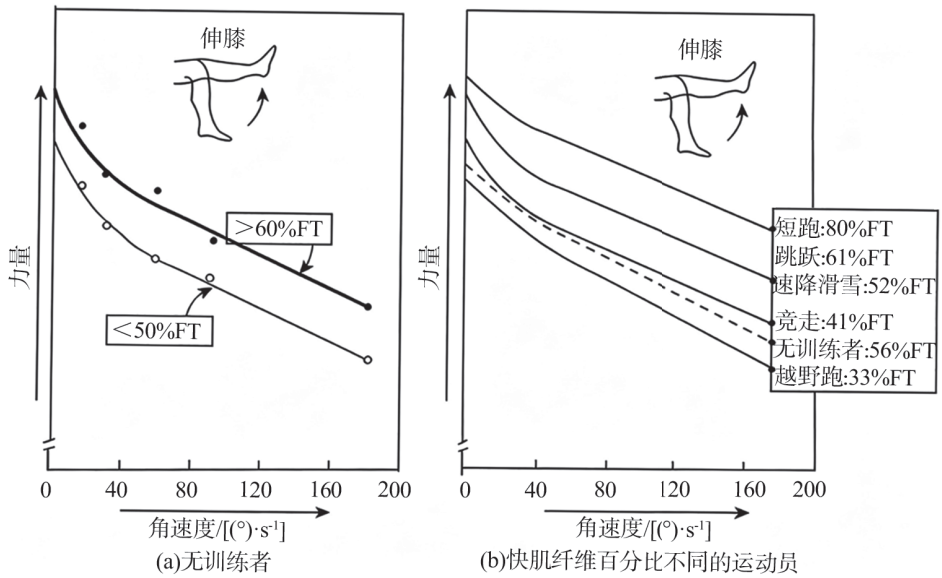


图 2-5　无训练者和快肌纤维百分比不同的运动员的肌肉力量－速度曲线

注：快肌纤维百分比高者，肌肉力量－速度曲线向右上方偏移。

（2）肌纤维类型与肌肉力量。

肌肉收缩力量的大小主要取决于单个肌纤维的直径，以及运动单位所包含的肌纤维数量。由于快肌纤维的直径普遍大于慢肌纤维，且快肌运动单位所支配的肌纤维数量也多于慢肌运动单位，因此快肌运动单位所能产生的收缩力远大于慢肌运动单位。

在人体中，肌肉收缩时产生的张力与该肌肉中快肌纤维的百分比呈正相关，快肌纤维占比越高的肌肉，收缩时产生的张力越大。相关实验研究显示，受试者完成最大力量伸膝动作时，股外肌快肌纤维百分比较高的受试者，其最大伸膝力量也相对更大，进一步证实了最大伸膝力量与快肌纤维百分比之间的正相关关系。

肌肉的收缩力量与收缩速度均受肌肉中快肌纤维百分比的影响，快肌纤维占比较高的肌肉，其收缩速度和收缩力量均优于慢肌纤维占比较高的肌肉，这一特征直接体现为肌肉力量－速度曲线向右上方偏移，如图 2-5（a）所示。基于这一规律，运动员完成特定动作时，若参与工作的肌肉中快肌纤维占比较高，则在相同运动速度下可发挥更大的收缩力量；反之，当肌肉输出力量相同时，可产生更快的收缩速度。

图 2-5（b）展示了不同运动项目运动员的肌肉力量－速度曲线，从中可清晰看出：运动员肌肉中快肌纤维百分比越高，其肌肉力量－速度曲线在图中的位置越偏向右上方。其中，从事短跑、跳跃等需爆发性力量项目的运动员相较于其他项目运动员，能够在更高的运动速度下发挥更大的收缩力量；而快肌纤维百分比最低的耐力项目运动员（如越野跑运动员），其肌肉力量－速度曲线甚至低于无训练人群。

值得注意的是，从图 2-5（b）中还可观察到，尽管无训练者的快肌纤维百分比（56%）仅略低于短跑（80%）和跳跃（61%）项目运动员，但由于缺乏系统运动训练，其肌肉收缩力量和收缩速度均处于较低水平，甚至低于快肌纤维百分比分别为 52% 和 41% 的高山滑雪、竞走项目运动员。这一现象充分说明，运动训练对肌肉收缩力量和收缩速度具有显著的调控作用，运动员通过系统的运动训练可有效使肌肉力量－速度曲线向右上方偏移，提升肌肉功能表现。

（3）肌纤维类型与疲劳。

不同类型的肌纤维抗疲劳能力不同。图 2-6 展示了快肌纤维和慢肌纤维与疲劳的关系。当以每秒 180° 的角速度重复完成最大用力伸膝运动时，在开始阶段股外肌中快肌纤维百分比为 61% 的受试者，其伸膝时股外肌的肌肉力量远远大于快肌纤维百分比为 38% 的受试者。而当继续进行重复收缩时，快肌纤维百分比为 38% 的受试者的力量下降速度较慢，而快肌纤维百分比为 61% 的受试者的力量下降速度较快，