

疲劳的运动生理学 研究进展

PILAO DE YUNDONG SHENGLIXUE
YANJIU JINZHAN

蒋 丽 殷 劲 主编



电子科技大学出版社

疲劳的运动生理学 研究进展

PILAO DE YUNDONG SHENGLIXUE
YANJIU JINZHAN

蒋 丽 殷 劲 主编



电子科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

疲劳的运动生理学研究进展 / 蒋丽, 殷劲主编. -- 成都: 电子科技大学出版社, 2017.8
ISBN 978-7-5647-4357-4

I. ①疲… II. ①蒋… ②殷… III. ①运动生理学 - 研究 IV. ①G804.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第096943号

疲劳的运动生理学研究进展

蒋 丽 殷 劲 主 编

策划编辑 周清芳
责任编辑 熊晶晶
出版发行 电子科技大学出版社
成都市一环路东一段159号电子信息产业大厦 邮编 610051
主 页 www.uestcp.com.cn
服务电话 028-83203399
邮购电话 028-83201495
印 刷 四川永先数码印刷有限公司
成品尺寸 170mm×240mm
印 张 31.5
字 数 620千字
版 次 2017年8月第一版
印 次 2017年8月第一次印刷
书 号 ISBN 978-7-5647-4357-4
定 价 66.00元

版权所有 侵权必究

本书编写人员

主 编	蒋 丽 殷 劲
副主编	胡毓诗 吕志刚 李 雪
编 委	蒋 丽 (成都体育学院)
	殷 劲 (成都体育学院)
	胡毓诗 (成都体育学院)
	吕志刚 (四川大学)
	李 雪 (成都体育学院)
	钱 钰 (成都体育学院)
	朱 斌 (成都大学)
	李若愚 (四川大学)
	石金丽 (西南交通大学)
	孙君志 (成都体育学院)
	王 璐 (成都体育学院)
	李军汉 (成都体育学院)
	郑 爽 (成都体育学院)
	张晓蕊 (成都体育学院)
	王 迪 (成都体育学院)
	梅晓涛 (成都体育学院)
	付 玉 (成都体育学院)
	刘 娜 (成都体育学院)
	李丹婕 (四川城市职业学院)
	刘川南 (成都体育学院)
	万子豪 (成都体育学院)
	田阳东圣 (成都体育学院)
	邓俊武 (成都体育学院)

前 言

自1896年雅典奥运会揭开了现代竞技体育的序幕以来,竞技体育运动已发展成为当代人类社会的盛大文化活动。“更快、更高、更强”的奥林匹克精神鼓舞着世界各国体育健儿,在国际竞技体育活动中,不断向人体自身的种种生理极限发起冲击。现代科学技术的飞速发展,推动了运动训练科学化的进程。

“更快、更高、更强”是奥林匹克精神,是促进竞技体育向体能极限冲击,不断提高竞技运动水平的催化剂。在国际奥林匹克大家庭跨世纪的激烈竞争中,中国要力争实现突破成为世界体育强国,体育训练的科学化是一个重要保证,其中消除运动性疲劳是我们体育战线需要开创新局面的中心内容,是体育科学研究的重点课题,也是运动医学研究的中心课题。

体育界有这样一句名言:“没有疲劳就没有训练,没有恢复就没有提高。”运动训练造成运动员身体出现一定程度的疲劳,是提高运动竞技水平的生物学基础,挖掘和提高机体机能能力、增强体质的根本措施。因此,消除疲劳和挖掘机能潜力,构成了运动性疲劳研究的核心问题。

疲劳是人们日常生活和工作中常见的生理现象,运动性疲劳则是由于体力工作、运动训练及竞赛所造成的身体工作能力暂时下降的现象。竞技体育运动训练的直接目的,在于改善和发展运动员的竞技能力。而运动员竞技能力生理基础的提高过程必然遵循:“运动训练—机体工作能力暂时性下降—疲劳—疲劳的消除—机体工作能力提高”的循环往复螺旋形发展的规律。因此,探索运动性疲劳产生的原因、运动性疲劳发展过程的特点、判断疲劳的方法、加速疲劳消除的手段等问题,已成为广大体育科技工作者、医务人员、教练员、运动员极为重视的研究课题。

疲劳问题不仅是体育科学界关心和重视的问题,也是全社会关心和重视的问题。随着现代人类社会生活节奏的加快、精神和体力劳动强度的加大,现代文明社会的人群中慢性疲劳综合症患者日渐增多。因此,研究疲劳问题对人类健康的影响,又是医学界、社会学界和心理学界所必须重视的问题。国际运动医学联合会前主席卢·普罗科普曾经指出,疲劳综合征是运动医学研究的中心课

题，它能直接影响人们日常生活，特别是工作中的过度疲劳。

成都体育学院的殷劲教授和蒋丽副教授带领课题组成员和历届攻读运动人体科学专业的硕士研究生同学历时20余年对运动性疲劳的机制和恢复进行了大量详实和细致的基础研究，并结合国际体育总局攻关课题和四川省科技厅课题在国家女子水球队、四川省女子水球队、四川省田径中长跑和甘孜州田径队做了大量的实证研究，验证我们的研究对运动员体能的促进和提高作用，总结出了有许多有价值的研究成果。

本书系统地总结了成都体育学院的殷劲教授和蒋丽副教授这些成果，希望这些研究成果尽快转化为促进我国体育运动技术水平发展的动力，为增强人民健康服务、为体育科学的发展做出一些贡献。

虽然本书还不够成熟，某些观点可能还值得进一步研究和讨论，但仍不失为一部有特色的运动性疲劳研究专著，在指导运动训练科学化的实践中也会有较大的应用价值。希望本书的出版能推动我国关于运动性疲劳的研究工作，为建设有中国特色的运动医学体系、为运动训练科学化做出贡献。

蒋 丽

2017年2月16日于成都体育学院

目 录

绪论1

一、疲劳及其研究1

 (一) 广义疲劳的概念1

 (二) 疲劳的分类1

二、运动性疲劳2

 (一) 运动性疲劳的概念2

 (二) 运动性疲劳的分类3

 (三) 产生运动性疲劳的机制4

三、运动性疲劳研究的历史和进展7

四、运动性疲劳研究存在的问题8

五、运动性疲劳研究的发展展望9

第一章 “运动性疲劳研究” 探新12

一、“运动性疲劳研究” 的再认识12

 (一) 运动性疲劳的概念12

 (二) 运动性疲劳的分类13

二、运动性疲劳的“点”与“过程”之疑16

 (一) 问题的提出16

 (二) 实验设计21

 (三) 研究结果22

 (四) 结论及后记22

三、运动性疲劳机制研究中的“测不准”之争23

 (一) 问题的提出23

 (二) 实验设计24

 (三) 研究结果25

(四) 结论及后记	25
四、统一运动性疲劳机制研究“模型”之构想	26
(一) 问题的提出	26
(二) 实验设计	30
(三) 研究结果	31
(四) 结论及后记	32
五、运动性疲劳的“Ach量变理论的研究”	32
(一) 问题的提出	32
(二) 实验设计	34
(三) 研究结果	34
(四) 结论及后记	35
六、运动性疲劳的“外周多层次疲劳理论的研究”	36
(一) 问题的提出	36
(二) 实验设计	40
(三) 研究结果	40
(四) 结论及后记	42
第二章 运动性疲劳机制的研究进展	44
一、运动性疲劳机制的分子生物学研究进展	44
(一) 运动性疲劳产生机理的经典学说	44
(二) 运动性疲劳产生的分子生物学机制	47
二、运动疲劳与生物电活动	65
(一) 动作电位相关因素的变化	65
(二) 运动疲劳与肌电	69
(三) 运动疲劳与脑电	74
(四) 运动疲劳与心电	75
第三章 成都体育学院对运动性疲劳的部分研究	84
一、成都体育学院有关中枢疲劳的新研究	84
二、成都体育学院有关内脏疲劳的新研究	103
(一) 运动性疲劳状态下不同器官结构和功能的重塑	104
(二) 运动性疲劳的机理研究	107

(三) 运动性疲劳的评价手段研究	109
(四) 中医药对运动性疲劳的防治效果评价	117
三、成都体育学院有关运动性外周疲劳的新研究	118
(一) 大鼠负重游泳的运动性疲劳模型的建立	118
(二) 糖酵解供能为主的运动条件下, 大鼠负重游泳运动疲劳机制的研究	133
(三) 糖有氧供能为主的运动条件下, 大鼠负重游泳运动疲劳机制的研究	194
第四章 运动性疲劳的判断方法研究	229
一、运动性疲劳的概念	229
(一) 传统概念	229
(二) 现代概念	230
二、运动性疲劳的分类	231
(一) 按疲劳发生的生理学和心理学特点划分	231
(二) 按身体整体和局部划分	232
(三) 按疲劳发生的部位划分	232
(四) 按运动方式划分	232
(五) 按机体对不同频率电刺激的应答情况划分	233
(六) 按疲劳发生的性质进行分类	233
三、运动性疲劳的机制	234
(一) 中枢疲劳理论	234
(二) 外周疲劳理论	235
(三) 神经-肌肉接点疲劳理论	236
(四) 综合性疲劳理论	237
四、运动疲劳的判定方法	242
(一) 运动生理学判定方法	242
(二) 运动训练中的生物化学检测评价方法	244
(三) 中枢疲劳的判定方法	246
(四) 外周疲劳的判定方法	249
(五) 离子代谢系统疲劳的判定方法	253
(六) 综合性疲劳的判定方法	255

(七) 其他判断方法	257
五、成都体育学院在运动性疲劳机理方面的研究	260
(一) 大脑中枢疲劳的三维结构研究	260
(二) 外周多层次影响的疲劳理论研究	261
(三) 运动疲劳的乙酰胆碱量变理论研究	261
(四) 运动性疲劳的实验模型研究	262
六、运动性疲劳产生的部位	263
(一) 运动性疲劳发生的部位研究	263
(二) 成都体育学院的一些研究	264
七、运动性疲劳产生的过程	265
(一) 运动疲劳产生过程的设想	265
(二) 运动疲劳产生过程中的动物模型	266
(三) 运动疲劳产生过程的各指标研究	267
八、结语	268
第五章 运动性疲劳的消除理论及其方法研究	271
一、运动性疲劳的医务监督	271
(一) 良好的运动环境	271
(二) 合理的营养	272
(三) 科学的训练(合理安排运动训练)	273
(四) 加强医务监督的组织	274
二、运动性疲劳的日常消除(恢复)理论及其方法研究	275
(一) 教育学手段的“消疲”作用	275
(二) 运动性手段的“消疲”作用	276
(三) “生理及营养学手段”的恢复理论及其方法研究	280
三、运动性疲劳消除的康复学理论和方法	286
(一) 静止性休息	286
(二) 积极性休息	287
(三) 物理疗法	288
四、中医学消除疲劳的理论及其方法研究	292
(一) 运动疲劳的中医辨证及理论基础	292
(二) 中医消疲方法及其机制(理论)	294

(三) 中药消疲组方及其机制 (理论)	303
(四) 基因芯片技术的运动性疲劳恢复 (消除) 的研究	325
五、“超量恢复的运动生理学研究进展”探新	326
(一) 糖酵解供能条件下“超量恢复区间”研究	326
(二) 糖有氧供能条件下“超量恢复区间”研究	335
(三) 糖酵解供能条件下“真假超量恢复区间”研究	347
(四) “训练恢复能力”研究	353
 第六章 不同运动项目运动员运动时的能代特点、运动性疲劳特点及其运动中 有无氧能力训练方法及其注意事项	 374
一、田径 (100m、400m、3000m、马拉松跑)	374
(一) 100m、400m、3000m、马拉松的项目特点	374
(二) 运动时机体的供能特点	375
(三) 100m、400m、3000m、马拉松运动所需的专项体能 (有氧、无氧能力) 特点及其训练方案	 376
(四) 100m、400m、3000m、马拉松运动员运动性疲劳的特点	379
(五) 100m、400m、3000m、马拉松运动员训练、教学、锻炼的注意 事项	 381
二、游泳 (50m、200m、1500m)	382
(一) 50m、200m、1500m的项目特点	382
(二) 运动时机体的供能特点	382
(三) 50m、200m、1500m游泳运动所需的专项体能 (有氧、无氧能力) 特点及其训练方案	 383
(四) 50m、200m、1500m运动员运动性疲劳的特点	386
(五) 50m、200m、1500m运动员训练、教学、锻炼的注意事项	387
三、自由体操及健美操	388
(一) 自由体操及健美操运动的项目特点	388
(二) 运动时机体的供能特点	390
(三) 自由体操及健美操所需的专项体能 (有氧、无氧能力) 特点及其 训练方案	 390
(四) 自由体操及健美操运动性疲劳的特点	392
(五) 自由体操及健美操运动员训练、教学、锻炼的注意事项	393

四、自行车	395
(一) 自行车运动的项目特点	395
(二) 运动时机体的供能特点	395
(三) 自行车运动所需的专项体能(有氧、无氧能力)特点及其训练方案	396
(四) 自行车运动性疲劳的特点	398
(五) 自行车运动员训练、教学、锻炼的注意事项	399
五、篮球	401
(一) 篮球运动的项目特点	401
(二) 运动时机体的供能特点	403
(三) 篮球运动所需的专项体能(有氧、无氧能力)特点及其训练方案	404
(四) 篮球运动员运动性疲劳的特点	406
(五) 篮球运动员训练、教学、锻炼的注意事项	408
六、手球	409
(一) 手球运动的项目特点	409
(二) 运动时机体的供能特点	409
(三) 手球运动所需的专项体能(有氧、无氧能力)特点及其训练方案	409
(四) 手球运动员运动性疲劳的特点	413
(五) 运动员训练、教学、锻炼的注意事项	414
七、水球	416
(一) 水球运动的项目特点	416
(二) 运动时机体的供能特点	417
(三) 水球运动所需的专项体能(有氧、无氧能力)特点及其训练方案	419
(四) 水球运动员运动性疲劳的特点	420
(五) 水球运动员训练、教学、锻炼的注意事项	422
八、排球	423
(一) 排球运动的项目特点	423
(二) 运动时机体的供能特点	424
(三) 排球运动所需的专项体能(有氧、无氧能力)特点及其训练方案	424

(四) 排球运动员运动性疲劳的特点	428
(五) 排球运动员训练、教学、锻炼的注意事项	429
九、足球	430
(一) 足球运动的项目特点	430
(二) 运动时机体的供能特点	430
(三) 足球运动所需的专项体能(有氧、无氧能力)特点及其训练方案	432
(四) 足球运动员运动性疲劳的特点	434
(五) 足球运动员训练、教学、锻炼的注意事项	435
十、网球	437
(一) 网球运动场地及其规则	437
(二) 网球供能特点的认识	438
(三) 网球体能训练	439
(四) 网球运动员疲劳原因	443
(五) 网球教学、训练和锻炼的注意事项	443
十一、乒乓球运动的基本情况	444
(一) 乒乓球运动场地及规则介绍	444
(二) 乒乓球供能特点的认识	445
(三) 乒乓球体能训练	446
(四) 乒乓球疲劳的特点	449
(五) 乒乓球教学、训练和锻炼的注意事项	449
十二、羽毛球项目	450
(一) 羽毛球运动场地	450
(二) 羽毛球供能特点的认识	451
(三) 羽毛球体能训练	452
(四) 羽毛球运动性疲劳	455
(五) 羽毛球教学、训练和锻炼的注意事项	455
 第七章 不同环境中运动时机体运动能力、运动性疲劳的特点及其运动中的 注意事项	 459
一、高原环境中机体运动能力、运动性疲劳特点及其运动中的注意事项	459

(一) 机体在高原环境中运动能力的生理学基础	459
(二) 机体在高原环境中运动疲劳的特点	463
(三) 机体在高原环境中教学、训练、体育锻炼的注意事项	467
二、低寒(例如南极、北极)环境中机体的运动能力、运动性疲劳的特点 及其运动	469
(一) 机体在低寒环境中运动能力的的生理学基础	469
(二) 机体在低寒环境中运动疲劳的特点	471
(三) 机体在低寒环境中教学、训练、体育锻炼的注意事项	472
三、高压(例如潜水等)环境中机体运动能力、运动性疲劳特点及其 运动中的注意事项	473
(一) 机体在高压环境中(潜水时)的生理学基础	473
(二) 机体在高压环境中(潜水时)运动疲劳的特点	474
(三) 机体在高压环境中(潜水时)教学、训练、体育锻炼的注意事项	475
四、高温高湿环境中机体运动能力、运动性疲劳特点及其运动中的注意 事项	475
(一) 机体在高温环境中运动能力的生理学基础	476
(二) 机体在高温环境中运动疲劳的特点	480
(三) 机体在高温高湿环境中教学、训练、体育锻炼的注意事项 ...	486
后记	489

绪 论

一、疲劳及其研究

（一）广义疲劳的概念

疲劳是一种主观不适感觉，但客观上会在同等条件下，失去其完成原来所从事的正常活动或工作能力。通常来说，疲劳是指劳苦困乏。《六韬·武锋》：“不戒可击，疲劳可击。”《三国志·蜀志·谯周传》：“民疲劳则骚扰之兆升，上慢下暴则瓦解之形起。”

疲劳问题，是一个古老而又永恒的研究课题，两千年前在《黄帝内经·素问》中认为“肝者，罢极之本”，将疲劳归结为由肝功能主导；汉朝张仲景认为“重困疲劳汗出”，在《金贵玉函要略辑文》中提出“劳则必劳其精血也”；到了元、明代，认为“劳役过度而损耗元气”，在我国早期的这些论述都主要指的是劳动疲劳。《黄帝内经》中多次提到“劳”字，其中“五劳所伤”的“劳”，就是过度之意；“劳则气耗”的“劳”就是指的疲劳。在我国古代著名的医学家张仲景、孙思邈等人的著作中均提到“疲劳”一词，可见疲劳问题远在古代就已受到医学家们的重视。

（二）疲劳的分类

在自然条件下，人们参加工作、劳动、学习和娱乐等活动，都会消耗能量。因此，工作效率持续一段时间后都会下降，这是机体疲劳的表现。疲劳是机体复杂的生理生化变化过程，是人脑力或体力到达一定阶段时必然出现的一种正常的生理现象。生理性疲劳主要包括体力疲劳、脑力疲劳、心理（精神）疲劳和混合型疲劳。

体力疲劳主要是长时间劳动、工作和健身运动中，运动系统过度活动、骨骼肌能源物质大量消耗、代谢产物大量堆积，造成骨骼肌细胞活动能力下降，表现为动作迟缓、不灵敏，动作的协调能力下降。

脑力疲劳主要是长时间看书、学习、思考等，使得脑力活动时间过长引起的记忆力下降、思维迟钝、头晕脑涨等表现。

心理（精神）疲劳主要是内外环境的不良刺激引起情绪低落、心理厌倦等心理学反应。表现为对任何事物都没有兴趣，办事效率降低，注意力不集中，记忆力障碍，理解、推理困难，脑力活动迟钝、不准确。

混合型疲劳是体力疲劳、脑力疲劳、心理（精神）疲劳三种疲劳因素同时存在而引起的疲劳，形成原因复杂。

另外，疲劳还可以按程度分为轻度、中度和重度疲劳。轻度疲劳稍事休息即可恢复，属正常现象；中度疲劳有疲乏、腿痛、心悸的感觉；重度疲劳除疲乏、腿痛、心悸外，尚有头痛、胸痛、恶心甚至呕吐等征象，而且这些征象持续时间较长。

轻度、中度和重度疲劳都属于生理性疲劳，是机体功能暂时下降的生理学现象。疲劳是一种不适感受，同时客观上也标志着机体原有活动和工作能力的暂时下降，短时间的疲劳感受是对自身机体的保护，然而长期疲劳则可能是机体发展到伤病状态的先兆。

世界卫生组织（World Health Organization，简称 WHO）的一项全球性调查表明，真正健康的人只占 5%，患有疾病的人占 20%，而 75% 的人则处于亚健康状态。亚健康状态最突出的感受就是易疲劳，尤其是超过 35 岁以后的人群，在精力下降的生理状态下，工作压力丝毫不减，因此导致疲劳人群非常大。我国中年人长期处于疲劳状态的比例超过 70%，可引起运动能力降低、战斗力减退、工作效率降低、差错事故增多、抑郁和焦虑。疲劳发生后，如果得不到及时的恢复，逐渐积累，还会导致“过劳”，出现过度训练综合征、慢性疲劳综合征等，使机体发生内分泌紊乱、免疫力下降、生活质量下降，甚至出现器质性病变，成为威胁人类健康的重要因素。在社会竞争日益激烈、人们日益讲求工作实效且重视身体保健的今天，利用天然植物资源开发安全有效的抗疲劳产品，已成为预防医学和运动医学研究的热点。

二、运动性疲劳

（一）运动性疲劳的概念

运动性疲劳（exercise-induced fatigue）是机体进行体育锻炼和运动训练中不可避免的现象，也是限制锻炼和训练效果的重要因素之一。

运动性疲劳是指在运动过程中，当机体生理过程不能持续保持在特定水平和（或）不能维持预定的运动强度。这是运动负荷所引起的一种正常的生理现象，主要表现为机体工作能力暂时性下降。运动性疲劳既是机体对运动负荷所做出的一种必然性反应，同时又是进一步引起机体产生适应性变化的有效刺激，适度的运动性疲劳可以刺激机体机能水平不断提高。如果运动性疲劳发展到一定

程度机体出现衰损时，则称为运动性力竭（exercise-induced exhaustion）。

早期在体育生物科学的教材或文章中，把运动疲劳和劳动疲劳都定义为“运动持续一段时间后，机体不能维持原强度工作。”直至1982年第五届国际运动生化会议上才把运动性疲劳正式定义为“身体机能的生理过程不能持续在一定水平和（或）整体不能维持预定的运动强度”。

这个定义反映了运动的特点，主要表现在：

（1）在运动疲劳研究时，要将身体各组织器官的机能水平和运动能力结合起来分析疲劳发生和发展的规律；

（2）评定运动疲劳要将生理生化指标（如心率、最大摄氧量、血乳酸、血尿素、血红蛋白等）和运动能力（如在功率机上的输出功率、在运动场上的成绩等）结合起来；

（3）运动疲劳应注意专项特点，如100m跑和马拉松跑都存在不能维持预定运动强度（疲劳）的问题，体内生理生化变化不同，和劳动疲劳有根本区别。过去“以机体不能维持原强度工作或工作能力下降”为依据来判定疲劳，现在根据运动性疲劳的新概念来评定，应增加身体机能评定指标，这有利于研究的客观性和合理性。

（二）运动性疲劳的分类

（1）按局部和整体划分：局部疲劳和整体疲劳。局部疲劳是指以身体某一局部持续运动导致的局部器官机能下降，如局部肌肉训练、专门动作训练等；整体疲劳是指由全身运动引起的机体调控机能和多器官机能下降导致的疲劳，如马拉松、铁人三项和足球比赛等。

（2）按身体器官划分：骨骼肌疲劳、心血管疲劳和呼吸系统疲劳。骨骼肌疲劳是指骨骼肌持续收缩导致的收缩机能下降，如力量训练后肌肉力量下降和肌肉僵硬等；心血管疲劳是指运动引起的心血管系统及其调节机能下降，如运动后心率恢复速度减慢、心输出量减少和心电图S-T段降低等；呼吸系统疲劳是指运动引起呼吸机能下降，如剧烈运动时，使得呼吸表浅、急促，时间肺活量和有效通气量急剧减少等。

（3）按运动时间划分：快速疲劳和慢速疲劳。快速疲劳是指大强度、剧烈运动引起的身体机能下降，如短跑、跳跃和投掷等；慢速疲劳是指小强度、长时间运动导致的身体机能下降。

（4）在体育运动过程中，运动性疲劳的发生机制是十分复杂，可以发生在直接参与运动的部位，主要涉及骨骼肌及其与神经之间联系（即神经骨骼肌接头），也可以发生在控制运动的中枢神经系统。目前在体育科学研究中，我们通常按照运动性疲劳发生的部位和机制不同，综合起来分为：运动性中枢疲劳和