



铁代谢

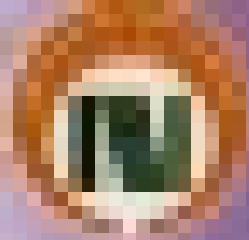
Iron Metabolism 与相关疾病
and Diseases

钱忠明 柯亚 主编



科学出版社

www.sciencep.com



铁代谢

Iron Metabolism and Disease

铁代谢与疾病

人民卫生出版社
People's Health Press

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

铁代谢与相关疾病

钱忠明 柯 亚 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书总结了近 10 年铁代谢从基础到临床的研究进展。全书共 26 章。第 1~11 章是基础部分,讨论了铁的生物学作用、毒性、吸收、转运、释放,以及参与铁代谢的主要蛋白质的结构和功能;第 12~26 章是临床部分,讨论了常见铁代谢紊乱疾病如神经变性疾病、遗传性血色素沉着病、运动性贫血、弗里德赖希共济失调、低氧、骨质矿化异常、妊娠期贫血等与铁代谢的关系,阐述了转铁蛋白-转铁蛋白受体系统在药物运输和定向给药中的应用及铁调素相关药物的药理学应用。

本书可供高等医学院校、综合性大学相关专业的本科生、研究生、教师和相关科研单位的研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

铁代谢与相关疾病/钱忠明,柯亚主编. —北京:科学出版社,2010.8
ISBN 978-7-03-028495-2

I. ①铁… II. ①钱…②柯… III. ①铁-微量元素-代谢病-研究
IV. ①R589.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 149849 号

责任编辑:王海光 李晶晶 席 慧/责任校对:张怡君
责任印制:钱玉芬/封面设计:北京美光制版有限公司

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010 年 8 月第一次印刷 印张:21 1/2 插页:4

印数:1—1 800 字数:474 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《铁代谢与相关疾病》编委会名单

主 编 钱忠明 柯 亚

副主编 朱 俐 常彦忠 谢俊霞

编 委 (排名不分先后)

范 明	军事医学科学院基础医学研究所
文允鎰	中国医学科学院基础医学研究所
	中国协和医科大学基础医学院
章海燕	中国科学院上海药物研究所
申秀萍	天津药物研究院
王 琴	中山大学中山医学院
肖德生	广州医学院公共卫生与全科医学学院
王立红	厦门大学医学院
赵晋英	山西医科大学基础医学院
谢俊霞	青岛大学医学院
王 俊	青岛大学医学院
陈文芳	青岛大学医学院
姜 宏	青岛大学医学院
徐又佳	苏州大学附属第二医院
温仲民	苏州大学附属第二医院
张 霞	苏州大学附属第二医院
马 勇	苏州大学附属第二医院
朱 俐	南通大学医学院
王 丹	南通大学医学院
李洁佳	南通大学医学院
郝春华	南通大学医学院
骆倩倩	南通大学医学院
常彦忠	河北师范大学生命科学学院
段湘林	河北师范大学生命科学学院

于 鵬

田艳燕

关 鹏

崔 瑞

樊玉梅

柯 亚

杜 方

吴小梅

黄霄天

胡 春

谭兆详

容永豪

朱倩

李艳伟

汪程远

曷嘯虎

柳长柏

閨 挹

钱忠明

河北师范大学生命科学学院

河北师范大学生命科学学院

河北师范大学生命科学学院

河北师范大学生命科学学院

河北师范大学生命科学学院

香港中文大學醫學院

香港中文大學醫學院

香港中文大學醫學院

香港中文大學醫學院

香港中文大學醫學院

香港中文大學醫學院

香港中文大學醫學院

香港理工大学应用生物和化学技术系

香港理工大学应用生物和化学技术系

香港理工大学应用生物和化学技术系

香港理工大学应用生物和化学技术系

香港理工大学应用生物和化学技术系

香港理工大学应用生物和化学技术系

香港理工大学应用生物和化学技术系

序

铁作为一种人体必需的微量元素，人们对它的生理学作用与健康功能早有认识。长期以来，对铁的研究主要集中于铁缺乏/缺铁性贫血的原因和防治。根据世界卫生组织估计，全球约有 8 亿人患缺铁性贫血，大部分集中在发展中国家，对儿童体格和智力发育、人群免疫功能、社会劳动生产力产生严重危害，被认为全球三大“隐性饥饿”之首。然而，随着人们对铁代谢认识的发展和进步，揭示了铁对人体健康和疾病影响的另一方面。如同当前营养学研究领域中，一方面是与贫穷有关的营养不良而造成儿童生长发育迟缓、智力低下、劳动生产力落后，而另一方面则是营养过度而造成肥胖、代谢综合征、心脑血管病等慢性非传染性疾病。在铁的研究方面，当今也从铁缺乏扩展到偏重于较发达社会中的体内铁负荷过多以及铁代谢障碍及其相关疾病。而近年来铁代谢基础研究方面的突出进展显然起到了重要的推动作用。

钱忠明教授等于 10 年前出版了《铁代谢——基础与临床》一书，阐述了细胞的铁转运和铁吸收机制以及对某些遗传性和神经系统疾病的影响，引起了人们对铁代谢的关注。时隔 10 年，钱忠明教授基于他十多年来在铁代谢方面的研究成果和心得，又组织了我国从事铁代谢研究的知名专家，编著了《铁代谢与相关疾病》一书，全面阐述了铁代谢方面（特别是诸多铁代谢蛋白）当前的最新研究进展，包括广为关注的铁调素和铁稳态，以及铁代谢与相关疾病的关系，包括脑铁代谢与神经变性疾病、急性脑出血、阿尔茨海默病等当前最受重视的疾病。

我在此衷心祝贺该书的出版，并愿意向生物学、医学专家，临床医生和学生推荐这本信息丰富的参考书。我也希望该书的出版能有力地推动我国铁代谢与相关疾病的研究和防治。

陈君石

中国工程院院士

2010 年 4 月于北京

前 言

自《铁代谢——基础与临床》一书于2000年由科学出版社出版以来，已近10年。10年来，铁代谢生理与病理生理学研究取得了巨大的进展。2000年前后发现的众多新的铁代谢蛋白，包括二价金属离子转运蛋白1(DMT1)、转铁蛋白受体2(TfR2)、膜铁转运蛋白(FPN1)、膜铁转运辅助蛋白(HP)、铁还原酶(Dcytb)、血红素载体蛋白1(HCP1)、铁调素(Hepc)和铁调素调节蛋白(HJV)等，以及随后关于这些蛋白质的生物学功能的研究，使我们对铁的生物学重要性，以及人体如何维持生理铁平衡有了更为完整的认识。今天越渐丰富的铁代谢知识已使人们很好地认识到大量人类疾病与铁代谢紊乱相关。事实上，铁代谢紊乱引起的疾病影响着很多人的生活。

长期以来，缺铁性贫血一直是一个全球性的公共卫生问题。根据世界卫生组织估计，全球约有8亿人患缺铁性贫血，且大部分集中在发展中国家。目前，铁缺乏的问题在我国广泛存在。中国疾病预防控制中心近期研究表明，全国约有2亿多人患缺铁性贫血，一些贫困地区的育龄妇女和儿童贫血患病率甚至高达50%以上。2002年的一次全国营养调查表明，全国缺铁性贫血的患病率高达15.8%（男）~23.3%（女），年龄小于2岁的患病率为31%，孕妇为28.9%。即使是北京、上海等大城市，成年妇女的贫血率也在15%左右。对于儿童来说，长期缺铁会影响生长发育，造成身高不足，还会影响智力发育。对于成年人来说则会影响劳动生产率。以纺织女工为例，贫血和不贫血的女工劳动生产率相差很远。对于孕妇而言，影响更大。孕妇因严重贫血在怀孕、分娩期间死亡的例子很多。此外，缺铁还会使患者对急性传染病的抵抗力下降，增加患病概率。中国疾病预防控制中心陈君石院士的研究组经过多年的研究，发现将新型铁强化剂乙二胺四乙酸铁钠(NaFeEDTA)加入酱油，可极大地提高人体对铁的总吸收率，为防治铁缺乏和缺铁性贫血作出了极为重要的贡献。

此外，过往10年累积的证据清楚地显示，铁过负荷引起的疾病所影响的人口数量远比以前预计的多，对人类的影响也远比以前认识的严重。研究已清楚地证实先天遗传或后天因素造成的铁代谢蛋白表达以及铁过负荷可以是众多人类疾病的起始原因。关于铁代谢基因遗传缺陷以及毒理学的最新研究，证实异常增加的脑铁至少是部分神经退行性疾病神经元死亡的一个起始原因，先天遗传或后天因素造成的脑铁代谢蛋白表达紊乱是脑铁异常增加的原因，脑铁代谢紊乱可以发生在多个水平，包括铁摄取、释放、储存、细胞内铁代谢和铁调节。正是异常增加的脑铁触发了一系列病理事件最终导致神经退行性疾病的神经元死亡。研究也已显示，随年龄增加而增加的脑铁积聚可能是阿尔茨海默病及其他老年性神经退行性疾病发病的起始原因。此外，铁代谢紊乱引起的铁过负

荷也可导致其他多种心血管疾病、糖尿病(Ⅱ型)、骨质疏松症等骨发生发展性疾病。

在过去 10 年取得的众多关于铁代谢的研究成就中,最值得一提的是铁调素的发现。无疑,这一在 2001 年获得的发现是近 10 年来铁代谢研究的最重大突破。铁调素的发现及近年的进一步研究,使我们对小肠铁吸收、肝脾铁储存与骨髓铁利用三者间的相互调节机制这一基本生理问题有了比较充分的认识。也使我们开始明白铁代谢在人体防御系统中举足轻重的地位以及炎症性贫血的真实起因。近年关于脑内铁调素功能的研究,以及增加脑内铁调素(内源性表达及外源性给予)对神经退行性疾病动物模型脑铁含量及脑铁代谢蛋白表达影响的研究,使我们看到了铁调素极有可能被开发成为防治铁相关的老年性神经退行性疾病的有效新药的希望。

这些让人兴奋不已的铁代谢研究的众多成就和进展,使我深感有必要重新编写一本铁代谢中文专著。在《铁代谢与相关疾病》一书的编写过程中,我要求参编者竭尽所能详细论述近 10 年来铁代谢研究领域所取得的成就和进展,使读者能够了解最新的铁代谢知识。我希望能给医学院校和综合性大学生命科学相关专业的学生、老师以及从事临床科学的医护工作者和科研人员提供一本实用的参考书。也衷心期望本书的出版能起到进一步推动铁代谢研究的作用。

在本书的编写过程中,我十分幸运地邀请到了我国从事铁代谢研究的诸多知名学者参与,包括青岛大学医学院谢俊霞教授、河北师范大学生命科学学院常彦忠教授、南通大学医学院朱俐教授、苏州大学附属第二医院徐又佳教授和温仲民博士、中山大学中山医学院王琴博士和广州医学院公共卫生与全科医学学院肖德生教授。他们均在铁代谢研究领域作出了重要的贡献。他们在百忙之中积极、认真地完成了有关章节的编写工作,他们的参与和支持使得本书的学术水平和质量得到了保障。在此,我衷心地向这些令人崇敬的同道致以最诚挚的谢意!真诚地感谢本书的另一主编香港中文大学医学院柯亚教授,及她的实验室的全体人员,感谢他们在本书编写过程中不可缺少的贡献以及在最终书稿审定方面所做的努力。我也最衷心地感谢我的爱子钱晨(Christopher Qian),感谢他在繁重的高中学习中抽出时间热心参与英文文献的翻译工作,感谢他一直以来对我繁忙工作的理解和支持以及真诚的爱,衷心地感谢我的太太,感谢她多年来对我工作的理解和支持。此刻,我无比思念我的慈父慈母,最由衷地感谢他们的培养和教育,感谢他们给了我人世间最伟大的无微不至的爱,我将永远铭记他们对我的期望,不断地努力工作。

在本书得以问世之际,我深切地感谢中国疾病预防控制中心陈君石院士,感谢他在百忙之中为本书作序。我也真心地向李艳伟硕士、朱倩硕士、蔺艳讲师、杜方博士、吴小梅博士、黄霄天博士和胡春博士表示真诚的谢意,感谢他们的倾力支持和帮助,是他们废寝忘食、任劳任怨地完成了本书大量的编写、审校和修订工作。衷心地感谢我的其他博士和硕士研究生以及研究助手,感谢他们在繁忙的论文及实验研究工作中,抽出时

间积极地参与本书的编写、修改和校对工作。

本书的出版得到了“国家科学技术学术著作出版基金”的资助，以及香港政府大学教育资助委员会 RGC 研究基金（CUHK466907、N-CUHK433/08、PolyU562309），香港中文大学、香港理工大学研究基金和深港科技合作项目（2007～2009 年）研究基金的支持。科学出版社对本书的出版给予了热心支持和帮助，在此一并致以我最衷心的感谢。

钱忠明

2010 年 4 月于香港

目 录

序

前言

第 1 章 铁的生物学作用与毒性	1
1.1 铁的生物学功能	1
1.1.1 血红蛋白与肌红蛋白	1
1.1.2 细胞色素	2
1.1.3 铁硫蛋白	2
1.1.4 含铁酶	2
1.2 铁的毒性	3
1.2.1 铁过量的毒理学	3
1.2.2 铁毒性与自由基病理学	3
1.2.3 铁的急性中毒和慢性中毒	4
1.2.4 铁的细胞毒性	4
1.2.5 铁的致癌作用——基因毒性	5
1.3 与铁相关的疾病	5
1.3.1 缺铁性贫血	5
1.3.2 铁与神经系统相关疾病	5
1.3.3 铁与血色素沉着病	6
1.3.4 铁与心脏病	6
1.3.5 铁与癌	6
1.3.6 铁与感染	6
1.3.7 其他	7
1.4 小结	7
参考文献	7
第 2 章 铁代谢蛋白	10
2.1 细胞铁代谢	11
2.1.1 食物中的铁吸收	11
2.1.2 细胞铁摄取、转铁蛋白循环以及红细胞铁利用	12
2.1.3 线粒体铁代谢	13
2.2 维持铁稳态的铁代谢蛋白	14
2.3 小结	15
参考文献	15
第 3 章 转铁蛋白与转铁蛋白受体	19
3.1 转铁蛋白与转铁蛋白受体的基本生物学特性	19
3.1.1 转铁蛋白的基本生物学特性	19

3.1.2 转铁蛋白受体的基本生物学特性	21
3.1.3 转铁蛋白与转铁蛋白受体循环	23
3.2 转铁蛋白与转铁蛋白受体的表达调控	25
3.2.1 转铁蛋白的表达调控	25
3.2.2 转铁蛋白受体的表达调控	25
3.3 转铁蛋白与转铁蛋白受体的应用	27
3.3.1 转铁蛋白的应用	27
3.3.2 转铁蛋白受体的应用	28
3.4 小结	28
参考文献	29
第4章 二价金属离子转运蛋白1	30
4.1 二价金属离子转运蛋白1的表达、分布、结构和类型	30
4.2 二价金属离子转运蛋白1的生理功能	32
4.2.1 二价金属离子转运蛋白1介导小肠铁吸收	32
4.2.2 二价金属离子转运蛋白1介导内吞小体铁移位	32
4.3 二价金属离子转运蛋白1的表达调控	33
4.4 二价金属离子转运蛋白1与铁紊乱和神经退行性疾病	34
4.5 小结	35
参考文献	35
第5章 膜铁转运蛋白和膜铁转运辅助蛋白	39
5.1 膜铁转运蛋白和膜铁辅助转运蛋白的发现	39
5.2 膜铁转运蛋白和膜铁转运辅助蛋白的分布	41
5.3 膜铁转运蛋白和膜铁转运辅助蛋白的功能	42
5.4 膜铁转运蛋白和膜铁转运辅助蛋白表达的调控	43
5.5 膜铁转运蛋白和膜铁转运辅助蛋白相关疾病	45
5.6 小结	48
参考文献	48
第6章 黑素细胞瘤相关抗原	52
6.1 黑素细胞瘤相关抗原与铁代谢	53
6.2 黑素细胞瘤相关抗原与阿尔茨海默病	56
6.3 黑素细胞瘤相关抗原的其他功能	59
6.4 小结	60
参考文献	60
第7章 铁调素	64
7.1 铁稳态	64
7.1.1 人体铁代谢	64
7.1.2 机体铁稳态	65
7.2 铁调素	65
7.2.1 铁调素的分子结构和活性	65

7.2.2 铁调素的基因表达与调控	66
7.3 铁调素和铁稳态	66
7.3.1 铁状态的感知	66
7.3.2 铁调素对铁代谢的调节	67
参考文献	69
第8章 铁调素调节蛋白	72
8.1 铁调素调节蛋白基因及其表达、分布与调控	72
8.2 铁调素调节蛋白的功能	73
8.2.1 铁调素调节蛋白是铁调素表达所必需的调节蛋白	73
8.2.2 铁调素调节蛋白直接调节细胞铁转运	74
8.3 铁调素调节蛋白基因突变是青少年血色素沉着病的主要原因	75
8.4 小结	76
参考文献	76
第9章 小肠铁吸收	79
9.1 铁吸收机制	79
9.1.1 非血红素铁（无机铁）的吸收	79
9.1.2 血红素铁（有机铁）的吸收	82
9.2 影响铁吸收的因素	83
9.2.1 小肠黏膜的影响	83
9.2.2 铁状态的影响	84
9.2.3 食物中铁的形式	84
9.2.4 食物的物理性状	84
9.2.5 食物中的促进剂	85
9.2.6 食物中的抑制剂	86
9.2.7 胃肠消化液及黏液	87
9.2.8 剂量的影响	88
9.3 铁吸收的调节	88
9.4 小结	88
参考文献	89
第10章 细胞铁摄取	92
10.1 转铁蛋白结合性铁摄取途径	92
10.1.1 结合	93
10.1.2 内吞	94
10.1.3 酸化	95
10.1.4 解离和还原	96
10.1.5 二价金属离子转运体1介导的移位过程	96
10.1.6 胞质内的铁转移	97
10.1.7 脱转铁蛋白返回细胞膜	98
10.2 非转铁蛋白结合性铁的摄取途径	98
10.2.1 二价金属离子转运蛋白1介导的细胞摄铁	98

10.2.2 L 型钙通道介导的细胞摄铁	98
10.2.3 铁蛋白介导的细胞摄铁	99
10.2.4 锌铁调控蛋白介导的细胞摄铁	99
10.2.5 膜铁载体介导的细胞摄铁	99
10.3 小结	100
参考文献	100
第 11 章 细胞铁释放	104
11.1 概述	104
11.2 铁释放的主要方式	104
11.2.1 肠上皮细胞的铁释放	104
11.2.2 脑内细胞的铁释放	105
11.2.3 肝细胞和巨噬细胞的铁释放	106
11.3 铁释放的调节机制	106
11.3.1 铁释放与铁稳态的维持	107
11.3.2 铁释放的调节模式	107
11.3.3 铁释放的调节机制	107
11.4 小结	108
参考文献	108
第 12 章 转铁蛋白受体 2 的功能及其相关疾病	110
12.1 转铁蛋白受体 2 的表达与调控	110
12.2 转铁蛋白受体 2 在铁代谢中的功能及其调节机制	111
12.2.1 转铁蛋白受体 2 在铁代谢中的功能	111
12.2.2 转铁蛋白受体 2 与铁代谢相关分子的关系	112
12.3 转铁蛋白受体 2 与铁代谢相关疾病的关系	115
12.3.1 转铁蛋白受体 2 与遗传性血色素沉着病	115
12.3.2 转铁蛋白受体 2 与无转铁蛋白血症	116
12.3.3 转铁蛋白受体 2 与急性髓性白血病	117
12.4 小结	117
参考文献	118
第 13 章 脑铁代谢与神经变性疾病	121
13.1 脑铁的分布、区域与功能蛋白	121
13.2 脑内铁转运的机制	122
13.2.1 铁通过血-脑屏障的机制	122
13.2.2 脑内铁转运和脑细胞铁摄取	124
13.3 脑铁与神经变性疾病的关系	125
13.3.1 脑铁代谢紊乱是某些神经变性疾病的始发因素	125
13.3.2 异常增高的脑铁和铁诱发的氧化应激是神经变性疾病发展的共同机制	127
13.4 小结	127
参考文献	128

第 14 章 铜蓝蛋白及其相关疾病	130
14.1 铜蓝蛋白的结构	130
14.2 铜蓝蛋白的生物功能	130
14.2.1 铜蓝蛋白在铜转运中的功能	130
14.2.2 铜蓝蛋白在铁代谢中的功能	131
14.2.3 铜蓝蛋白的其他功能	132
14.3 铜蓝蛋白在脑内的分布、表达和调控	132
14.4 铜蓝蛋白在脑铁代谢中的作用	133
14.5 无铜蓝蛋白血症患者脑铁沉积的原因	135
14.6 小结	136
参考文献	137
第 15 章 脑铁代谢与急性脑缺血损伤	139
15.1 背景	139
15.2 缺血性脑卒中的病理生理学	139
15.2.1 兴奋性毒性和离子失衡	140
15.2.2 缺血性脑卒中的氧化/亚硝基化应激	140
15.2.3 坏死和凋亡	141
15.3 铁稳态对于维持正常脑功能的重要性	141
15.4 缺血性卒中后铁在脑组织释放的来源	142
15.5 急性脑缺血后脑铁代谢的变化和氧化应激	143
15.6 铁在急性脑缺血中作用的实验室与临床研究	144
15.7 缺血性卒中后铁介导的神经功能损伤时间特征	146
15.8 小结	147
参考文献	148
第 16 章 脑铁代谢与阿尔茨海默病	151
16.1 阿尔茨海默病时脑铁含量的变化	151
16.2 铁在阿尔茨海默病发病中的作用机制	154
16.3 阿尔茨海默病与脑铁代谢相关蛋白	155
16.3.1 铁调节蛋白、铁反应元件与阿尔茨海默病	155
16.3.2 转铁蛋白与阿尔茨海默病	156
16.3.3 二价金属离子转运蛋白 1 与阿尔茨海默病	157
16.3.4 Ft 与阿尔茨海默病	157
16.3.5 膜铁转运蛋白与阿尔茨海默病	158
16.3.6 遗传性血色素沉着病蛋白与阿尔茨海默病	158
16.3.7 铜蓝蛋白与阿尔茨海默病	158
16.3.8 黑素转铁蛋白与阿尔茨海默病	159
16.4 阿尔茨海默病与去铁疗法	159
16.5 小结	161
参考文献	161

第 17 章 遗传性血色素沉着病蛋白与遗传性血色素沉着病	165
17.1 血色素沉着病基因及其表达蛋白	165
17.2 血色素沉着病基因突变	166
17.3 遗传性血色素沉着病蛋白-转铁蛋白受体复合体的结构及其相互作用	167
17.4 遗传性血色素沉着病蛋白的生理功能及血色素沉着病基因变异的致病机制	169
17.5 诊断方法	170
17.6 治疗方法	171
17.7 小结	171
参考文献	172
第 18 章 线粒体铁代谢和弗里德赖希共济失调	175
18.1 线粒体内膜蛋白基因及其表达	175
18.2 线粒体内膜蛋白结构	176
18.2.1 线粒体内膜蛋白分子结构	176
18.2.2 线粒体内膜蛋白在线粒体内的加工	178
18.3 线粒体内膜蛋白的功能	178
18.3.1 线粒体内膜蛋白在线粒体铁代谢中的作用	178
18.3.2 线粒体内膜蛋白的线粒体外功能	179
18.3.3 线粒体内膜蛋白的其他功能	179
18.4 线粒体内膜蛋白与铁代谢	180
18.4.1 线粒体内膜蛋白与铁离子结合	180
18.4.2 线粒体内膜蛋白发挥类似铁蛋白功能	180
18.4.3 线粒体内膜蛋白作为铁分子伴侣参与亚铁血红素代谢	180
18.4.4 线粒体内膜蛋白参与了活性氧簇产生调控	181
18.5 线粒体内膜蛋白基因突变与弗里德赖希共济失调	181
18.5.1 弗里德赖希共济失调	181
18.5.2 线粒体内膜蛋白基因变异	181
18.6 线粒体内膜蛋白研究的细胞与动物模型	182
18.6.1 小鼠弗里德赖希共济失调模型	182
18.6.2 其他弗里德赖希共济失调模型	183
18.7 小结	183
参考文献	184
第 19 章 运动与铁代谢	188
19.1 铁代谢与铁稳态对运动的影响	189
19.1.1 红细胞和血红蛋白与最大运动能力	189
19.1.2 组织铁、储存铁与运动耐力	189
19.1.3 铁、氧化应激与肌肉损伤	190
19.1.4 小结	191
19.2 运动对人体铁代谢的影响	191
19.2.1 运动诱导的血液浓缩与稀释效应	191

19.2.2 运动诱导的溶血效应	192
19.2.3 运动诱导铁丢失	193
19.2.4 运动影响铁吸收	194
19.2.5 运动对机体铁周转和骨髓组织的作用	194
19.2.6 小结	195
19.3 对运动人体铁状态的描述与铁缺乏的诊断与发生率	195
19.3.1 铁状态指标及运动的影响	195
19.3.2 与运动相关的常见因素对铁代谢研究的干扰	197
19.3.3 运动人体铁缺乏诊断与筛查	198
19.3.4 小结	200
19.4 运动人体的铁补充及其危险	201
19.4.1 隐性铁缺乏时铁补充的效果	201
19.4.2 隐性铁缺乏时铁补充对运动能力的作用及其与铁状态改变的关系	201
19.4.3 铁补充方法	203
19.4.4 补铁面临的危险	204
19.4.5 小结	204
19.5 运动模型动物中的铁代谢与铁状态	204
19.5.1 动物模型与实验动物的饲料	204
19.5.2 运动对血液铁状态指标的影响	206
19.5.3 运动对组织铁含量或铁储存的影响	206
19.5.4 运动对外周组织细胞铁代谢的影响	207
19.5.5 运动对脑组织细胞铁含量的影响	207
19.5.6 运动对铁吸收的影响	208
19.5.7 小结	208
19.6 运动对铁状态影响的相关学说及其评价	208
19.6.1 运动铁缺乏学说	209
19.6.2 血液稀释学说	209
19.6.3 误导学说	209
19.6.4 铁重分布学说	209
19.6.5 生理性保护学说	210
19.6.6 一氧化氮学说	210
19.6.7 小结	211
参考文献	211
第20章 铁调素与骨代谢	216
20.1 骨质矿化	216
20.1.1 骨组织	216
20.1.2 骨的矿化平衡及其调节	217
20.1.3 细胞因子在骨矿化过程的影响	219
20.2 铁代谢与骨质矿化的关系	221
20.2.1 铁代谢与髌部骨性疾患	221
20.2.2 铁代谢与骨质疏松症	221