



生物力学研究前沿系列
总主编 姜宗来 樊瑜波

骨与关节生物力学

Biomechanics of Bone and Joints

张西正 汤亭亭 主编



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

生物力学研究前沿系列
总主编 姜宗来 樊瑜波

骨与关节生物力学

张西正 汤亭亭 主编



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书是“生物力学研究前沿系列”之一。书的内容首先是骨与关节生物力学研究的基本方法、力学生物学的基本原理和方法及骨与关节的生物力学实验技术;其次是21世纪以来我国在骨与关节临床生物力学、力学生物学研究方面的新成果与新进展,包括对骨质疏松和骨关节炎生物力学发生机制的认识、关节和脊柱的生物力学基本知识及临床应用,以及与假体和骨折内固定设计有关的生物力学原则,骨与软骨组织工程中的生物力学问题等。

本书内容对骨生物力学研究人员、骨科临床医生、研究生均有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

骨与关节生物力学 / 张西正, 汤亭亭主编. —上海:
上海交通大学出版社, 2017
(生物力学研究前沿系列)
ISBN 978-7-313-18500-6

I. ①骨… II. ①张… ②汤… III. ①骨骼—生物力学
②关节—生物力学 IV. ①R322.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 302552 号

骨与关节生物力学

主 编: 张西正 汤亭亭

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 谈 毅

印 制: 上海锦佳印刷有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

字 数: 833 千字

版 次: 2017 年 12 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-18500-6/R

定 价: 468.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 36.5

印 次: 2017 年 12 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 021-56401314

序 一

欣闻姜宗来教授和樊瑜波教授任总主编的一套“生物力学研究前沿系列”丛书,即将由上海交通大学出版社陆续出版,深感欣慰。谨此恭表祝贺!

生物力学(biomechanics)是研究生命体变形和运动的学科。现代生物力学通过对生命过程中的力学因素及其作用进行定量的研究,结合生物学与力学之原理及方法,得以认识生命过程的规律,解决生命与健康的科学问题。生物力学是生物医学工程学的一个重要交叉学科,对探讨生命科学与健康领域的重大科学问题作出了很大的贡献,促进了临床医学技术与生物医学材料的进步,带动了医疗器械相关产业的发展。

1979年以来,在“生物力学之父”冯元桢(Y. C. Fung)先生的亲自推动和扶植下,中国的生物力学研究已历经了近40年的工作积累。尤其是近十多年来,在中国新一代学者的努力下,中国的生物力学研究有了长足的进步,部分研究成果已经达到国际先进水平,从理论体系到技术平台均有很好的成果,这套“生物力学研究前沿系列”丛书的出版真是适逢其时。

这套丛书的总主编姜宗来教授和樊瑜波教授以及每一分册的主编都是中国生物力学相关领域的学术带头人,丛书的作者们也均为科研和临床的一线专家。他们大多在国内外交受过交叉学科的系统教育,具有理工生医多学科的知识背景和优越的综合交叉研究能力。该丛书的内容涵盖了血管力学生物学、生物力学建模与仿真、细胞分子生物力学、组织修复生物力学、骨与关节生物力学、口腔力学生物学、眼耳鼻咽喉生物力学、康复工程生物力学、生物材料力学和人体运动生物力学等生物力学研究的主要领域。这套丛书立足于科技发展前沿,旨在总结和展示21世纪以来中国在生物力学领域所取

得的杰出研究成果,为力学、生物医学工程以及医学等相关学科领域的研究生和青年科技工作者们提供研究参考,为生物医学工程相关产业的从业人员提供理论导引。这套丛书的出版适时满足了生物力学学科出版领域的需求,具有很高的出版价值和积极的社会意义。可以预见这套丛书将能为广大科技工作者提供学术交流的平台,因而促进中国生物力学学科的进一步发展和年轻人才的培养。

这套丛书是用中文写的,对全球各地生物力学领域用中文的学者有极大意义。目前,生物力学这一重要领域尚无类似的、成为一个系列的英文书籍。希望不久的将来能看到这套丛书的英文版,得以裨益世界上所有的生物力学及生物医学工程学家,由此促进全人类的健康福祉。

钱煦

美国加州大学医学与生物工程总校教授

美国加州大学圣迭戈分校工程与医学研究院院长

美国国家科学院院士

美国国家工程院院士

美国国家医学院院士

美国艺术与科学院院士

美国国家发明家学院院士

中国科学院外籍院士

序 二

人体处于力学环境之中。人体各系统,如循环系统、运动系统、消化系统、呼吸系统和泌尿系统等的生理活动均受力学因素的影响。力是使物体变形和运动(或改变运动状态)的一种机械作用。力作用于机体组织细胞后不仅产生变形效应和运动效应,而且可导致其复杂的生理功能变化。生物力学(biomechanics)是研究生命体变形和运动的学科。生物力学通过生物学与力学原理方法的有机结合,认识生命过程的规律,解决生命与健康领域的科学问题。

20世纪70年代末,在现代生物力学开创者和生物医学工程奠基人、被誉为“生物力学之父”的著名美籍华裔学者冯元桢(Y. C. Fung)先生的大力推动和热情关怀下,生物力学作为一门新兴的交叉学科在我国起步。随后,我国许多院校建立了生物力学的学科基地或研究团队,设立了生物力学学科硕士学位授权点和博士学位授权点。自1982年我国自己培养的第一位生物力学硕士毕业以来,陆续培养出一批接受过良好交叉训练的青年生物力学工作者,他们已逐渐成为我国生物力学学科建设和发展的骨干力量。20世纪80年代以来,我国生物力学在生物流变学、心血管生物力学与血流动力学、骨关节生物力学、呼吸力学、软组织力学和药代动力学等领域开展了研究工作,相继取得了一大批有意义的成果,出版了一些生物力学领域的专著,相关研究成果也曾获国家和省部级的多项奖励。这些工作的开展、积累和成果为我国生物力学事业的发展作出了重要贡献。

21世纪以来,国际和国内生物力学研究领域最新的进展和发展趋势主要有:一是力学生物学;二是生物力学建模分析及其临床应用。前者主要是生物力学细胞分子层次的机制(发现)研究,而后者主要是生物力学解决临床问题的应用(发明)研究,以生物力学理论和方法发展有疗效的或有诊断意义的新概念与新技术。两者的最终目的都是促进生物医学基础与临床以及相关领域研究的进步,促进人类健康。

21 世纪以来,国内生物医学工程、力学、医学和生物专业的科技人员踊跃开展生物力学的交叉研究,队伍不断扩大。以参加“全国生物力学大会”的人数为例,从最初几届的百人左右发展到 2015 年“第 11 届全国生物力学大会”,参会人员有 600 人之多。目前,国家自然科学基金委员会数理学部在“力学”学科下设置了“生物力学”二级学科代码;生命科学部也专为“生物力学与组织工程”设置了学科代码和评审组。在国家自然科学基金的持续支持下,我国的生物力学研究已有近 40 年的工作积累,从理论体系、技术平台到青年人才均有很好的储备,研究工作关注人类健康与疾病中的生物力学与力学生物学机制的关键科学问题,其中部分研究成果已达到国际先进水平。

为了总结 21 世纪以来我国生物力学领域的研究成果,在力学、生物医学工程以及医学等相关学科领域展示生物力学学科的实力和未来,为新进入生物力学领域的研究生和青年科技工作者等提供一个研究参考,我们组织国内生物力学领域的一线专家编写了这套“生物力学研究前沿系列”丛书,其内容涵盖了血管力学生物学、生物力学建模与仿真、细胞分子生物力学、组织修复生物力学、骨与关节生物力学、口腔力学生物学、眼耳鼻咽喉生物力学、康复工程生物力学、生物材料力学和人体运动生物力学等生物力学研究的主要领域。本丛书的材料主要来自各分册主编及其合著者所领导的国内实验室,其中绝大部分成果系国家自然科学基金资助项目所取得的新研究成果。2016 年,已 97 岁高龄的美国国家科学院、美国国家医学院和美国国家工程院院士,中国科学院外籍院士冯元桢先生在听取了我们有关系丛书编写工作进展汇报后,欣然为丛书题词“发展生物力学,造福人类健康”。这一珍贵题词充分体现了先生的学术理念和对我们后辈的殷切希望。美国国家科学院、美国国家医学院、美国国家工程院和美国国家发明家学院院士,美国艺术与科学院院士,中国科学院外籍院士钱煦(Shu Chien)先生为本丛书作序,高度评价了本丛书的出版。我们对于前辈们的鼓励表示由衷的感谢!

本丛书的主要读者对象为高校和科研机构的生物医学工程、医学、生物学和力学等相关专业的科学工作者和研究生。本丛书愿为今后的生物力学和力学生物学研究提供参考,希望能对促进我国生物力学学科发展和人才培养有所帮助。

在本丛书完成过程中,各分册主编及其合著者的团队成员、研究生对相关章节的结果呈现作出了许多出色贡献,在此对他们表示感谢;同时,对本丛书所有被引用和参考的文献作者和出版商、对所有帮助过本丛书出版的朋友们一并表示衷心感谢!感谢国家自然科学基金项目的资助,可以说,没有国家自然科学基金的持续资助,就没有我国生物力学蓬勃发展的今天!

由于生物力学是前沿交叉学科,处于不断发展丰富的状态,加之组织出版时间有限,丛书难免有疏漏之处,请读者不吝赐教、指正。

姜宗来 樊瑜波

2017 年 11 月

前 言

骨骼-肌肉系统(骨骼、肌肉、肌腱、韧带和关节)作为支撑人体、承载与运动的主要器官和组织,是现代生物力学研究的重要对象之一。作为生物力学的重要组成部分,骨与关节生物力学研究在 20 世纪后期得到了迅速发展,成为骨科学、组织工程与再生医学、康复医学等学科的应用基础,在提高骨科临床治疗水平方面起着重要作用,是保障人类健康、重大疾病诊治、医疗器械研发等的基础学科之一。

我国骨与关节生物力学的研究兴起于 20 世纪 80 年代,历经三十余年的发展,基本具备了较完整的学科体系,形成了一支由力学、医学等研究人员组成的基础和临床相结合的研究队伍。骨与关节生物力学作为一门交叉学科,涉及力学、生物学、医学等多学科领域,其研究范围包括骨和关节软骨组织生物力学、骨组织细胞力学和力学生物学的研究,以及面向临床与应用的骨折和骨折固定、假体和内植物设计、骨修复和再生的生物力学研究等。全书共分 25 章,内容大致可以分为 4 个部分:第一部分是骨与关节生物力学基础,主要介绍骨组成、发育和生长的生物学基础,以及骨力学与骨重建、骨结构形态和力学性能、骨与关节生物力学实验技术等生物力学基础。第二部分是骨与关节临床生物力学,主要介绍关节软骨、脊柱、髋关节、膝关节、足踝关节、骨折固定和愈合生物力学,以及低载荷机械振动对骨质疏松和骨折愈合的影响等与骨科临床相关的研究。第三部分是骨与关节力学生物学,主要介绍骨组织细胞对力学刺激的生物学响应、骨重建、骨髓间充质干细胞力学生物学;骨细胞对力学响应的信号通路和组学研究、力学作用下多种骨组织细胞相互影响、力学作用与药物耦合对骨质疏松的影响等力学生物学研究。第四部分是骨与软骨组织工程生物力学,主要介绍力学载荷对组织工程骨构建的影响、骨与软骨组织工程支架材料生物力学、软骨组织工程的生物力学,以及用于骨与软骨组织工程的生物反应器等内容。

本书面向的对象主要是从事骨科生物力学基础研究的科研人员、工作在骨科临床

一线的医务工作者,以及从事骨关节植入物等设计的医疗器械研发人员。因此,本书尽可能在介绍研究成果时,对相应的研究方法进行简约阐述与说明,以便为读者在开展骨与关节生物力学研究、骨科植入物设计、临床手术方案选择中提供专业的生物力学参考。

本书涉及的内容基本上涵盖了国内从事骨与关节生物力学研究的主要研究领域,大部分是作者或所在团队近年来的研究成果以及临床应用经验,体现和代表了我国骨与关节生物力学研究领域最新的研究成果与未来发展趋势。本书的每一位作者均是我国骨与关节生物力学基础和临床研究的骨干力量,在承担繁重科研和临床任务的同时,高效地完成了本书的编撰工作,谨向他们表示由衷的敬意!另外,本书中的部分章节内容参考引用了国内外同行公开发表的学术成果(包括部分研究方法、结果数据和图片),也谨向他们表示诚挚的感谢!本书(丛书分册)编撰工作得以顺利进行,还要感谢丛书总主编姜宗来、樊瑜波教授的整体策划和精心组织,同时也要感谢上海交通大学出版社的编辑们在此书出版过程中付出的艰辛和努力!

张西正 汤亭亭

2017年10月19日

目 录

1	绪论：中国骨科生物力学的发展 / 戴尅戎	1
1.1	生物力学的传承及发展	1
1.2	骨科生物力学的现状及发展	2
1.3	骨与关节生物力学及力学生物学	3
1.4	运动生物力学	6
1.5	骨科计算生物力学	8
1.6	总结及展望	10
	参考文献	11
2	骨的生物学基础：骨的组成、发育和生长 / 汤亭亭 乔涵	13
2.1	骨组织的基本组成	13
2.1.1	有机成分	13
2.1.2	无机成分	14
2.2	骨骼的基本形态和结构	14
2.2.1	骨膜	15
2.2.2	骨单位	15
2.2.3	骨髓	16
2.2.4	骨的血液供应	17
2.3	骨内的主要细胞成分	17
2.3.1	成骨细胞	17
2.3.2	破骨细胞	19

2.3.3	骨细胞	20
2.3.4	衬细胞	21
2.4	人体骨骼的发育和调控	21
2.4.1	软骨的形成	22
2.4.2	骨的形成	22
2.4.3	骨的钙化和矿化	24
2.5	骨组织的基本生理活动：生长、改建、重建和代谢	24
2.5.1	骨的生长	24
2.5.2	骨改建	25
2.5.3	骨重建	25
2.5.4	骨代谢	27
2.5.5	骨的力学适应性	28
	参考文献	29
3	骨生物力学基础：骨力学与骨重建 / 张西正 李昊	31
<hr/>		
3.1	力学基本理论	31
3.1.1	载荷与变形	31
3.1.2	应力与应变	31
3.1.3	强度与刚度	33
3.1.4	蠕变与松弛	34
3.1.5	疲劳	34
3.1.6	失效	35
3.2	骨组织力学性能评价	37
3.2.1	骨组织的(准)静态力学性能	37
3.2.2	骨组织动态力学性能	40
3.3	骨组织的力学适应性	42
3.3.1	骨组织力学适应性的早期理论	42
3.3.2	骨重建	43
3.3.3	骨组织疲劳损伤与定向骨重建	46
3.4	骨重建基本理论	48
3.4.1	应力大小理论	48
3.4.2	应变能-骨密度理论	48
3.4.3	骨表面重建理论	48
3.4.4	力-电效应理论	49
3.4.5	显微裂纹理论	49
	参考文献	51

4	宏观-细观-微纳观多层次骨结构形态和力学性能	55
4.1	细观骨结构及其力学性能 / 高甲子 宫赫	55
4.1.1	细观层次的骨结构形态	55
4.1.2	基于 Micro-CT 扫描的骨细观结构观测	55
4.1.3	细观骨力学性能	57
4.2	微纳观骨结构形态和力学性能观测方法 / 张睿 宫赫	58
4.2.1	扫描电镜观察骨微观结构形貌	58
4.2.2	原子力显微镜(AFM)观测骨材料的矿物相	59
4.2.3	纳米压痕实验测量骨材料的压痕模量和硬度	60
4.3	结合宏观-细观-微纳观多层次的骨结构形态和力学性能研究 / 高甲子 张睿 宫赫	60
4.3.1	老龄骨退化模式的宏观-细观-微纳观实验研究	60
4.3.2	利用宏观-细观-微纳观多层次的实验研究探讨不同间歇方式的高频率低载荷机械振动对于大鼠胫骨骨折愈合的影响	67
	参考文献	70
5	骨与关节生物力学实验技术	73
5.1	骨骼宏观基本力学参数和测试方法 / 张东升	73
5.1.1	长骨试样的夹持	73
5.1.2	单向拉伸和压缩实验	74
5.1.3	骨骼扭转实验	74
5.1.4	骨骼三点弯曲实验	75
5.2	皮质骨断裂力学行为的测试 / 张东升	75
5.2.1	纵向裂纹扩展的断裂韧度测试	77
5.2.2	横向裂纹扩展的断裂韧度测试	78
5.2.3	疲劳裂纹扩展行为	79
5.3	关节内应力的压敏片测量技术 / 张东升	80
5.3.1	化学式压敏片	81
5.3.2	电子式压敏片	85
5.4	应用显微 CT 技术实现骨内微观变形场的测量 / 汪爱媛	86
5.4.1	数字图像相关法	86
5.4.2	基于计算机断层数据的骨内三维变形测量	87
5.5	内固定器械力学测试技术 / 张东升	91
5.5.1	内固定器械的尸体标本实验	92
5.5.2	动态疲劳测试方法	93
	参考文献	94

6	骨折愈合和固定的生物力学研究	97
6.1	影响骨折愈合的生物力学因素 / 王晓庆 李晓东	97
6.2	骨折内固定的生物力学分析 / 王晓庆 李晓东	98
6.2.1	股骨骨折内固定的生物力学分析	98
6.2.2	胫骨骨折内固定的生物力学分析	100
6.2.3	跟骨骨折内固定的生物力学分析	100
6.2.4	骨盆骨折内固定的生物力学分析	101
6.2.5	锁骨和上肢骨折内固定的生物力学分析	101
6.3	骨质疏松性骨折愈合方式的研究 / 郝永强	103
6.3.1	骨质疏松骨折愈合的生物学特点	103
6.3.2	骨质疏松骨折愈合的生物力学特点	106
6.4	机械性显微损伤及其修复机制 / 于志锋	107
6.4.1	骨质疏松状态下植入物周围机械性显微损伤的产生和修复	107
6.4.2	显微损伤修复过程对骨力学性能的影响	110
	参考文献	112
7	软骨生物力学	115
7.1	关节的结构形态 / 张晓玲 黄研	115
7.1.1	关节软骨的结构	115
7.1.2	软骨下骨	117
7.2	关节软骨的力学性能 / 高丽兰 邱璐璐 张春秋	118
7.2.1	关节软骨的力学特性	119
7.2.2	关节软骨生物力学实验研究	120
7.2.3	关节软骨的数值模拟	128
7.3	关节软骨疾病与力学环境 / 黄研 张晓玲	130
7.3.1	骨关节炎的病理改变	131
7.3.2	关节软骨退变的原因	131
7.3.3	力学因素与骨关节炎	133
7.4	关节软骨损伤修复的生物力学研究 / 张春秋 邱璐璐 高丽兰	135
7.4.1	关节软骨不同损伤类型	135
7.4.2	关节软骨损伤部位及原因	135
7.4.3	力学环境对关节软骨的影响	136
7.4.4	关节软骨缺损的力学状态	138
7.4.5	缺损关节软骨修复后的力学状态	141
	参考文献	143

8	脊柱生物力学	147
8.1	颈椎的生物力学 / 陈教想 王向阳	147
8.1.1	颈椎解剖学	147
8.1.2	颈椎运动学	150
8.1.3	颈椎动力学	153
8.2	腰椎生物力学 / 张凯 赵杰	158
8.2.1	腰椎解剖学	158
8.2.2	腰椎运动学	161
8.2.3	腰椎动力学	163
8.2.4	腰椎单侧椎弓根螺钉内固定的生物力学研究	166
8.3	脊柱内固定的生物力学 / 钱蕾 欧阳钧	168
8.3.1	脊柱骨折内固定的生物力学分析方法	169
8.3.2	脊柱前路内固定	170
8.3.3	脊柱后路固定	171
8.3.4	骨质疏松脊柱的生物力学	173
8.3.5	非融合内固定的生物力学	175
	参考文献	176
9	髋关节生物力学	181
9.1	髋关节生物力学仿真建模与分析 / 王成焘 王冬梅	181
9.1.1	髋关节接触问题的仿真建模分析	181
9.1.2	髋关节软骨层间质流体力学仿真建模与分析	186
9.2	人工髋关节设计中的生物力学问题 / 王成焘 王冬梅 周海	189
9.2.1	人工髋关节的典型结构	189
9.2.2	人工髋关节设计中的运动学问题	190
9.2.3	人工髋关节球头——髋白的摩擦、磨损与松动	193
9.2.4	人工髋关节柄设计中的生物力学问题的要求	198
9.3	人工髋关节生物力学试验 / 王成焘 王冬梅	202
9.3.1	人工髋关节柄部强度试验	202
9.3.2	人工髋关节磨损试验	202
9.4	髋关节相关疾病治疗中的若干生物力学问题 / 王成焘 王冬梅 朱东	204
9.4.1	人工髋关节临床失效的统计分析	204
9.4.2	人工髋关节失效的生物力学分析	206
9.4.3	股骨髋臼撞击综合征的生物力学分析及治疗	209

9.5	天然与人工髋关节生物力学研究展望 / 王冬梅 朱东	212
	参考文献	213
10	膝关节生物力学	215
10.1	膝关节的生物力学研究 / 王长江 陈维毅 郭媛	215
10.2	人工膝关节的设计和生物力学分析 / 王长江 陈维毅 郭媛	216
	10.2.1 人工膝关节的受力和应力分析	217
	10.2.2 人工膝关节的个性化设计	222
10.3	正常下肢对线特点及影响因素 / 岳冰 曾一鸣	225
	10.3.1 常见正常下肢对线的基本概念	225
	10.3.2 国人正常下肢对线测量研究	226
	10.3.3 正常下肢对线特点对人工膝关节置换假体安放的指导意义	228
10.4	后交叉韧带保留型全膝关节置换功能分析 / 岳冰 曾一鸣	230
	10.4.1 患者资料及实验设计	230
	10.4.2 PCL 体内运动学分析	231
	10.4.3 研究结果及对临床的指导价值	232
	参考文献	234
11	足踝生物力学	239
11.1	步态站立中期中足的载荷分配和力传导 / 牛文鑫 张明	239
	11.1.1 足踝有限元建模	239
	11.1.2 离体实验	241
	11.1.3 站立相中足载荷再分配	242
11.2	高跟鞋对足踝影响的生物力学研究 / 余嘉 张明	244
	11.2.1 研究平台	244
	11.2.2 高跟鞋引起典型疾病的生物力学	246
11.3	跟骨骨折内固定术后即刻稳定性的生物力学 / 倪明 牛文鑫	248
	11.3.1 离体生物力学实验	249
	11.3.2 有限元分析	249
	11.3.3 跟骨骨折不同固定方式的力学特点	250
	参考文献	254
12	低载荷机械振动对骨质疏松和骨折愈合的影响 / 朱东	257
12.1	低载荷机械振动对骨质疏松影响的实验研究	257

12.1.1	低载荷机械振动在对抗骨质疏松应用的国内外研究现状	257
12.1.2	低载荷机械振动对抗骨质疏松的动物实验研究	258
12.1.3	低载荷机械振动对抗骨质疏松的分子生物学实验研究	264
12.1.4	低载荷机械振动对抗骨质疏松的人体实验	265
12.2	低载荷机械振动对骨折愈合影响的研究	266
12.2.1	低载荷振动对骨折愈合影响研究及应用的国内外现状	266
12.2.2	持续与间歇低载荷机械振动对骨折愈合影响的宏观研究	268
12.2.3	持续与间歇低载荷机械振动对骨折愈合影响的微观研究	271
12.2.4	低载荷机械振动促进成骨的细胞学研究	273
12.3	低载荷机械振动对骨折愈合影响的总结与展望	276
	参考文献	276
13	微小 RNA 与骨组织力学生物学响应 / 郭勇 汪洋	279
13.1	miRNA 概述	279
13.1.1	miRNA 简介	279
13.1.2	miRNA 在骨生物学方面的调节作用	279
13.2	miRNA 的力学响应	281
13.2.1	力学响应 miRNAs 调控软骨修复	281
13.2.2	力学响应 miRNAs 调控成骨分化	282
13.2.3	微重力环境下骨组织/细胞的 miRNA 响应	283
13.3	成骨细胞 miRNA 的力学响应研究	284
13.3.1	成骨分化 miRNA 和力学响应 miRNA	285
13.3.2	成骨细胞 miRNA 的力学响应	285
13.3.3	力学响应 miRNA 靶基因的验证	287
	参考文献	289
14	原发性骨质疏松的力学生物学 / 吴江 李良 何学令 曾烨	293
14.1	原发性骨质疏松的诊断标准及生物力学考量	293
14.1.1	原发性骨质疏松的诊断标准及其意义	293
14.1.2	生物力学考量	294
14.2	原发性骨质疏松的生物力学防治策略	295
14.2.1	运动疗法在原发性骨质疏松中的研究应用	295
14.2.2	机械振动与原发性骨质疏松防治	296
14.3	原发性骨质疏松发病机理及临床的生物力学研究	297
14.3.1	原发性骨质疏松骨微结构病理学及生物力学特性改变	298

14.3.2	力学刺激对原发性骨质疏松细胞生物学活性的影响	301
14.4	原发性骨质疏松力学生物学研究的发展趋势	316
	参考文献	318
15	力学作用与药物耦合对骨质疏松症的影响	321
15.1	药物在骨质疏松症治疗的应用研究 / 王强松	321
15.1.1	药物对骨代谢中成骨细胞、破骨细胞活性的影响	321
15.1.2	类雌激素样药物对骨代谢的调节作用	322
15.1.3	药物对骨代谢中钙代谢调节系统的作用	322
15.1.4	药物对骨代谢中骨生物力学的影响	322
15.1.5	药物对骨代谢中细胞因子的影响	323
15.1.6	药物对骨代谢中信号通路的影响	323
15.2	力学刺激与药物耦合作用在骨质疏松症中治疗研究 概述 / 王强松 刘璐	323
15.2.1	力学刺激联合药物在骨质疏松症中的治疗研究	324
15.2.2	力学刺激联合药物对成骨细胞的影响	325
15.2.3	结语	335
15.3	以组织工程技术为平台压缩载荷耦合药物的研究 / 刘璐	336
15.3.1	动态载荷与循环灌流反应器介绍和参数的设定	336
15.3.2	不同浓度 α -ZAL 对三维培养成骨细胞增殖能力的影响	337
15.3.3	α -ZAL 对三维培养成骨细胞 ALP 活性的影响	337
15.3.4	α -ZAL 对三维动态培养成骨细胞 OPG/RANKL 比值的影响	338
	参考文献	339
16	骨髓间充质干细胞的力学生物学 / 黄艳 樊瑜波	341
16.1	骨髓间充质干细胞的力学特性	341
16.1.1	骨髓间充质干细胞黏弹特性	342
16.1.2	骨髓间充质干细胞与分化成熟细胞的力学特性比较	342
16.1.3	基底硬度影响干细胞的分化	342
16.2	力学载荷对骨髓间充质干细胞生物学行为的影响	345
16.2.1	剪切应力对骨髓间充质干细胞的影响	346
16.2.2	张应力对骨髓间充质干细胞的影响	348
16.2.3	重力因素对骨髓间充质干细胞的影响	349
16.2.4	压应力对骨髓间充质干细胞的影响	350
16.2.5	联合加载对骨髓间充质干细胞的影响	351