

中国大陆现今地壳运动

赖锡安 黄立人 徐菊生 等编著



地震出版社

中国地壳运动观测网络工程中心 资助
地震科学联合基金

中国大陆现今地壳运动

赖锡安 黄立人 徐菊生 等编著

地震出版社

内 容 简 介

本书主要介绍中国大陆现今地壳运动观测和研究成果。全书由四部分组成：第一部分是地质背景（第2~3章）；第二部分是本书的重点，应用GPS观测和研究中国大陆地壳水平运动（第4~9章）；第三部分利用30多年来精密水准复测资料和地面跨断层观测资料研究地壳垂直运动和断裂带运动（第10~12章）；第四部分简要介绍基于力学模式的大地测量数据反演（第13章）。

这些成果是作者近10多年来承担和参与多项国家课题的研究总结，同时汇集了国内外相关领域的新成果和新进展。本书将观测技术、基础理论、分析方法和观测数据与实际结果相结合，内容丰富翔实，具有系统性、新颖性和实用性等特点。其研究成果为地震预报、地学研究、基础测绘和工程建设提供了重要平台。

本书可供从事地壳运动和地球动力学研究的科研人员和工程技术人员以及高等院校地球科学专业的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国大陆现今地壳运动/赖锡安等编著. —北京：地震出版社，2004.8

ISBN 7-5028-2360-3

I. 中... II. 赖... III. 现代地壳构造运动—研究—中国 IV. P548.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第120596号

中国大陆现今地壳运动

赖锡安 黄立人 徐菊生 等编著

责任编辑：李和文

责任校对：孙铁磊

出版发行：地震出版社

北京民族学院南路9号

邮编：100081

发行部：68423031 68467993

传真：68423031

门市部：68467991

传真：68467972

总编室：68462709

传真：68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经 销：全国各地新华书店

印 刷：中科院武汉分院科技印刷厂

版(印)次：2004年8月第一版 2004年8月第一次印刷

开 本：787×1092 1/16

字 数：646千字

彩色插页：4

印 张：25

印 数：0001~1000

书 号：ISBN 7-5028-2360-3/P·1180(2959)

定 价：65.00元

版权所有 翻印必究（如有印装质量问题，我社负责调换）

前 言

人类赖以生存和繁衍的地球，时刻处于动态变化之中。地壳运动是地球活动的一部分，特别是“具有一个人生命时间尺度”的现今地壳运动，对人类的生存、活动和可持续发展具有特别直接和重要的意义。

以造成重大生命财产损失的地震灾害为例，地震是地壳介质在构造应力作用下发生破裂的一种地壳运动表现形式。因此解决地震预报的时间、地点和震级这个实际问题，有赖于对现今地壳运动和地震活动带地壳形变的观测和研究，需要解决诸如地壳运动速率、应变积累和传播等一系列重要的科学问题。

中国大陆位于欧亚板块东南隅，地质构造复杂，构造运动强烈，地震活动频繁，周边动力环境复杂多样，是研究板块运动、板内变形和大陆地震最理想的地区。我国大陆及周边地区，特别是陆内一些地震频发的活动构造带的现今地壳运动，一直受到国内外地学界的极大关注。

为了对大地震进行有效的监测和预报，我国自上世纪 60 年代开始用常规大地测量技术在主要活动构造区（带）开展了地壳形变监测，并利用观测成果开展了地震预报理论和应用研究。但由于常规大地测量技术的局限性，设定的目标难以达到。70 年代开始的卫星大地测量技术，特别是 GPS 技术，突破了常规大地测量在时空和精度方面的局限，展示了全新的天地，迅速成为现今地壳运动和变形监测最基本和最适用的技术手段。

我国从 20 世纪 80 年代末开始将 GPS 技术应用于现今地壳运动和变形的监测和研究。开始阶段，监测区域仅限于小范围，由于受卫星星座和仪器条件的限制，观测精度不够高，但仍显示出常规大地测量不可比拟的优越性，引起各界的广泛重视。90 年代初启动的国家攀登项目“现代地壳运动和地球动力学研究”首次在全国布设 22 个 GPS 站点组成的全国监测网。“八五”国家科技攻关项目“GPS 技术在地壳形变测量和中长期地震预报中的应用研究”，在全国主要地震活动区布设了众多区域性 GPS 监测网。特别是“九五”期间实施的国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”，不但规模、精度有重大突破，而且把我国各种不同系统、不同尺度、不同时期的 GPS 观测网联结成一个整体，将我国地壳运动观测和研究推向新的高度，产生了显著的效益。综合应用这十几年积累的成果，绘制出第一张《中国地壳运动速率图》，全国应变图和重力变化图。我国利用空间技术的观测水平进入国际先进行列，为地震预报、地学研究、基础测绘、工程建设创建了重要平台；我国已能自主进行 GPS 卫星定轨服务，发布精密星历。由于中国大陆在地壳运动研究中的特殊性，这些成就也为全球地球科学领域作出了重要贡献。

以往的 10 多年，在卫星大地测量技术应用的实践中，我们不仅吸取了国际上先进的理论、技术和方法，更重要的是积累了自身创造的新经验。对这些成果和经验的总结，“温故而知新”将有利于今后工作的进一步开展，走向更新更高的台阶，这是本书编著者的目的和初衷。由于历时十几年，涉及面又很广，总结实在是一项困难而艰辛的命题，但作为这一历程的参

与者，总有一种使命感驱使我们知难而上，希望起到抛砖引玉的作用。

本书的编写由下列人员完成：

赖锡安、徐菊生设计了全书结构，拟定分章内容并约请各章节的撰稿人。丁国瑜编写第二章；任金卫编写第三章及第八章部分内容；朱文耀编写第四、五章及第七章部分内容；王敏编写第六章；牛之俊编写第八章；黄立人编写第十、十一章及第九章部分内容；徐菊生编写第七章及第五、九章部分内容；周硕愚编写第十二章；晁定波、赵少荣编写第十三章；赖锡安编写第一章及四、五、八、九章部分内容；游新兆编写了第四章 InSAR 部分。全书由赖锡安、徐菊生统稿和编审。

本书在编写过程中得到叶叔华院士、马宗晋院士、刘经南院士、陈鑫连研究员、张培震研究员的指导和帮助。

本书的出版得到了中国地壳运动观测网络工程中心和地震科学联合基金的资助。

借此机会向所有支持、关心和帮助我们工作的领导和专家，出版的赞助者，10 多年来并肩工作、风雨同舟的同仁，以及我们引用的参考文献的作者致以衷心的感谢！

由于水平和时间所限，本书必定存在不少疏漏、不足和错误，恳请广大读者和同仁指正。

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究中国大陆现今地壳运动的意义	1
1.1.1 现今地壳运动的定义	1
1.1.2 研究我国大陆现今地壳运动的意义	2
1.2 本书的结构、内容和特点	4
第二章 中国大陆现代地壳运动的新构造背景	6
2.1 中国大陆新构造环境	6
2.2 中国大陆新构造变形的基本状况	7
2.2.1 西部地区	7
2.2.2 东部地区	14
2.3 各块体间的相对运动	16
第三章 中国大陆重要活动区(带)新构造运动特征	21
3.1 青藏地区	21
3.1.1 西昆仑构造带	21
3.1.2 阿尔金构造带	22
3.1.3 青藏高原南缘及内部地区	23
3.2 川滇构造区	25
3.2.1 主要断裂	26
3.2.2 现代构造应力场特征	27
3.3 天山地区	27
3.3.1 北天山构造区	28
3.3.2 南天山构造区	28
3.4 华北平原地区	29
3.4.1 地震活动特点	29
3.4.2 区域地质构造背景	30
3.4.3 地球物理场及深部构造特征	30
3.4.4 新构造运动与现今断裂作用	30
3.5 东南沿海地区	31
3.5.1 地震活动特点	31
3.5.2 区域地质构造背景	32

3.5.3 地球物理场及深部构造特征	32
3.5.4 新构造运动与现今断裂作用	33
第四章 空间大地测量新技术	35
4.1 概述	35
4.2 甚长基线干涉测量(VLBI)	37
4.2.1 VLBI 基本原理	37
4.2.2 VLBI 测地基本方程	38
4.2.3 VLBI 技术的应用及主要成果	40
4.3 卫星激光测距(SLR)	42
4.3.1 SLR 基本原理	42
4.3.2 SLR 技术的应用及主要成果	44
4.3.3 流动 SLR	48
4.4 全球定位系统(GPS)	54
4.4.1 GPS 基本原理	54
4.4.2 GPS 技术的应用及国际 GPS 服务(IGS)	56
4.4.3 其他全球卫星导航定位系统	58
4.4.4 全球卫星定位技术发展展望	67
4.5 卫星测高(SRA)	73
4.5.1 卫星测高基本原理	73
4.5.2 卫星测高技术的应用	76
4.6 合成孔径雷达干涉测量(InSAR)	81
4.6.1 InSAR 基本原理	82
4.6.2 InSAR 技术的应用	90
第五章 空间大地测量基准	98
5.1 基本概念	98
5.2 国际地球参考架(ITRF)	99
5.2.1 协议地球参考系的定义	99
5.2.2 ITRF 及其发展	100
5.2.3 ITRF 参考架间的转换参数	102
5.2.4 ITRF 与 IGS	103
5.3 1984 世界大地坐标系(WGS ₈₄)	106
5.4 WGS ₈₄ 与 ITRF 间的转换	107
5.4.1 WGS ₈₄ 与 ITRF 之间的一致性检验	107
5.4.2 WGS ₈₄ 与 ITRF 的转换	109
5.5 局部参考框架	109
第六章 GPS 观测数据预处理	112
6.1 GPS 定位误差分析和模型改正	112

6.1.1	大气折射	112
6.1.2	多路径效应	117
6.1.3	钟差	117
6.1.4	天线相位中心偏差和变化	119
6.1.5	地球物理效应	120
6.2	GPS 相对定位软件	121
6.2.1	GAMIT/GLOBK	122
6.2.2	GIPSY	125
6.2.3	Bernese	128
第七章	空间大地测量与板块运动	131
7.1	引言	131
7.2	板块运动测定的地质-地球物理方法及其重要进展	132
7.2.1	数学模型	132
7.2.2	主要研究成果	133
7.3	板块运动测定的空间大地测量方法及其研究进展	137
7.3.1	空间大地测量基本观测量	137
7.3.2	建立板块运动模型的基本原理、方法和数学表达式	138
7.3.3	用空间大地测量建立现今板块运动模型的研究和进展	140
7.4	几点讨论	145
第八章	中国大陆及主要活动块体现今地壳水平运动的基本特征	149
8.1	中国大陆亚板块及活动构造块体划分	149
8.1.1	活动亚板块和构造块体	149
8.1.2	活动地块区与活动地块	151
8.2	全国 GPS 监测网	152
8.2.1	攀登项目 GPS 网	153
8.2.2	全国 GPS A、B 级网	154
8.2.3	全国 GPS 一、二级网	155
8.2.4	中国地壳运动观测网络	156
8.3	区域性地壳运动基准的确定	159
8.3.1	区域性地壳运动基准确定的方法	159
8.3.2	相对稳定点组的确定	162
8.4	中国大陆现今地壳水平运动的基本特征	170
8.4.1	由网络 GPS 站获得的中国大陆地壳水平运动速度场	170
8.4.2	速度场的基本特征	172
8.5	中国大陆地壳构造运动的动力学问题	175
8.5.1	问题的提出	175
8.5.2	资料和方法	175

8.5.3 动力学问题的讨论	178
第九章 中国大陆主要活动构造区(带)现今地壳水平运动速率分布	190
9.1 区域 GPS 监测网	190
9.1.1 川滇 GPS 监测网	190
9.1.2 华北(含首都圈)GPS 监测网	190
9.1.3 青藏(青藏高原及喜马拉雅地区)GPS 监测网	191
9.1.4 河西走廊 GPS 监测网	192
9.1.5 天山—塔里木及伽师地区 GPS 监测网	192
9.1.6 东南沿海(福建地区)GPS 监测网	192
9.2 中国大陆主要活动构造区(带)现今地壳水平运动速率分布	195
9.2.1 时间跨度为 1991~2001 年的中国大陆及周边地区现今地壳水平运动统一速度场	195
9.2.2 由网络 GPS 站获得的我国大陆主要构造区(带)现今地壳水平运动速率分布	198
9.2.3 由 1991~2001 年速度场获得的速率分布特征分析	203
9.2.4 结论	213
9.3 应变场分析	213
9.3.1 几种应变场计算的方法	214
9.3.2 应变场及特征分析	219
第十章 中国大陆现今地壳垂直运动观测与研究	223
10.1 高程基准	223
10.1.1 高程系统的基本定义及其相互关系	223
10.1.2 高程基准与海面地形	224
10.1.3 GPS 测量的大地高和高程	226
10.2 我国地壳垂直运动测量的现状及发展	227
10.3 大尺度地壳垂直运动的定量描述	228
10.3.1 地壳垂直运动模型	229
10.3.2 精密水准测量资料的选取	231
10.3.3 计算结果	234
10.3.4 中国大陆现今地壳垂直运动速率等值线图的编绘	234
10.3.5 中国大陆现今地壳垂直运动速率梯度图的编绘	235
10.4 中国大陆现今地壳垂直运动的基本特征及其所揭示的地球物理意义	241
10.4.1 中国大陆现今地壳垂直运动的基本态势	241
10.4.2 块体运动的差异	242
10.4.3 地壳垂直运动与地震活动	245
10.4.4 中国大陆现今地壳垂直运动揭示的地球物理意义	247
第十一章 中国沿海的现今海面变化与海陆相对变化	249
11.1 影响海陆相对变化的因素	249

11.2	局地海陆相对变化的观测——验潮	250
11.3	局地海陆相对变化的确定	252
11.3.1	影响瞬时海面高度的因素	252
11.3.2	局地海面变化的简化模型	252
11.3.3	周期项的选定	253
11.3.4	中国沿海一些主要验潮站的局地海陆相对长趋势变化	254
11.4	统一参考基准下的中国沿海的海面变化	256
11.4.1	验潮站参考基准的统一	257
11.4.2	中国沿海的海平面变化	259
11.4.3	全球海平面变化	261
11.5	中国东部沿海的地壳垂直运动及其与海面变化的关系	264
11.5.1	沿海陆地地壳垂直运动均衡基准下东部沿海地区的地壳垂直运动	264
11.5.2	地壳垂直运动与沿海海面变化的关系	267
11.6	卫星测高技术及海平面变化	267
第十二章	利用地面观测资料研究活动断裂带的运动学与动力学	269
12.1	断裂带现今运动的观测系统	270
12.1.1	断层形变台站观测(定点)	270
12.1.2	断层形变流动测量(场地)	271
12.1.3	断层网络区域形变测量	271
12.2	几条主要活动块体边界带现今运动研究	272
12.2.1	京津唐断裂带现今运动研究	272
12.2.2	红河、程海断裂带现今运动研究	273
12.2.3	小江、曲江断裂带现今运动研究	275
12.2.4	鲜水河断裂带现今运动研究	277
12.3	中国大陆主要断裂带现今运动基本方式、动力学机理与模型研究	278
12.3.1	断裂带的定常滑动(稳定状态) $\bar{V}_0$	278
12.3.2	断裂带的加速滑动(亚临界状态) $\bar{V}_A(t)$	280
12.3.3	断裂带的震前临界预滑(临界状态) $\bar{V}_{EP}(t)$ 与同震位错 U_E (失稳状态)	281
12.3.4	断裂带的震后蠕滑与无震蠕滑事件、非线性蠕变模型	283
12.3.5	断裂带在大气圈、水圈作用下的运动	286
12.3.6	断裂带蠕变的流变模型及数值模拟	286
12.3.7	断裂带现今运动研究对推进中国大陆岩石圈动力学、地震危险性评估和地震 预报的作用	295
第十三章	断层运动参数反演	300
13.1	顾及先验信息的断层运动参数非线性反演方法	300
13.2	数字模拟试验	302
13.2.1	重力反演的数字模拟试验	302

13.2.2 GPS 观测基线变化的数值模拟	308
13.3 红河断裂带(RRFZ)现今活动段运动参数测定	310
13.3.1 重力变化反演 RRFZ 活动段运动参数	312
13.3.2 GPS 基线变化反演 RRFZ 活动段运动参数	315
13.3.3 RRFZ 重力和 GPS 基线变化联合反演	317
13.4 利用大地测量资料反演 1976 年唐山地震双断层位错模式	320
13.4.1 利用大地测量资料反演的唐山地震双断层位错模式	320
13.4.2 讨论和分析	326
参考文献	327
附录一	
中国大陆 937 个 GPS 测站在 ITRF ₂₀₀₀ 框架下的速度场(1998~2001)	338
附录二	
中国大陆 937 个 GPS 测站速度场(相对于欧亚板块)(1998~2001)	363
附录三	
1. 在弹性半空间 $Z \leq 0$ (各向同性介质) 中的有限矩形位错在地表面引起的重力 变化的解析表达式(Okubo, 1992)	388
2. 在弹性半空间 $Z \leq 0$ (各向同性介质) 中的有限矩形位错在地表面引起的位移 的解析表达式(Okada, 1985)	389

第一章 绪 论

1.1 研究中国大陆现今地壳运动的意义

1.1.1 现今地壳运动的定义

地壳运动是整个地球活动的一部分，由于它发生在地球的壳层，对人类的生存和发展有着直接的联系。同时由于地壳是地球内部作用和外部作用（包括地球以外的星际空间）的交接地域，地壳运动是这两种因素作用的共同反映，是可以直接观测到的现象之一，因此地壳运动的观测和研究，自然成为研究地球内部活动与地球动力学的重要基础和依据。

地壳运动是一个历史过程，它按照一定的规律演变。而如今能够见到的或者能用仪器观测到的运动图像是经历了长达 40 多亿年的沧桑岁月，遭受过十多次重大的地质构造变动事件的作用和影响演化而成的。从时间尺度上，地壳运动可以分为几种类型：即几十万年的历史巨变，数万年的大动态，几千年、几百年的中动态和几十年到数年的小动态，以及现今正在发生的微动态。时代越近，它对人类的影响越直接，鉴于此，苏联学者在 20 世纪 50 年代末提出现代地壳运动这一特定的研究领域，继而引起全球地质学家、大地测量学家、地球物理学家的共同关注。1960 年，在赫尔辛基召开的第十二届 IUGG 大会上，正式成立了国际现代地壳运动委员会。以后，大约每两年召开一次国际性学术会议，多次出版会议论文集，同时还成立了区域性的现代地壳运动委员会。这一切都推动着这一新生的研究领域的不断深入和发展。

对于现代地壳运动至今还没有给出一个完整和确切的定义。其研究内容十分广泛，研究的手段包括地质地貌学、地球物理学和大地测量学。从地壳运动的时间跨度来看，研究对象涵盖着从近期几十年的地壳运动，直到全新世运动或新构造运动阶段。因此一些学者希望给出一个明确定义。刘光勋（1988）认为把最近 1 万年即全新世时期的地壳运动称为现代地壳运动；丁国瑜（1999）认为可将上新世末至更新世时开始的喜马拉雅第二幕以来的新构造阶段的地壳运动称为现代地壳运动。讨论和统一现代地壳运动的定义，不是本书的任务，这里只是强调说明本书研究的内容主要涉及到大地上测量观测技术所观测到的地壳运动，因此其时间跨度可以归结为近百年、几十年直到当前，我们把它称为现今地壳运动。

尽管对现今地壳运动至今还没有一个准确的定义，但由于它和人类生存和发展紧密相关，因此，对它的研究得到了广泛重视。国际大地测量协会（IAG）在评述 2000 年大地测量发展方向和前景时指出：“在 1 小时至 100 年期间”，最重要和最有意义的信息是：大地测量实际观测结果与地质和地球物理学时间尺度（百万年）上理论推算的某种平均结果之间的“偏差”。美国 NASA 地球系统科学委员会提出：具有一个人寿命时间尺度的全球变化和现实

性为地球研究提供了新而急迫的任务。

为什么在地壳运动中划出现今地壳运动呢？一方面因为现今地壳运动与人类生存、生产活动和可持续发展直接相关；另一方面随着人类文明和科学技术的发展，人类已用仪器记录并积累了地壳运动的大量资料，而且这些资料还将与日俱增。通过现今地壳运动资料时间序列的分析研究，可深入认识地壳和整个地球的微动态变化规律和过程，这是任何只能反映地壳和地球的平稳变化或平均行为的长期资料所不能代替的。

现今地壳运动的研究能成为地球科学的一个新的增长点。开展现今地壳运动的研究，能够从广阔的空间范围和微小的时间尺度两个方面增进我们对地壳运动的认识。现今地壳运动还是地球局部物质运动的一种反映，是了解地球局部运动的一个窗口。

大地测量观测技术由地面常规大地测量发展到空间大地测量，也大大促进了现今地壳运动观测和研究的深入发展。

地壳运动从空间规模上来看，可以分为全球、区域、局部或单个活动体的运动。它们之间互相联系和制约，又相互区别。一般而言全球性地壳运动从宏观上看有其统一性，如板块构造运动就是对全球地壳运动总体规律的一个最佳的描述，而区域性地壳运动却各具特色差异万千，很难用统一的模式去认识。本书主要涉及中国大陆现今地壳运动。

1.1.2 研究我国大陆现今地壳运动的意义

中国大陆（连同东部陆缘海域），就全球板块构造而言，位于欧亚陆壳板块的东南隅，它被挟持在印度板块、南菲律宾海板块和西伯利亚—蒙古亚板块之间，具有独特的构造格局。这里地域辽阔，地质构造复杂，地表地貌和山川河势纷杂多彩。根据我国岩石圈动力学研究结果认为，中国大陆岩石圈可划分为 8 个活动的亚板块以及 17 个更次一级的活动构造块体。这些块体与亚板块间的边界带形成一系列巨大的断裂带，纵横交错，将大陆切成条块分割，彼此联系的网络构造。陆内变形和块体间的相互作用、相互运动十分清楚，属全球构造形变和现今地壳运动最强烈的地区。西部地区的青藏高原隆起是全球大陆内最为引人注目的地学现象，它影响和制约着中国大陆以及亚洲气候变化和生态环境。这里一直被誉为地学工作者研究地球动力学的窗口，倍受各国科学界的关注。即使如此，高原升降机制中的很多重要问题仍未得到解决。我国大陆是全球大陆地震多发地区，地中海—喜马拉雅山地震带，环太平洋地震带在我国大陆交汇，20 世纪全球大陆 7 级以上的地震有 30% 发生在我国。因此我国大陆也是研究陆内地震的重要场所。从板块构造来看，我国大陆的周边地区的构造相当复杂，西边有喜马拉雅山陆陆碰撞带，直接涉及到我国川滇—缅甸交界区；西藏、新疆—印度、巴基斯坦、吉尔吉斯交界区和西藏、新疆、尼泊尔交界区。东部有大陆陆缘和太平洋俯冲带的陆洋接触带，这里涉及到我国东南沿海，海南岛，南海与我国台湾省台湾海峡与琉球交界区；跨渤海周边—南韩—日本地区。在北部为帕米尔—贝加尔活动带，这里涉及到我国新疆北部—蒙古、俄罗斯交界区。这些交界区的运动直接影响和控制着我国大陆内部的构造活动。反过来研究我国大陆现今地壳运动也必将推动这些边界地区的板块构造运动的研究。因此，我国大陆是研究现代板块运动理论、板内变形和板内地震的最理想的地区之一。开展这项研究不但对我国的基础科学、社会发展、地震预测和减轻自然灾害具有重要意义，而且对全球的地学研究也具有重要作用。

我国利用大地测量技术开展现今地壳运动的观测和研究，最早可追溯到 1960 年 7 月 18

日广东河源新丰江水库发生 4.3 级浅源地震之后,著名地质学家李四光力主并创导在大坝库首区,利用物理测距和精密水准测量建立的水库地震形变监测网,为大坝的加固提供了有价值的依据。而更为系统的开展这项工作则始于 1966 年 3 月 8 日和 22 日河北邢台地区 6.8 和 7.2 级强震。至 80 年代末期,国家地震局系统利用激光测距、三角测量、精密水准和重力测量,用了近 30 年时间在全国布设了大小不等的 117 个地形变监测网。但其覆盖面积的总和仅为 6 万 km^2 , 约占全国面积的 0.6% 左右。这些经典大地测量手段不但观测区域的尺度受到很大限制,而且精度低(水平精度一般为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$, 最好的激光测距约为 3×10^{-6}), 不能全天候作业,效率低,很难有效分辨地壳的动态变化及其速率,远远不能满足研究复杂多样的地壳运动的需要。空间大地测量技术的快速发展,从根本上突破了经典大地测量的时空局限性,而精度也提高了 3 个数量级。除精密水准测量外,传统大地测量将被空间定位技术所取代,特别是全球定位系统(GPS)高精度、低费用、高机动性、高效率、站间无需通视等特点,使之迅速成为监测地壳运动的理想工具。

1988 年,国家地震局地震研究所与德国汉诺威大学合作,在滇西地震预报实验场布设了我国第一个由 20 个点组成的 GPS 监测网,并进行首期观测。由于当时 GPS 星座的不完整,以及接收机,解算软件和精密星历等诸多问题,基线精度在 1×10^{-6} 左右。GPS 在我国地学领域的第一次应用,虽然其高效率令人信服,但要检测年变化率仅为 10^{-7} 的地壳运动仍有待实际的检验。15 年过去了,今天我国大陆已遍布各类地壳运动监测网, GPS 站已达到几千个,精度也已达到 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 的水平。在这个过程中,除了 GPS 系统本身在硬件软件方面的快速发展外,就我国而言,三大国家项目的实施起到了关键性的作用。这三个国家项目分别是:

1. 国家重大基础研究(攀登)项目“现代地壳运动和地球动力学研究”(1992~2001)。
2. 国家科技攻关项目“GPS 在地壳形变测量和中长期地震预报中的应用研究”(1991~1995)。
3. 国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”(1997~2000)。

这些项目的实施,极大地推进了我国利用空间技术观测和研究现今地壳运动的深入发展,并取得了许多新认识,其中不少成果引起国内外地学界及相关领域的很大兴趣。

就 GPS 地壳运动观测和研究而言,上述攀登项目在首席科学家叶叔华院士领导下,率先布设了 22 个点的 GPS 全国监测网;攻关项目相继在全国主要地震活动较为频繁的地区布设了众多区域性 GPS 监测网,并进行多期复测;而国家重大科学工程则建立了迄今我国规模最大,精度最高的由 25 个连续观测的 GPS 站组成的基准网,56 个站组成的基本网和多达 1000 个点的区域网,将我国地壳运动监测和研究推向新的高度。

GPS 虽然能够同时进行地壳运动水平和垂直分量的观测,但其垂直分量及超短距离跨断裂带形变观测的精度,仍不及传统的精密水准测量和地面定点形变观测,为了更好地研究中国大陆现今地壳运动的全貌,在攀登项目子课题“中国大陆主要活动带现今地壳运动及动力学研究”中设置了基于这两类技术的地壳垂直运动及断裂带运动的专题。

本书编著者有幸参与了上述三个国家项目的实施和研究工作。本书的编写主要从一个专题为基础,总结这十几年的研究工作,同时萃取国内外相关研究的最新成果。出版此书,回顾与前瞻,希望有利于推进我国现今地壳运动领域的研究工作更有效的开展,为地学研究和国民经济建设做出应有的贡献。

1.2 本书的结构、内容和特点

本书以空间大地测量观测技术,特别是 GPS 近年来在我国的应用为基础,以建立我国大陆及主要活动带现今地壳运动定量化模型研究为中心,将观测技术、数据处理、分析技术、研究方法与所获得的研究成果相结合;同时汇集长期以来我国采用经典大地测量进行构造形变测量取得的成果,体现其系统性与统一性,力图描绘出我国大陆现今地壳运动的全貌。为兼顾不同学科、不同基础读者的需要,书中还给出必要的基础知识和该领域相关的最新进展与研究成果。考虑到行文简洁和实用性,我们省略了繁杂的公式推导,并列出丰富的参考文献。

本书共分十三章,第一章为绪论,概述了现今地壳运动的定义及研究我国现今地壳运动的特殊意义。第二章和第三章主要介绍我国大陆及主要活动构造区(带)的新构造背景,这是正确和全面了解现今地壳运动的重要科学基础。第四章和第五章分别介绍了空间大地测量技术和空间大地测量基准及其最新进展。考虑到全球定位系统(GPS)对现今地壳运动观测的特殊重要性,本书将 GPS 的误差分析和数据处理单独列为第六章。在地壳运动的研究中,板块运动理论起着支配的作用。空间技术的发展,为全球板块运动研究提供了更新更强有力的支撑,同时它也是研究区域地壳运动的基本方法之一,因此本书在第七章对板块运动,特别是空间大地测量对板块运动研究的推进做了综合介绍和论述。第八章和第九章分别汇集了近年来由 GPS 布网和观测获得的中国大陆及其重要构造带现今地壳水平运动的定量结果,列出了大量的数据和图件。第十章和第十一章分别介绍了我国大陆现今地壳垂直运动和东南沿海海面变化及海陆相对运动。第十二章为利用地面观测资料进行断层运动研究所得到的主要研究成果。第十三章主要论述利用大地测量观测成果,反演断层运动参数及其在地壳运动解释中的应用和意义。

考虑到引用文献的交叉性,我们将全书的参考文献统一列于书末,西文以作者姓名字母顺序,中文以发表年代排列。

本书的特点是:全书的章节安排和内容具有自身的系统性;坚持理论和实际的结合,重要结论来之于实际观测并经过分析得到的“硬”数据;介绍了近十几年来这一领域的新进展和研究成果,汇集了丰富的最新观测数据,列出了大量的参考文献。体现出全书的系统性、新颖性、实用性和可参考性。

地壳运动是一个漫长的过程,中国大陆地处地壳形变剧烈复杂的地区。虽然近十几年来,空间大地测量技术的发展与应用为研究现今运动提供了强有力的手段,但仍存在点位太稀,连续运行台站太少的不足,研究工作特别是在地壳运动的地学解释和动力学研究方面尚需深入和创新。

地球科学正经历着一场深刻的变革。今后 10 年,地球动态变化的研究将取得重大的突破,我国现今地壳运动的观测与研究也将取得更大的进展。展望未来,空间大地测量技术的迅猛发展仍将是现今地壳运动观测与研究的主要推动力。具有分辨 mm/a 变化能力的多星座和多技术的普及,具有 10^{-9} 准确度和稳定性的全球参考框架将为布设更精确、更密集的观测网络打下坚实的基础,产出更可靠、更及时、更高精度与时空分辨率数据,促使地球科学的许多基础性研究更深入发展。也将使分开进行的地球整体运动(自转等)和各圈层(大气圈、水圈、岩石圈、地幔等)运动的研究转变为整体的、交叉的和综合的研究。进而必将推动地

震、火山、海侵的形成过程和动力学机制的研究，为预测灾害、保护人类生存环境和可持续发展做出贡献。

本书若能作为承前启后的“沧海一粟”，在这一重大的进程中做出微薄的贡献，就是我们的意愿所在。

第二章 中国大陆现代地壳运动 的新构造背景

2.1 中国大陆新构造环境

对区域现代地壳运动的研究,离不开对那里新构造背景的了解。这是因为地壳运动在时间上和空间上都是一个不均匀的复杂过程,并又往往由一定规律所控制。现代地壳运动是新构造运动的一部分,是其现代阶段的具体表现。新构造背景,包括新构造运动状况的研究,是正确和全面了解现代地壳运动的基础。

新构造一词,是由苏联地质学家奥布鲁切夫于1948年首先提出的。他根据中亚天山等地区在上新世末至第四纪初广泛出现的强烈构造运动这一事实,认为应在地球发展的历史中划分出一个单独的发展阶段,即新构造阶段。我国在始新世中晚期即约4000万年前后发生了喜马拉雅运动的第一幕,即印度板块与欧亚板块的碰撞与会聚,这一构造事件使中国大陆的构造应力场状况发生了巨大的变化。在渐新世末至中新世时发生了第二幕运动,在喜马拉雅地区发生了强烈的褶皱与岩浆活动。此时在东部也有一次构造运动在台湾形成了中新统与渐新统及始新统间的不整合,在华北也在渐新统与中新统之间形成了不整合。从上新世末—更新世时开始的喜马拉雅运动第三幕,在西部青藏高原及天山等地强烈隆升。在台湾发生了蓬莱运动,这期运动在台湾最为重要,在更新世中期达到最高潮(何春荪,1986),形成了西太平洋岛弧区的最新褶皱带。喜马拉雅运动第三幕是形成我国现代构造应力场及现代地貌形态基本面貌的一个阶段。针对这一情况,在我国一般将这一构造幕以来的这一时段,视为新构造阶段。

新构造运动包括了发生在地壳、岩石圈、地幔乃至整个地球体的运动。它在岩石圈的不同板块、地块以及地球不同深度的各圈层中具有不同的表现,运动的方式、幅度与速率存在明显的差别。活动板块边界是俯冲、碰撞挤压、拉张、剪切滑动以及地震和火山等各种不同方式新构造活动最为强烈的地带。在板块内部,由于结构的不均匀以及来自地球深部或板块间相互作用的影响,形成了各种复杂的新构造变形,如挤压隆起、回春复活的新造山带、压陷盆地、褶皱挠曲、各类张性构造以及各类断裂构造型式,但运动的幅度及速率一般较活动板块边界要小到两个数量级。在北欧、北美等第四纪冰盖区,由于冰川融溶释重引起的地壳均衡补偿运动,洋面变化等亦是研究新构造运动所涉及的问题。

新构造运动对地壳、岩石圈的变形和发展有全面巨大的影响。它控制了沉积、地层、岩相的特征和组合,形成了各类断裂、褶皱等新构造型式,影响了夷平面、阶地、海岸线等等地貌形态的变形和发展,以及地震、火山的活动和分布。对新构造状况的了解可提供分析和认识现代地壳运动的基本格架。

亚洲东部板内新构造变形及运动状况的研究,长期以来一直是一个十分引人注目的问题。