



装备科技译著出版基金

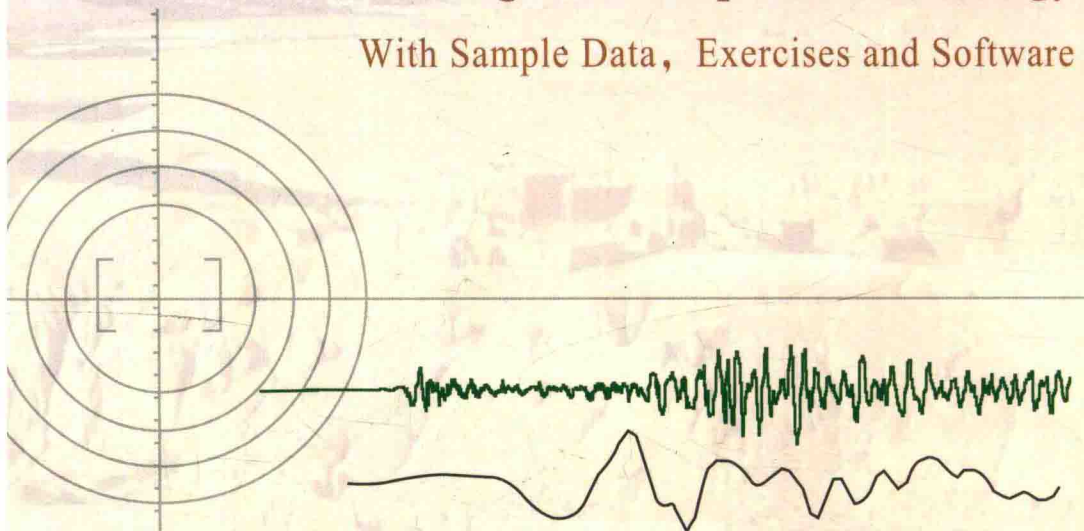
 Springer

# 地震学中的例行数据处理

## 实例数据，练习和软件

Routine Data Processing in Earthquake Seismology

With Sample Data, Exercises and Software



[丹]延斯·哈夫斯科夫 (Jens Havskov)

著

[德]拉斯·奥特莫勒 (Lars Ottemöller)

刘俊民 朱国富 等译

王晓明 审校



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

# 地震学中的例行数据处理

——实例数据、练习和软件

**Routine Data Processing in  
Earthquake Seismology:  
with Sample Data, Exercises and Software**

[丹] 延斯·哈夫斯科夫(Jens Havskov)

[德] 拉斯·奥特莫勒(Lars Ottemöller)

著

刘俊民 朱国富 等译

王晓明 审校

国防工业出版社

·北京·

# 著作权合同登记 图字:军-2015-204号

## 图书在版编目(CIP)数据

地震学中的例行数据处理:实例数据、练习和软件/  
(丹)延斯·哈夫斯科夫(Jens Havskov), (德)拉斯·  
奥特莫勒(Lars Ottemöller)著;刘俊民等译. —北  
京:国防工业出版社,2017.3

书名原文:Routine Data Processing in  
Earthquake Seismology

ISBN 978-7-118-10991-7

I. ①地… II. ①延… ②拉… ③刘… III. ①地震数  
据-数据处理 IV. ①P315.63

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第055340号

Translation from English Language edition:-

Routine Data Processing in Earthquake Seismology by Jens Havskov and Lars Ottemöller. Copyright ©  
2010 Springer Netherlands. Springer Netherlands is a part of Springer Science + Business Media.

All Rights Reserved.

版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行  
(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售



\*

开本 710×1000 1/16 印张 20 字数 390 千字

2017年3月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价98.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

## 译者序

本书第一作者 Jens Havskov 教授任职于挪威卑尔根大学地球科学系,是国际知名的地球物理学家,当选过国际地震学与地球内部物理学联合会(IASPEI)地震观测与解释委员会(CoSOI)主席、国际地震中心(ISC)执委会主席等,在地震观测技术及地震数据处理与解释领域有着很高的造诣。迄今为止,Jens Havskov 教授作为第一作者出版了3部专著,参与过《地震工程百科全书》和《新的地震观测实践手册》部分章节的撰写,还编写过5本地震分析软件和数据采集系统的操作手册,在高等级学术期刊上发表文章30余篇。

Jens Havskov 教授所著的《地震学中的例行数据处理——实例数据、练习和软件》是关于地震观测中日常例行数据处理方法方面的专著,是继其《地震观测技术与仪器》之后的又一力作,其英文版由德国施普林格出版社出版。我们在获得电子版并仔细阅读后认为,该书系统且比较全面地论述了地震学中的基本概念和最新数据处理方法,是一本值得地震观测与研究从业人员参考的专著。与国内相关专著相比,该书有两个显著特点:首先,深入浅出,全面介绍了自然地震学中所涉及的常规数据处理方法,包括地震和地球结构、震相识别、定位、震级、数据格式以及数据交换等;其次,实用性强,理论与实际操作相结合,每章后面都附有练习,使用的软件以及所有测试数据可以从特定网站下载。

本书译者是禁核试北京国家数据中心的科研人员,有多年从事地震监测技术研究和地震数据分析工作经验,对于日常地震监测数据处理所涉及的问题、求解方法、算法乃至自动处理软件和交互分析软件都有深刻认识,认为就原著在地震数据处理方面的系统性、实用性而言,国内还未见有出其右者,故此,组织力量将其翻译出版,以期丰富我国地震学研究领域的专业图书,为从事地震观测、地震学研究或地震数据处理且在日常地震数据处理方面需要扩展知识面和提高基础理论水平科研人员提供一本实用教材。当然,由于本书也具有基础和系统的理论介绍,对地震学和地球物理专业教学而言,作为本科生和研究生的专业课程教材或教学参考书都是非常合适的。

本书共十章。第一章、第四章及其他内容由刘俊民翻译,第二章、第九章及索引由王娟翻译,第三章、第十章由盖磊翻译,第五章、第六章由王燕翻译,第七章由朱国富翻译,第八章由李健翻译。朱国富对后五章进行了初校,刘俊民对前五章及其他内容进行了初校,最后王晓明负责对全书进行了认真仔细地审核校对。

译者在本书翻译过程中尽量保持了原书的行文风格,对于有些属于译者扩展性理解的解释、补充等内容,以加译者注的形式标示。关于书中人名,考虑到读者人群都有一定英语基础,为防止中文译名不统一给读者造成困扰或不便,除大家所熟知的著名学者(如傅里叶、巴特沃斯等)外,均直接引用原文中的英文名字。关于索引部分,以英汉对照形式出现,遵从原文按字母顺序编排,以“/”符号分割,前为原文中词条,后为译文中对应词汇,页码是指原书中页码。索引中有不少重复缩写词条,译文中只对第一次出现的缩写给予解释。翻译过程中,译者还发现原文有27处错误,其中大多为输入排版时疏忽大意造成的,已经过原著作者核对认可,且作者也补充了5条修正,故此在译文后一并列出原著勘误(其中第28~33项为作者提供)。有些错误属于英文文字错误,不影响汉语理解,在译文中没有体现,而有些如公式中变量、符号或关系等错误,则在译文中直接予以纠正。

在本书的翻译过程中,商杰、许朝阳、邱宏茂、刘琳琳、唐伟等人对本书的翻译工作多有帮助,特此感谢!

由于译者水平所限,译文虽经几遍审校,错误与不妥之处仍属难免,恳望读者批评指正。

译者

2016年4月

# 前 言

写这本书的目的是为地震学中最常见的处理技术提供一个实用的描述。本书将论及手工方法和计算机辅助方法,思路是每个主题先介绍理论,然后是实例和练习。书中会有完全基于本书印刷材料的手动练习以及基于公用软件的计算机练习,而大部分练习是基于计算机的。使用的软件和测试数据可以从网址 <http://extras.springer.com> 获得。

本书是为从事地震观测和与之相关的研究工作领域的地震数据处理人员编写的。通过这些练习,本书也可以用作地震处理领域的大学课程基础。由于重点强调的是处理,理论将作为在一定程度上理解处理步骤所必需的基础知识对待,而参考资料将给出更深入解释的出处。

当前,在其他主题中涉及地震数据处理的一本书是《地震学观测实践新手册》(NMSOP),由 Peter Bormann(2002)编辑,多名作者(包括本书作者)参与编写。完整的手册放在 [www.seismo.com/msop/msop\\_intro.html](http://www.seismo.com/msop/msop_intro.html) 网页上。NMSOP 为本书提供了最广泛的背景知识,本书的目标也以 NMSOP 为基础。在信号处理中,最详尽的著作是 Scherbaum 的《论极点和零点》(2001),而仪器方面都包含在 Havskov 和 Alguacil 的《自然地震学仪器》(2006)中。作为地震和地震学上的一般教科书,Stein 和 Wysession 的《地震学、地震和结构入门》(2003)提供了丰富的材料,并被我们大量引用。因此,为什么还要另一本书?因为我们觉得有必要写一本在数据处理实用方面更详尽且比上述书中有更多实例和练习的书。不管怎样,上述书籍给我们提供了广泛的背景材料,且会经常被引用到。

我们的目标是把地震处理背后的原理,以前所未有的方式,与实例和练习相结合,以方便读者能够通过包括使用一组数据和软件在内的动手经验,得到对大部分与处理地震数据相关的问题的答案,即“一本如何做的书”。

本书是基于作者多年处理来自地震台网的数据、编写处理软件以及使用 NMSOP 和其他书籍教授地震数据处理知识的经验。作者的软件 SEISAN (SEISmic ANalysis system) 已经在全球运行了近 20 年,日常所遇问题及许多用户反馈意见为我们提供了在处理地震数据方面很宝贵的见解,也帮助我们选题。

包括学生在内的使用本书最初版本的几个人,已经给了我们指教。Peter Voss, Gerado Alguacil 和 Mohammad Raesi 对本书的大部分内容提供了评论意见; Tim Sonnemann 校验了全书中不一致的地方及参考文献、公式; Mathilde B. Sørensen

对震源机制一章进行了仔细审阅；Klaus Klinge 和 Klause Stammler 向我们指出注意区域阵确定的视速度的使用，特别是用于 PKP 震相识别；Peter Bormann 对本书进行了非常彻底的修订，特别是对震级一章（他最擅长的主题）提供了几乎与我们所写文本一样长的评论意见。我们感谢你们。本书的大部分是作者之一（JH<sup>①</sup>）得到了卑尔根大学的支持，利用轮休期间在位于哥本哈根的丹麦与格陵兰地质调查局和爱丁堡的英国地质调查局所写。

在我们的实例中，使用来自许多地震台网的数据，多到不能在此一一提及。无论如何，在插图图注中结合实例会对数据源给予说明。由于本书非常依赖于实例，我们非常感谢数据提供者的支持。

---

① Jens Havskov。——译者

# 目 录

第一章 绪论 .....	1
1.1 地震 .....	1
1.2 记录地震事件和检选震相 .....	5
1.3 定位地震 .....	8
1.4 震级 .....	9
1.5 断层面解 .....	10
1.6 进一步的数据分析 .....	11
1.7 软件 .....	11
第二章 地球结构和地震震相 .....	13
2.1 地球结构 .....	13
2.2 地震射线 .....	15
2.3 地震震相 .....	18
2.4 走时 .....	26
2.5 不同震中距的地震震相 .....	31
2.6 结构确定 .....	40
2.7 练习 .....	42
第三章 仪器和波形数据 .....	46
3.1 地震传感器 .....	46
3.2 地震记录仪 .....	50
3.3 仪器响应校正 .....	53
3.3.1 如何存储响应信息 .....	56
3.3.2 现实中的响应 .....	57
3.3.3 使用响应 .....	58
3.3.4 如何制作响应文件 .....	58



3.4	波形数据 .....	59
3.4.1	GSE .....	60
3.4.2	SEED .....	61
3.4.3	SAC .....	62
3.4.4	SEISAN .....	62
3.4.5	CSS .....	62
3.4.6	波形格式中需共同关注的问题 .....	63
3.4.7	格式的使用 .....	65
3.5	地震噪声 .....	66
3.6	练习 .....	70
<b>第四章</b>	<b>信号处理 .....</b>	<b>72</b>
4.1	滤波 .....	72
4.2	谱分析与仪器校正 .....	74
4.3	判读地震震相 .....	78
4.3.1	第一个初至 .....	78
4.3.2	滤波与震相漂移 .....	79
4.3.3	绘图分辨率 .....	80
4.4	相关 .....	80
4.5	质点运动和分量旋转 .....	81
4.6	重采样 .....	84
4.7	软件 .....	85
4.8	练习 .....	85
<b>第五章</b>	<b>地震定位 .....</b>	<b>86</b>
5.1	单台定位 .....	87
5.2	多台定位 .....	91
5.3	计算机实现 .....	93
5.3.1	格点搜索 .....	93
5.3.2	迭代定位方法 .....	95
5.3.3	均匀模型下定位实例 .....	97
5.4	误差量化和统计 .....	98
5.4.1	误差计算实例 .....	100

5.5	相对定位法	101
5.5.1	主事件定位技术	101
5.5.2	联合震源定位	103
5.5.3	双差地震定位法	104
5.6	地震定位中的实际考虑	106
5.6.1	震相	106
5.6.2	震源深度	107
5.6.3	开始定位	114
5.6.4	远震事件 P 震相的识别	117
5.6.5	异常值和权重规则	117
5.6.6	时间误差	118
5.6.7	异常值和时间问题的例子	118
5.7	软件	122
5.8	练习	123
<b>第六章 震级</b>		<b>128</b>
6.1	振幅与周期测量	130
6.2	近震震级 $M_L$	130
6.3	尾波震级 $M_c$	136
6.4	体波震级 $m_b$	139
6.5	宽频带体波震级 $m_B$	144
6.6	面波震级 $M_s$	145
6.7	宽频带面波震级 $M_S$	149
6.8	$L_g$ 波震级	151
6.9	矩震级 $M_w$	151
6.10	能量震级 $M_e$	152
6.11	各种震级标度的比较	153
6.12	总结	156
6.13	震级平均和台站校正	156
6.14	在地方或区域条件下调整震级标度	157
6.14.1	从其他区域选择震级标度	158
6.14.2	导出 $M_L$ 标度	158
6.14.3	导出 $M_c$ 震级标度	160

6. 14. 4	确定地方性衰减来计算 $M_w$ .....	160
6. 15	练习 .....	160
<b>第七章</b>	<b>震源机制和地震图建模 .....</b>	<b>164</b>
7. 1	断层的几何形态 .....	164
7. 2	源辐射 .....	166
7. 3	实用的断层面解 .....	168
7. 4	极性获取 .....	175
7. 5	使用区域数据和极性的断层面解 .....	177
7. 6	复合断层面解 .....	178
7. 7	使用全球数据的断层面解 .....	179
7. 8	利用振幅获得断层面解 .....	180
7. 8. 1	利用振幅比 .....	182
7. 8. 2	针对远震利用振幅比的例子 .....	184
7. 8. 3	利用频谱振幅 .....	187
7. 9	矩张量 .....	189
7. 10	矩张量反演 .....	193
7. 10. 1	近震和区域震距离的矩张量反演 .....	195
7. 10. 2	远震距离 .....	198
7. 11	地震图建模 .....	200
7. 11. 1	射线法 .....	201
7. 11. 2	完整地震图的近似 .....	201
7. 11. 3	运用射线法的全球事例 .....	201
7. 11. 4	震源时间函数 .....	201
7. 11. 5	使用射线法的近震例子 .....	203
7. 11. 6	完整的地震图 .....	203
7. 12	软件 .....	204
7. 13	练习 .....	205
<b>第八章</b>	<b>频谱分析 .....</b>	<b>208</b>
8. 1	衰减 .....	208
8. 2	震源模型 .....	211
8. 3	几何扩散 .....	213

8.3.1	近震和区域震距离 .....	213
8.3.2	远震距离 .....	215
8.4	自相似性和震源谱 .....	216
8.5	近震和区域震距离上的频谱分析 .....	218
8.6	远震频谱分析 .....	222
8.6.1	衰减 .....	223
8.6.2	几何扩散 .....	223
8.7	$Q$ 的确定 .....	225
8.7.1	确定 $K$ .....	225
8.7.2	来自频谱建模的 $Q$ 和 $K$ .....	227
8.7.3	尾波 $Q$ .....	227
8.7.4	确定 $Q$ 的两台站方法 .....	232
8.7.5	确定 $Q$ 的多台站方法 .....	234
8.8	土壤放大率 .....	236
8.9	练习 .....	237
<b>第九章</b>	<b>台阵处理 .....</b>	<b>241</b>
9.1	基本台阵参数 .....	241
9.1.1	三个子台台阵计算 P 波的例子 .....	243
9.1.2	利用地震台网作为一个台阵 .....	244
9.2	聚束 .....	245
9.3	频率-波数分析(fk) .....	246
9.4	台阵响应 .....	246
9.5	处理软件 .....	248
9.5.1	手动处理 .....	248
9.5.2	fk 处理 .....	249
9.6	利用台阵方法识别震相 .....	250
9.7	练习 .....	251
<b>第十章</b>	<b>运行 .....</b>	<b>253</b>
10.1	数据和数据存储 .....	253
10.2	日常处理 .....	257
10.2.1	检测筛选 .....	257

10.2.2	事件分类 .....	257
10.2.3	分析 .....	258
10.2.4	震中和震源地图 .....	260
10.2.5	有感地震 .....	260
10.2.6	质量控制 .....	261
10.2.7	地震目录 .....	265
10.3	数据交换 .....	268
10.4	地震统计 .....	270
10.5	软件 .....	272
10.5.1	用于日常操作的处理系统 .....	273
10.5.2	绘制地图软件 .....	275
10.6	练习 .....	276
<b>参考文献</b> .....		<b>280</b>
<b>软件参考</b> .....		<b>292</b>
<b>索引翻译</b> .....		<b>293</b>
<b>原著勘误</b> .....		<b>305</b>

# 第一章 绪 论

最近几年,地震台站数量的快速增加,导致更大量的地震数据增加。这种增加,部分是由于连续数据的记录与存储的改变,这就需要更多的数据处理与良好的数据组织。推销新网络非常容易,一些处理软件通常还捎带一些培训。尽管现在有标准化数据格式的趋势,但一些制造商的软件总倾向于主要处理来自于自己设备的数据,因此多数观象台对来自不同厂商的处理系统也还有需求。现在有大量公共领域数据处理程序以及一些商业系统可用,而一个地震观象台通常也使用好几套系统。不管怎样,光有几套程序是不够的,因为所有的程序都需要对要解决的地震学问题有一些基本理解,且知道怎样用最好的方法去做。本章将对本书的主要话题,也是例行处理的主要问题,按如下顺序予以简要介绍。

- (1) 地震与地球结构。
- (2) 记录地震。
- (3) 检选震相。
- (4) 定位地震。
- (5) 确定震级。
- (6) 震源机制。
- (7) 管理数据与格式。
- (8) 数据交换。

所有的计算机练习,包括软件,可通过网址 <http://extras.springer.com> 和 <ftp://ftp.geo.uib.no/pub/seismo/SOFTWARE/SEISAN> 获取,并且每一章都有练习的简短概述,各个章节也有对相关软件描述。

约定:我们将展示许多地震图。除非另外注明,这些地震图均为来源于速度型仪器的原始信号。

全书中  $\log$  表示以 10 为底的对数。

## 1.1 地震

地震图是地运动的记录。通常由于海浪、大气变化和人类活动等原因,地面总是在不断地颤动(见 3.5 节)。有时候,记录到更高振幅的地面运动,就是我们谈到的地震事件(图 1.1)。地震事件主要是由于地震源的能量突然释放所致,爆炸、

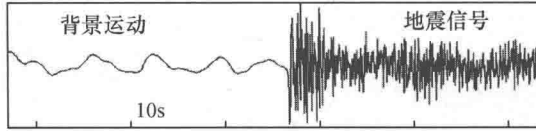


图 1.1 委内瑞拉的一次 3.8 级事件地震图。左侧部分是地表自然背景运动,右侧部分是地震信号,信号幅度正比于地运动速度。记录事件的是 BAUV 台站,地震发生的时间是 2003 0422 13:29,意思是 2003 年 4 月 22 日 13 时 29 分。全书中出现地震时间时都将使用这一表达形式

火山喷发、岩石坍塌等也可能引起地震。本书中,我们将主要论述地震数据的分析,因此我们将对震源及其起源予以描述,而更全面的概述可参见 NMSOP、Lay and Wallace(1995)以及 Stein and Wysession(2003)的著作。

地震震源可以描述为沿着断层活动期间应变能的一次突然释放,而活动的原因是断层的两面相对运动引起应变能的缓慢积累(图 1.2 至图 1.4),当应变能达到沿着断层的岩石抗断强度时,断层就会突然滑动。断层可以很小(几米),伴随的是毫米级滑动小碎片,也可以很大(1000km),引起数十米的滑动。大的断层释放比最大的核爆炸还要多得多的能量,而最小的放能可比一次手枪射击的能量。地震的大小与能量释放有关,以震级  $M$  表示(参见 1.4 节和第六章)。震级的刻度无界限,不管怎样,目前为止测到的最大震级是 9.5 级(1960 年智利大地震),而 -3 级以下地震实际上很难测量。最近几年的全球地震目录包含了大部分地区全部 4 级以上的地震。关于震级的更多讨论可参见第六章。

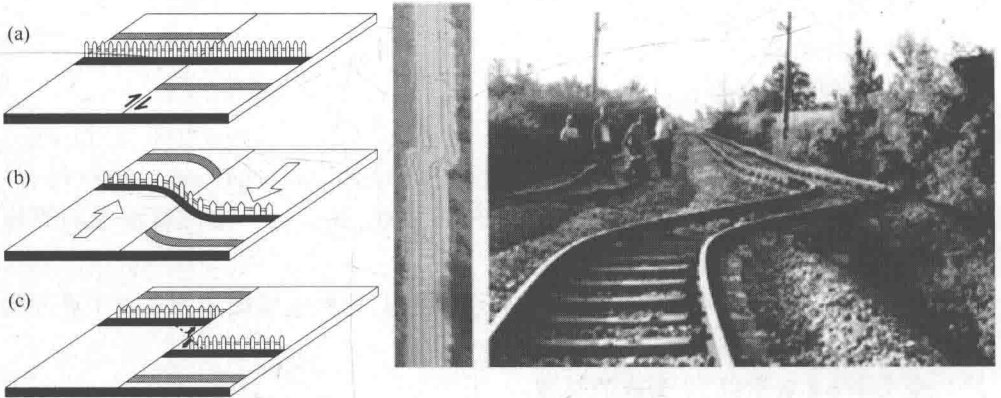


图 1.2 弹性回跳模型示意。左图:箭头示意断层的相对错动,(b)当(a)中两边移动且断层被锁住时,断层两边呈现完全弹性变形和线性特征,(c)最后张力大到断层两边滑动,就有了一次地震。变形物质回跳到原来位置,则跨断层特征相抵消。该图来自 Stein and Wysession (2003),复制自 [http://eps.wustl.edu/seismology/book/book\\_no\\_captions/figures/](http://eps.wustl.edu/seismology/book/book_no_captions/figures/)。右图:显示地震引起的铁路轨道扭曲。这是 1999 年土耳其伊兹米特 7.6 级大地震引起的位移(图片来自 Aykut Barka)

对于大的断层,滑动不会沿着整个断层突如其来地发生,而是起始于一些点,然后以破裂速度(约0.8倍S波速度。S波定义参见1.2节)向断层终端传播。因子0.8是常见取值,一般介于0.2~1.0之间。此外,有些地震的破裂速度极慢,被称作“慢”地震。最慢的地震可以持续数月,但由于其耐震,不在本书中讨论。在震源处产生的地震信号的持续时间从不到1s至数分钟,这取决于断层的大小,而在接收台站处的信号持续时间则要长得多,因为受地球内部结构和不同类型地震波速度差异影响,不是所有能量同时到达(见第二章)。因此,小震和大震的地震图看上去持续时间和频率内容都不一样(见第八章)。

断层相对于地球可有不同的朝向,而断层上的移动相对于断层面可有不同的方向。图1.3示意两种简单的例子,更复杂的例子和详细描述在第七章给出。不同的地震台站上,同一个地震会产生不同地震图,这个地震图能用于确定所谓的断层面解(断层面的朝向和断层滑动方向),更详细的阐述见第七章。

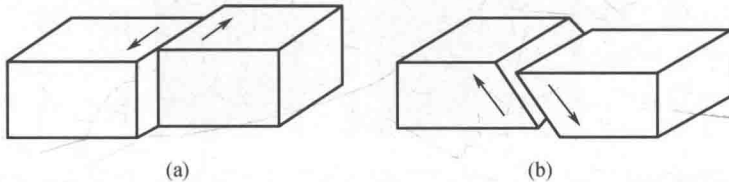


图1.3 两种断层模型。(a)垂直断层,伴随横向运动的水平错动(平移断层),(b)倾斜断层,以与垂向成一定角度错动(倾向滑移断层)

一些断层在地面上是可见的(图1.2和图1.4),而大多数地震没有地面上的表现。有些地震发生的深度可达700km(Frohlich,2006),但是大部分地震还是发生在地壳中(莫霍面之上,参见第二章)。

地震位置由纬度、经度和深度给出,并称为震源,而在地面上的投影点(只有纬度和经度)被称作震中。地震不是随机发生的,图1.5展示的是国际地震中心(ISC)报告的世界范围震中分布。国际地震中心是国际上收集地震参数信息的主要机构,参见 [www.isc.ac.uk](http://www.isc.ac.uk)。由此可见,地震通常发生在特定区域,这一点已经被板块构造理论解释了。地球表面分裂成几个刚性板块,这些板块之间以每年2~10cm的速度相对运动。沿着板块边缘,我们会发现主要有四种断层。

(1) 转换断层:板块相互滑动形成平移断层。加利福尼亚著名的圣安德烈亚斯断层属于此类,另一个例子是分开欧亚大陆和安纳托利亚板块(土耳其的大部分)的安纳托利亚断层,事件的最大深度通常在20~25km。板块是守恒的<sup>①</sup>。

(2) 俯冲断层:板块迎面碰撞,一个滑向另一个下面所谓的俯冲带,产生的地震可以深到地下700km,还可以产生火山山脉。智利海岸的俯冲带就是一个例子(图1.5),1960年产生了有记录以来最大的地震( $M=9.5$ ),当到达下地幔时板块

① 板块体积恒定不变。——译者





图 1.4 阿尔及利亚的埃尔阿斯南断层是一个有垂向位移的断层例子。地震发生在 1980 年 10 月 10 日 ( $M = 7.6$ )。图片来自 <http://www.smate.wvu.edu/teched/geology/GeoHaz/eqfaults/eq-faults-19.JPG>

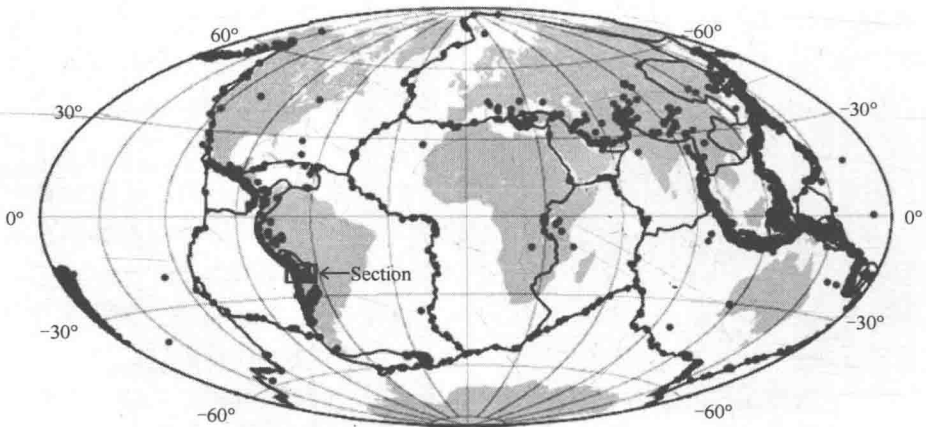


图 1.5 国际地震中心报告的 2002—2004 年间全球地震  $m_b \geq 5.0$  的震中分布。图中标示“Section”方框内的地震放大到图 1.6。板块的边界以粗黑线描出

被破坏了。

(3) 汇聚断层: 板块碰撞, 不是其中一个俯冲或部分俯冲, 而是形成山脉, 例如喜马拉雅山脉就是这样形成的。这种断层成因复杂, 但以推挤和黏滑错动为主导, 板块变形且岩石经历变化。