



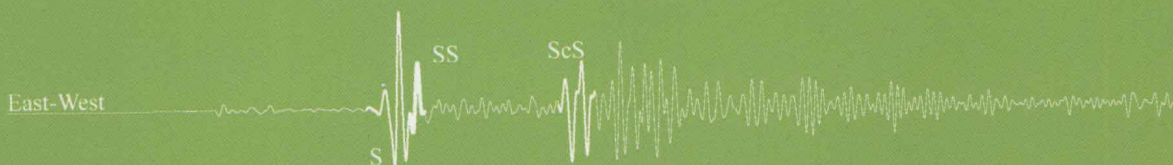
北京市高等教育精品教材立项项目

XIANDAI DIZHENXUE JIAOCHENG

现代地震学教程

周仕勇 许忠淮 编著

XIANDAI
DIZHENXUE
JIAOCHENG



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



北京市高等教育精品教材立项项目

现代地震学教程

周仕勇 许忠淮 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

现代地震学教程/周仕勇,许忠淮编著. —北京:北京大学出版社,2010.12
ISBN 978-7-301-18185-0

I. ①现… II. ①周…②许… III. ①地震学—教材 IV. ①P315

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 242942 号

书 名: 现代地震学教程

著作责任者: 周仕勇 许忠淮 编著

责任编辑: 王树通

标准书号: ISBN 978-7-301-18185-0/P·0075

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>

电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765014 出版部 62754962

印 刷 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.75 印张 318 千字

2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 28.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: (010)62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

国内已出版的有影响的地震学专业教材主要有：北京大学傅淑芳、刘宝诚教授编写的《地震学教程》(1991年)、北京大学傅淑芳、朱仁益教授编写的《高等地震学》(1997年)及中国科学技术大学徐果明、周蕙兰教授编写的《地震学原理》(1982年)。这些教材对我国固体地球物理专业及相近学科本科生及研究生教育发挥了重要作用,并在今天仍然可作为重要的教学参考书。但是,上述教材出版时间较早。由于近十多年来,在数字地震观测及并行计算等技术快速发展的推动下,以有限频地震学等为代表的地震学新理论及相关应用取得了快速发展,地震波场模拟计算、由数字地震波形资料反演地球结构、反演震源过程、测定震源参数等诸多地震学的传统领域的研究产生了革命性的进步。因此迫切需要重编一本包含现代地震学的最新发现,介绍当前地震学前沿性研究内容,对部分过去的地震学内容(尤其是地震观测、地球结构的地震学反演方法、地震定位、地震参数测量方法等相关内容)进行更新的新编教材。

2004年作者在教研室主任陈晓非教授的安排下,开始为北京大学讲授地球物理学专业本科生主干基础课地震学与地球内部物理学。考虑到国内现存的地震学教科书部分内容需要更新,陈晓非教授建议选用国际上流行的地震学教科书 *Modern Global Seismology* (Lay & Wallace, 1995) 和 *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure* (Stein & Wysession, 2003), 并亲手制定了教学大纲。教学实践发现:使用国际上流行的英文教材固然有许多长处,但是:(1) 由于教育体制的不同,这两本书在国外大都作为研究生教材,内容较杂;(2) 英文原版教材过于昂贵。因此,我们主要依据陈晓非教授编制的教学大纲,参照上述两本英文教材,结合我们在科研和教学中的一些体会,编写自己的讲义。本教材实际是作者2004—2010年在北京大学讲授地球物理学专业本科生主干基础课“地震学与地球内部物理学”的讲义整理而成。

在本教材的编写过程中,借鉴了国内外许多优秀的专业著作和教材的内容,也引用了不少科研文献的图件。特别需要指出和感谢的是:在第一章引言(1.2.4 核爆炸的地震学侦查)中我们引用了《核爆炸地震学概要》(吴忠良,陈运泰,牟其铎,1994)书上的有关内容;第八章(8.2.3 全球重要数字地震台网介绍)中我们引用了《数字地震学》(陈运泰,吴忠良,王培德,许力生,李鸿吉,牟其铎,2004)书上的有关内容。在教材结构的设计上我们借鉴了 *Modern Global Seismology* (Lay & Wallace, 1995) 和《地震学教程》(傅淑芳,刘宝诚,1991)的结构。本教材还引用了 *New Manual of Seismological Observatory Practice*, *GeoForschungsZentrum Potsdam* (GFZ 培训教材, Peter Bormann, 2002), 《地球物理学基础》(傅承义,陈运泰,祁贵仲, 1985), 《地震工程学》(胡聿贤著, 1988)等著作和没列入主要参考书目的科研文献的部分研究成果和图件,在此表达深深的谢意。

由于我们水平有限,书中可能存在一些不妥或错误之处,敬请读者提出宝贵意见。

周仕勇 许忠淮

2010-07-26

目 录

第一章 引言	(1)
1.1 现代地震学的发展	(2)
1.2 地震学在地球科学领域及现代社会中的应用	(6)
1.3 地球内部结构概述	(13)
思考题	(17)
第二章 弹性力学基础与地震波	(19)
2.1 应变与位移的关系	(19)
2.2 应力张量	(21)
2.3 本构方程与广义胡克定律	(24)
2.4 波动方程	(25)
2.5 P波、S波势函数表达的波动方程	(31)
2.6 波动方程的解	(31)
思考题	(40)
第三章 体波与射线理论	(41)
3.1 程函方程(eikonal equation)与射线路径	(41)
3.2 忽略曲率的水平状地球模型中的射线走时	(46)
3.3 水平分层介质中的走时方程	(49)
3.4 球对称地球模型中的走时曲线与射线曲率	(56)
3.5 地震波的振幅、能量与几何扩散	(61)
3.6 地震波能量在边界上的分配	(63)
3.7 地震波的衰减	(71)
思考题	(77)
第四章 面波与地球自由震荡	(80)
4.1 自由界面对地震波的影响	(80)
4.2 瑞利波	(82)
4.3 洛夫波	(86)
4.4 面波的传播,相速度与群速度	(91)
4.5 地球自由振荡	(98)
4.6 面波与地球自由振荡的衰减	(105)
思考题	(106)
第五章 地球内部结构的确定	(108)
5.1 一维地球速度结构走时反演	(108)

5.2 三维地球速度结构反演	(112)
5.3 反演方程的一般解法	(120)
思考题	(123)
第六章 地震震源	(125)
6.1 爆炸点源激发的地震波	(125)
6.2 地震位错模型与格林(Green)函数	(126)
6.3 地震矩张量	(129)
6.4 均匀弹性介质中静位错源产生的位移场	(130)
6.5 震源在均匀弹性介质中激发的动态位移场	(135)
6.6 地震矩与断面层解	(142)
6.7 有限尺度震源产生的地震波	(144)
思考题	(147)
第七章 地震运动学与动力学研究	(148)
7.1 震源谱研究	(148)
7.2 理论地震图合成与震源破裂过程反演	(152)
7.3 地震动力学与破裂准则	(155)
思考题	(160)
第八章 地震观测与震源参数测定	(161)
8.1 地震观测发展与地震仪原理	(161)
8.2 地震台网与地震台选址和架设的一般原则	(169)
8.3 震级测量与地震定位	(174)
8.4 P波初动测定震源机制(断层面解)	(183)
8.5 地震活动性分析	(189)
8.6 地震预测问题的讨论	(193)
思考题	(195)
本书主要参考书目	(196)

第一章 引言

20 世纪伟大的地震学家 Keiiti Aki (安艺敬一) 在 1980 年全美地球物理学年会上曾预言: “地震学将保持其在固体地球科学中的核心学科地位许多, 许多, 许多年。当你通过地表观测的地震波而获取到地球内部的某些新的认识和发现时, 你会为自己作为地震学家而由衷地快乐和骄傲”。Keiiti Aki 的预言到 30 多年后的今天仍然有效, 地震学依然在固体地球科学中扮演着核心学科的角色, Aki 预言 30 多年后的今天及今后相当长的一段时间, 关于地球内部结构及物理过程的新的认识和发现仍是由地震学研究起着主导作用。特别是近年来数字地震观测技术及台网的迅速发展和普及, 使地震学家们有能力对震源过程进行更细致地观测, 对地球内部结构展开更高精度的探测和反演。我们无疑迎来了 19 世纪末基于地震仪的发明和地震台网建设而兴起的现代地震学发展的又一个黄金时代。

本书作为讲授现代地震学的基础教材, 将系统介绍地震波基本理论及其简单应用, 并引导读者思考以地震学理论为工具开展地震预测、地球内部物理学、地球动力学相关问题的研究。关于地震学的定义及地震学研究的对象与目的, 不同教科书有不同的表述。下面我们通过归纳已有的代表性表述, 给出我们自己的关于现代地震学的定义。

表述 1(摘自中国大百科全书—固体地球物理学、测绘学和空间科学卷, 1985, 175 页): 地震学是研究固体地球的震动和有关现象的一门科学, 固体地球物理学的一个重要分支。它不仅研究天然地震, 也研究某些人为的或自然因素(如地下爆炸、岩浆冲击、岩洞塌陷等)所造成的地的震动。这门科学首先是人类企图逃避或抗御地震灾害而发展起来的。

表述 2(摘自 K. Aki & P. G. Richards 著. 定量地震学. 李钦祖, 等译. 1986): 地震学是以地震图的资料为基础的一门科学。地震图是地球的机械振动的记录。这些振动可以用爆破人为地产生, 也可以由地震和火山喷发等天然原因产生。

表述 3(摘自傅淑芳, 刘宝诚著. 地震学教程. 1991): 地震学是研究地震的发生、地震波的接收及传播、地球介质的构造及特征的一门学科。它是地球物理学的一个重要分支。具体来说, 它主要是根据天然地震或人工地震的资料, 运用物理学、数学及地质学的知识, 来研究地震发生的状况、地震波传播的规律, 地壳和地球内部的分层构造及介质特征; 以求一方面达到预测、预防乃至控制地震, 另一方面达到透视地球内部的目的。

表述 4(摘自 T. Lay & T. C. Wallace 著. *Modern Global Seismology*. 1995): 地震学是研究激发地球中弹性波的源以及这种弹性波的生成、传播及弹性波记录图的学科。

表述 5(摘自 S. Stein & M. Wysession 著. *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*. 2003): 地震学是研究由天然地震或人工地震激发的弹性波在固体地球内部传播的学科。它是地球内部结构研究的基本工具, 也是地震及相关现象研究的方法基础。

地震学区别于固体地球科学其他分支学科的显著特点是: ① 在经典弹性力学理论基础上建立和发展的地震波激发、传播、接收和解释的理论是固体地球科学中最完备的理论体系; ② 以地震波为代表的地震学所应用的基础资料能穿透地球的最深处, 从而携带地球深处的结构和物理信息, 使地震学具备高精度的探测地球内部结构的能力, 迄今为止地震学仍是研究地

球内部结构最可靠、最精细的方法;③ 现代地震学是建立在地震观测基础上并在对地震观测的研究与结果解释的过程中不断完善和发展的科学,地震预测是现代地震学建立的原动力和重要的长期研究目标之一。综上所述,我们可以看到:地震波理论是地震学的理论核心;地震记录是地震学研究和解释的基本观测资料;地震波在地球介质中的激发和传播、地球内部结构的地震波探测、天然地震的震源物理过程及基于地震学理论天然地震预测研究是地震学研究的基本内容。由此得到我们对现代地震学的定义:地震学是关于地震波在地球介质中的产生、传播、接收与解释理论的一门学科。它是基于地震波理论并结合地震波观测开展震源、地震减灾及地球内部结构探测方法研究的一门学科,是固体地球物理学的一个重要分支。

1.1 现代地震学的发展

现代地震学是建立在现代地震观测基础上的,并在对地震观测结果的解释和研究过程中不断完善和发展的科学。因而地震观测是地震学的基础,它在地震学乃至整个地球科学的发展中起着非常重要的作用。用仪器观测地震,最早始于我国东汉时期。公元 132 年我国东汉科学家张衡设计并制造了候风地动仪(图 1.1),并于公元 134 年 12 月 13 日在当时的首都洛阳检测到了一次发生在陇西的地震。这是人类第一次用仪器检测到远处发生的地震。这时的地震仪实际上是验震器,即用于指示地震发生的装置,不可能像现代地震仪一样记录地震所引起的地面震动过程。尽管如此,候风地动仪仍是一项值得我们中国人骄傲的伟大发明,它不但展现了古代灿烂的科学文明,在通信极为困难的当时,如果能检测出远处发生了大地震,对中央政府组织赈灾,减轻地震造成的灾害和社会动乱,无疑也是很有意义的。



图 1.1 公元 132 年我国东汉科学家张衡设计制造的候风地动仪

(P. Borman 摄)

现代地震观测实际始于 19 世纪末,从 19 世纪末到 20 世纪初现代地震仪的制成并安装使用,为建立在仪器记录基础上的现代地震学的研究奠定了基础。1875 年意大利人菲利普·切基(Filippo Cecchi)制造了第一台近代地震仪,可以记录两个分量(南—北分量与东—西分量)的地面运动。菲利普·切基的摆式地震仪放大倍数只有 3 倍,只能记录强震。1892 年米尔纳

(J. Milne)在日本架设了能记录 3 个分量地面运动的三分向摆式地震仪,为以后布设的全球地震观测台网打下了基础。1898 年,维歇尔特(E. Wiechert)将粘滞阻尼引入地震仪,用大质量的摆和弱弹簧组成拾震系统,从而可以记录较宽频带的地震信号。1905 年俄国伽利津(Б. Голицын)成功设计并制成了电流计记录式地震仪,将机械能转换成电能,并将拾震器与电流计记录系统分开,更大地提高了地震仪的灵敏度。1925 年安德森(J. A. Anderson)和伍德(H. O. Wood)制造了一种直接光杠杆放大记录的地震仪,其拾震系统的自由周期为 0.8 秒,阻尼因数 0.8,放大倍数为 2800。安德森-伍德地震仪(图 1.2),1935 年被里克特(C. F. Richter)制定震级标准所采用,里氏震级标度迄今仍在沿用。

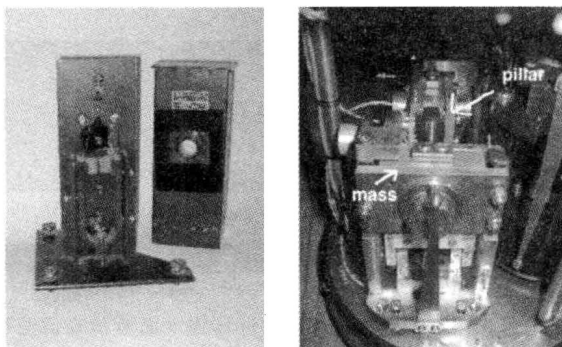


图 1.2 安德森-伍德地震仪(左)与现代宽频带数字地震仪(右)的拾震系统

从 1660 年胡克(R. Hooke)定律的创立开始,到 19 世纪末作为地震波理论基础的弹性波理论的建立,一共经历了 200 多年的时间。纳维尔(L. Navier)在 1821 年发表了关于一般平衡方程和振动方程的研究;1828 年泊松(Simeon-Denis Poisson)从理论上推导出弹性波存在纵波和横波两类体波;1887 年瑞利(L. Rayleigh)从理论上推测面波的存在;1892—1903 年,洛夫(A. E. Love)进一步发展面波理论;1904 年兰姆(H. Lamb)导出了层状介质中地震波传播的基本理论。经典弹性理论系统的建立为现代地震学体系的建设奠定了理论基础。

1875 年开始有了地面震动记录图,标志着现代地震学资料基础的诞生,1935 年里氏震级标度确立了地震参数(时间,地点,强度三要素)的定量描述基础,标志着现代地震学框架的建立已基本完成。

现代地震学建立的初始目标或原动力是开展地震预测研究,以有效减轻地震灾害。天然地震及相关现象如地震波传播等是该学科最初的主要研究对象。现代地震学自 19 世纪末开始建立,历经 100 多年的发展,其研究领域大大拓宽。现代地震学的主要内容如今可以归纳为如下几个方面:

(1) 地震波理论与地震波场模拟

地震波理论是关于地震波的激发及地震波在地球介质中传播的理论,其理论基础是经典弹性力学。地震波理论的研究由最初的均匀、各向同性、线性弹性介质中波的激发与传播问题(本书第 2—4 章将做详细阐述),后来逐渐发展到非均匀、非完全弹性及各向异性介质中波动方程与波的传播问题研究。由于在高频近似的条件下,地震波的传播问题用射线理论可以大大简化(详见本书第 3 章),可以看到我们将要学习的地震波理论与我们已经获得的经典光学或声学中光或声波的传播的许多概念和定理(如惠更斯原理、费马定理等)是可以相互借用的,

从而大大简化了地震波传播(尤其是在非均匀、复杂介质中的传播)理论的描述及地震波场模拟计算等相关问题的求解。

近年来,宽频带数字地震观测技术的发展及迅速普及,使我们有能力在更宽的频带范围内记录到地震波;计算机技术(高速度、大内存及并行计算技术等)及数值计算理论的高速发展使我们有能力开展复杂介质中宽频带地震波的激发与传播的波场模拟及理论地震图的计算。由此有限频地震波理论(finite frequency seismology)成了地震学的一个发展前沿。有限频地震波理论不再借用高频近似假设的射线理论,完全从波动方程出发,求解地震波在地球介质中传播的问题。因而理论更严密、求解精度更高,但理论描述及相关问题的求解过程颇为复杂,本教程作为入门教材,将不作专门介绍。

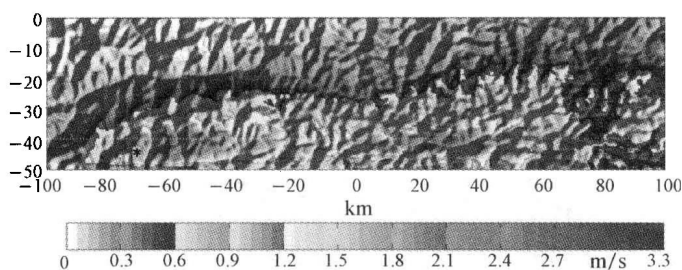


图 1.3 2008 年 5 月 12 日汶川 Ms8.0 地震近场强地面运动峰值速度数值模拟结果
(‘*’标记的是地震初始破裂点位置;横坐标为沿 N50°E 方向;据陈晓非等,2008)

(2) 震源物理与地震震源参数测定

震源物理是指研究地震孕育、发生的物理过程及相关物理现象(本书第 6—8 章将作详细阐述)。由地震震源激发并经过地球介质传播至地震台的地震波,携带着地震震源及地震波传播路径上地球介质两方面的信息。因此传统上,我们利用地震波记录开展的反演研究可分为两类:一类是地震震源参数的反演,另一类是地球介质结构的反演。

如前面指出:现代地震学发展的原动力是矿产勘探和减轻地震灾害的需求。预测地震首先要认识地震发生的物理过程。里德(H. F. Reid)早在 1910 年就提出了关于地震成因的弹性回跳学说,1923 年日本学者中野广首先发现地震记录的地面初动四象限分布,并由此发展了地震震源的无矩双力偶(double-couple)点源模型,1950 年代前苏联科学家提出了地震震源的等效位错理论,这些重要发现是开展地震震源参数测量的理论基础,也是迄今为止震源物理研究中取得的重要进展。

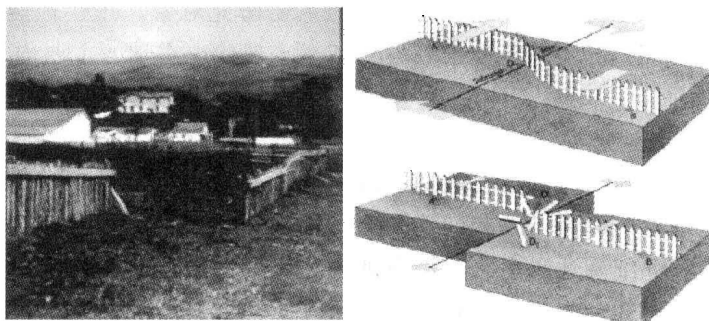


图 1.4 1906 年美国旧金山大地震破坏农场(左)及
Reid 据此提出的地震成因的弹性回跳模型示意图(右)

有限尺度震源破裂的物理过程研究是当前震源物理研究的重要课题。宽频带数字地震观测为我们开展震源破裂运动学反演研究提供了较好的资料基础,也为开展震源断层破裂动力学研究提供了较好的观测约束。

(3) 地球内部结构反演与地震勘探

迄今为止,地震波仍然是能够穿透整个地球并详细探测地球深部的最有效工具。自 20 世纪初期有了初步的地震波走时表后,便开始研究地球内部地震波速度的分布。1938 年古登堡(B. Gutenberg)和里克特,1940 年杰弗里斯(H. Jeffreys)和布伦(K. E. Bullen)根据大量地震震相的到时资料,构制地震波走时表,并发表了与现今研究结果很接近的地球内部地震波速度分布图像。此后,有关地球内部的结构分层、物理特性及物质组成等问题的研究,都直接或间接应用了地球内部速度分布的结果。

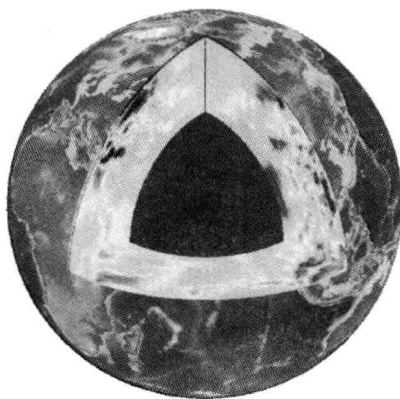


图 1.5 地球三维速度结构示意图

(根据 Li et al., 2008 中的结果 MIT-P08 绘制)

应该指出,地震波对地球内部结构的探测研究近年来已取得了显著的进展。我们不但对地球内部结构的分层(壳幔、幔核及内外核一级速度间断面)有了清楚的认识,对地球深部次级分层结构及区域性地壳分层结构的探测也能获取稳定、清晰的图像。对地球深部结构的横向变化及三维速度结构的反演也取得了重大进展,发表了地球三维速度结构模型(如 Crust2.0, AKI135 等)。地球内部结构的地震学反演研究目前所面临的课题是:如何获取更高精度的地球内部结构图像?一个发展趋势是在关键的研究区域布设高密度的流动地震观测台阵以改善和丰富资料的同时,在反演方法上借用勘探地震学的一些方法和技术(如偏移叠加、 τ -P 变换法、聚束和 F-K 分析法等),以获取高精度的结构图像。应该指出,勘探地震学是地震学的一个重要分支学科,地震勘探是地震波理论在地壳浅层结构精细反演中的具体应用。本书第 5 章将详细介绍地球内部结构地震学探测方法和结果。

(4) 地震观测与地震预测

地震观测是指用仪器记录天然地震或人工震源产生的地面震动(地震波)、并由此确定地震或人工震源基本参数(发震时间、震源位置及震级等)的过程(本书第 8 章将详细介绍)。地震观测包含有地震仪的研制、地震观测台网或台阵的布设方案设计、地震台的选址与建设、地震资料的分析与地震基本参数的测定等内容。现代地震学是在现代地震观测基础上建立和发展起来的学科。1889 年英国人米尔纳和尤因(J. A. Ewing)安置在德国波茨坦的现代地震仪

记录到了发生在日本的一次地震,获得了人类历史上第一张地震图。以后的百余年,地震观测水平有了极大的提高。20 世纪 60 年代,在世界范围内建成了由 120 个安装有标准地震仪的地震台组成的世界标准地震台网(WWSSN),20 世纪 80 年代,在世界范围内建成了安装有宽频带数字地震仪的 65 个地震台组成的全球数字地震台网(GDSN)。宽频带数字地震仪的出现是地震观测发展历史上又一次大的革命,同时也极大地推动了地震学的发展,产生了一系列用地震波波形资料开展震源和地球内部结构研究的新的理论和方法,使我们对震源过程及地球内部结构的反演研究更为方便和精细,也大大方便了资料的交流和国际合作研究计划的开展。如今,在著名的数字地震波形资料下载网站 www.iris.edu 上搜集的由世界各机构或政府资助的全球数字地震台已超过 900 个。

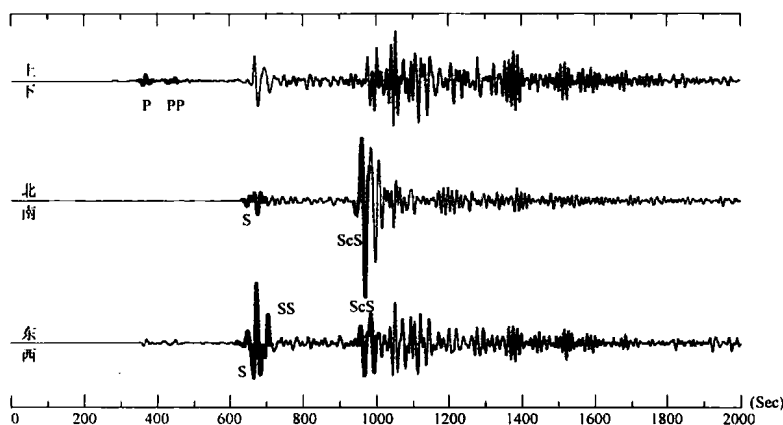


图 1.6 北京大学架设在中国宝鸡市的三分量宽频带数字地震仪记录的
2005 年 10 月 8 日巴基斯坦 Mw7.6 级地震,震中距为 28°

地震减灾是现代地震学发展的重要动力。地震观测的发展及震源物理学研究进展与地震预测目标的实现是密切相关的。然而由于孕震过程的复杂性及目前仍缺乏对震源进行直接观测的能力,我们对地震机理及震源破裂的物理过程的研究仍无突破性进展,对震源破裂如何起始、扩展及终止尚无明确认识。因此离实现地震预测的目标还有很长的路要走。目前地震预测的研究进展主要还是用统计学理论建立基于地震目录资料的地震危险性分析,亦即地震长期预测,并在重大工程选址等地震工程学领域取得了较大的成功。须指出的是:建立在现代地震观测基础上的现代地震目录由于记录时间短,在统计分析中常遇到样本量不够的缺陷,而依据文献记录和地震地质研究建立的历史地震目录虽然能将地震记录延伸至千年的尺度,但由于漏震及震级不确定性大,致使目录的完备性差。依托计算机技术的高速发展及震源物理学深入研究成果而开展的地震活动性理论模拟和理论地震目录计算可能是弥补现有地震目录缺陷的一种新的有希望的尝试,是目前震源物理及地震预测研究的前沿课题之一,值得关注。

1.2 地震学在地球科学领域及现代社会中的应用

由于地震波能穿透地球的最深处,从而携带地球深处的结构和物理信息,使地震学具备高精度探测地球内部结构的能力,因而地震学仍是探测研究地球内部结构最可靠、最精细的方

法,在地球动力学研究中有广泛的应用。另一方面,地震学涉及的地震震源研究、地震强地面运动模拟及核爆炸识别等有重要的社会应用意义。

1.2.1 地球内部结构反演研究的应用

实际上地震波传播理论与地球内部结构地震学探测是地震学中相互依存、相互促进的两个研究方向。从简单的震相到时计算到复杂的理论地震图合成都必须了解地震波所传播的地球介质的速度结构。同样,我们对地球结构的认识来源于地震波记录。

按地震波的性质与波的传播路径,如图 1.7 所示的各种类型的地震波(或称震相),地震学中都用简单的统一符号标记。

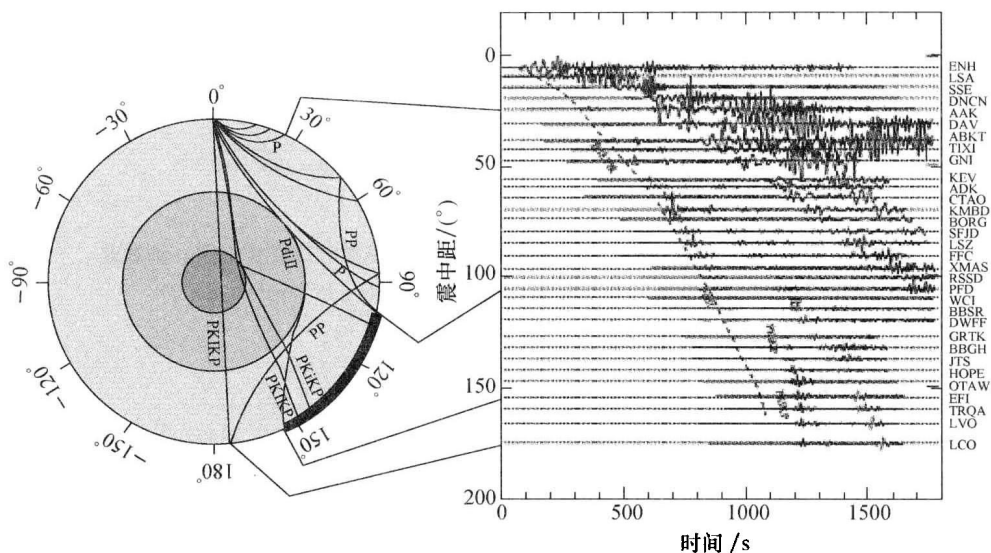


图 1.7 通过地球内部的典型地震波射线震相标记(左)及相应的地震图(右)

在地震图上可清楚看到不同时间到达的子波列,我们称之为震相。震相是地震图上显示的震动特征不同(如 P 波、S 波)或传播路径不同的地震波组。各种震相在到时、波形、振幅、周期和质点运动方式等方面都各有其特征。震相特征取决于震源和传播介质的特性。由于这些波组都有一定的持续时间,所以相邻震相的波形互相重叠,产生干涉,使地震图呈现出一幅复杂图形。地震学的任务之一就是分析、解释各种震相的起因和物理意义,并利用各种震相走时曲线推测地球内部的速度结构。地震震相的识别与分析是地震学研究中最为基础的工作,通过搜集大量不同震中距地震台记录的各震相到时资料,杰弗里斯 1939 年发表了地球内部 P 波和 S 波的速度分层模型,布伦 1940 年提出了地球的密度分布模型。依据大量震相走时资料制定的杰弗里斯-布伦全球地震波震相平均走时表(简称 J-B 表),在全球地震定位中应用了近 70 年,其预测的震相理论走时与实际观测结果间的相对误差小于 1%(图 1.8),迄今仍是地震定位及地球速度结构横向不均匀性研究的标准参考模型之一。

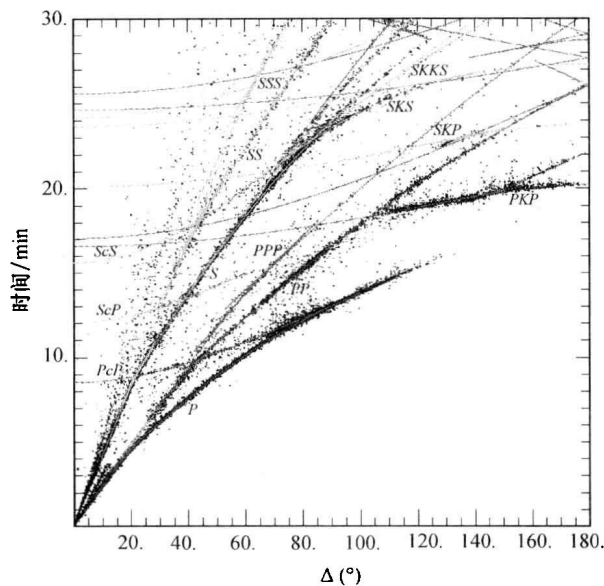


图 1.8 ISC(国际地震中心)搜集到的近百万个震相到时数据叠加图。细线是用 Jeffreys 地球结构模型计算的各震相走时曲线(引自 P. Borman, 2002)

1.2.2 地震危险性评价

地震学研究的基本目标之一是对某地未来一定时期内可能经受的最大地震动及其特征进行预测。地震研究表明,地震发生的地域分布与全球主要构造带分布是密切相关的,图 1.9 为全球 5 级以上地震震中分布图,可以清晰地看到地震基本是沿约 100 km 宽的板块边界带分布的。虽然有约不到 10% 的地震分布在远离边界的板内区域,张培震研究员领导的中国内陆地震成因机理研究组的最新成果表明:板内地震的分布与内陆造山带等板内活动构造分布密切相关,即板内强震大多数分布在板内各构造块体边界带上。通常情况下,板内地震较板缘地震对人民生命、财产的威胁更大,这也是我国是世界上地震灾害死伤人数最多的国家的主要原因之一。

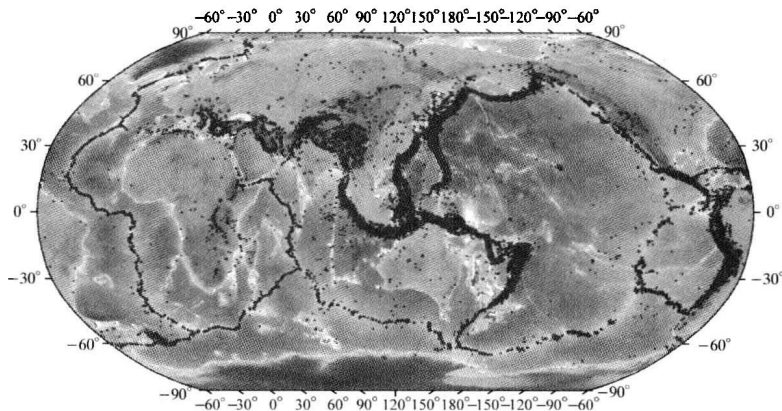


图 1.9 1973—2008 年全球 5 级以上地震震中分布图(根据 NEIC 的 PDE 地震目录绘制)

由表 1.1 可以看出地震在地球上的发生是非常频繁的,庆幸的是能造成严重灾害的 7 级以上强震所占的比例数是非常小的。由表 1.2 可以看出,有现代地震仪器记录以来全球所发生的特大地震全都发生在海洋板块向大陆板块俯冲的边界带上。除 2004 年发生在印尼苏门达腊的 M_w 9.3 地震由于引起海啸造成严重灾难外(参见表 1.3),其余 4 次地震并没有造成严重的灾难后果。而随着海啸监测预警系统的建设与完善,地震海啸灾难的风险未来可能会显著减小。仔细分析表 1.3 可以看到,主要的地震灾难是由位于人口密集区的板内大地震造成的,因此加强人口密集区地震监测与地震防范是减轻地震灾难的有效途径。

表 1.1 全球平均每年发生的地震数目

地震震级(M_s)	每年地震数	地震波能量释放(10^{15} 焦耳/年)
≥ 8.0	0~2	0~1000
7~7.9	12	100
6~6.9	110	30
5~5.9	1400	5
4~4.9	13500	1
3~3.9	>100000	0.2

表 1.2 1900 年以来全球 5 次震级最大的地震

时间(世界时)	地点	震级(M_w)
1952-11-04 16:58	俄罗斯勘察加半岛	9.0
1957-03-09 14:22	美国阿留申群岛	8.6
1960-05-22 19:11	智利	9.6
1964-03-28 03:36	美国阿拉斯加	9.2
2004-12-26 00:58	印尼苏门达腊	9.3

关于地震危险性预测,目前取得的较为显著的进展是强震孕育构造环境的认识。以地震构造空区(或空段)、异常地震条带等基于活动断层及地震空间活动图像分析圈定未来强震危险地点(或区)的方法,在地震危险性长期预测上获得了一定的成功,并在城市规划及重要生命线工程国家战略布局上得到应用,取得了较大的经济效益与社会效益。但关于具体构造区强震发生时间的几天至数年尺度的中短期预测迄今仍无令人信服的进展。20 世纪末,以美国学者盖勒为首提出地震具有典型的分形结构,不存在特征长度标度,是一种自组织临界现象。而自组织临界现象具有内禀的不可预测性,所以地震发生时间是不可预测的。他们的观点在科学界的争论至今仍在持续,但愈来愈多的认识倾向认为盖勒等观点的理论基础过于牵强、片面。更多的学者认为,由于目前的方法和技术,不能深入地球内部对震源及地震的孕育过程进行直接或精确的间接观测,使得对地震发生时间的预测估计受到约束,但随着对地震前兆观测的积累、地震前兆产生的物理机理认识的深入及地震孕育与震源破裂物理过程研究的深入,实现有物理基础的地震发生时间概率性预测是有可能的。应该说,由于中国是遭受地震灾害最大的国家,中国对地震预测研究所投入的人力与物力大大高于世界其他国家,中国科学家在地震预测研究上的科学成就在国际上是先进的,中国科学家编制了时间跨度最长的国家历史地震目录,总结编写最多的强震前兆震例。

表 1.3 1900 年以来全球 13 个最有影响的灾难性地震

时间(世界时)	地点	震级	灾难
1906-04-18	美国旧金山	8.3	地震造成 2500 余人死亡,地震及地震引起的火灾造成旧金山城市大量建筑遭到严重毁坏,成为美国历史上最重大的自然灾害之一
1908-12-28	意大利墨西拿	7.5	地震使墨西拿市的一半人口约 7.5 万人丧生,加上意大利本土的死亡人数,共有 16 万人死亡
1920-12-16	中国海原	8.5	地震造成 23 万多人死亡,海原县城全部房屋荡平
1923-09-01	日本东京	8.2	地震造成 14 万余人死亡,地震及其引起的火灾造成了东京市大量建筑遭到严重毁坏,并引起了海啸
1960-05-22	智利	9.6	地震造成了 5700 余人死亡,是有仪器记录以来地球上发生的最大震级的地震,引起了地球的自由振荡并被清晰记录,引起的大海啸波及日本,使日本因该大海啸死亡 3000 余人
1970-05-31	秘鲁钦博特	7.8	地震造成了约 6.7 万人死亡,10 万多人受伤。该地震以东的容加依市,被地震引发的冰川泥石流埋没全城 2.3 万人
1976-07-27	中国唐山	7.8	地震造成 24 万余人死亡,唐山市几乎荡平
1985-09-19	墨西哥	8.1	地震造成约 1 万人死亡,上万所建筑被毁
1995-01-16	日本神户	7.2	地震造成约 5400 人死亡,34 000 多人受伤,19 万多幢房屋倒塌和损坏
1999-09-20	中国台湾	7.6	地震造成约 2100 人死亡,有 40 845 户房屋全部倒塌
2001-01-26	印度古吉拉特邦	7.9	10 万人在大地震中死亡,另有 20 万人受伤,作为印度最富庶地区之一的古吉拉特邦经济一下子倒退了 20 年
2004-12-26	印尼苏门达腊	9.3	地震及地震引起的海啸造成约 23 万人死亡,引起的海啸所造成伤亡与损失是迄今为止最大的
2008-05-12	中国汶川	8.0	地震造成约 8.8 万人死亡,引起大面积山体滑坡

地震危险性预测研究上取得的另一个进展是强震发生概率的统计模型的建立。比较有代表性的以新西兰科学家 David Vere-Jones 基于里德的弹性回跳理论提出的应力(能)释放模型。其基本思想是:一地区发生某一震级以上强震的危险性与该地区的应力水平存在如下关系:

$$\lambda(t) = \exp[a + \nu X(t)] = \exp[a + \nu(\rho t - S(t))], \quad (1-1)$$

式中: $X(t)$ 为研究区应力水平函数,由两部分组成: ρt 表示研究区构造应力(能)在时间 t 内的积累, $S(t)$ 表示研究区在时间 t 内所发生的地震引起的构造应力(能)的累积释放。该模型将工程地震学中传统应用的简单稳态泊松模型发展成非稳态泊松模型。作者应用 Scholz 的岩石材料破裂实验的结果,对 David Vere-Jones 的应力释放模型的危险性函数的数学表达形式进行了物理诠释,并将危险性函数拓展到空间,使之有更好的实用性。多维应力释放模型的危险性函数的数学表达为

$$\lambda(x, y, t) = g(x, y) \cdot \exp\{\nu[\rho(x, y)t - \sigma_s(x, y, t)]\}, \quad (1-2)$$

式中, $g(x, y)$ 为研究区背景地震活动性空间分布函数, $\rho(x, y)$ 为研究区各发震构造平均应力

加载速率, $\sigma_s(x, y, t)$ 为研究区时间 t 内地震发生所引起的累积应力变化。图 1.10 是我们计算的 1976 年 7 月 28 日唐山地震发生前后, 华北地区地震危险性函数空间等值线分布图, 我们可以看到, 唐山地震发生前, 该区地震危险性处于高值水平。

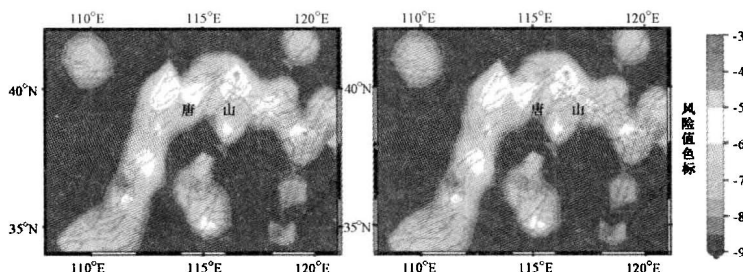


图 1.10 1976 年 7 月 28 日河北唐山 7.8 级地震发震前后地震危险性空间分布的比较。黑色的圆圈标志着这次地震的震中位置, 黑色细线代表华北地区活动断层体系。色标标记的是发生强震危险性大小(据姜明明, 2009)

1.2.3 工程地震学中的应用

地震可能造成的破坏使工程建设设计者们必须考虑工程的地震设防问题, 为此需要知道未来的地震活动性。工程师在设计一项工程时, 希望具体了解此工程场址在其使用寿命内可能遭遇到的地震动强弱及其特性, 以便合理地进行设计。然而如前节所述, 地震的发生目前还不能精确地预测, 只能在概率含意上推测工程可能受到的地震威胁或危险, 前节提到的地震危险性分析统计模型的建立, 是这里通常用到的一个手段。

近 20 年来, 地震危险性分析的研究与应用都取得了较大的进展。这一工作已成为联系地震学与地震工程学两者的重要纽带, 使结构抗震安全性有了科学的概率含意。地震危险性、危害性分析经历了两个阶段。在开始阶段中, 它指的只是地震动本身, 而且将地震危险性当做是一种确定性现象处理。即认定某一地区今后可能发生的地震动加速度不致超过某一强度如 $0.2g$; 或同时再指定一个标准反应谱; 再将这些地震动参数当做是确定的数值, 进行工程结构抗震设计。第二阶段的特点在于它认为地震的发生与地震动特性都具有随机因素, 必须用概率统计的方法去处理。因此, 地震动的估计以及震害影响的估计, 均用一定的超越概率表示。需指出的是, 地震学中的地震危险性分析涉及的是某强度震级的地震发生的概率计算, 而地震动除了地震强度这一重要参数影响外, 震源机制及介质结构与地形等场地条件也不可忽视。因此, 考虑介质结构不均匀性及地形影响的地震强地面运动理论模拟近年来开始走向工程地震学的应用中, 成为地震学应用的新热点。

1.2.4 核爆炸的地震学侦查

核爆炸的地震学侦查(吴忠良等, 1994)的意义在于: 在无法接近核试验场、并且关于地下核爆炸信息处于高度保密状态的情况下, 地震监测是侦查地下核试验最有效的、有时甚至是唯一的技术手段。地震学核爆侦查主要处理如下两个问题: (1) 通过震源定位及波形分析, 鉴别天然地震事件与地下核爆炸事件, 确认进行了核爆炸; (2) 通过核爆激发的地震波分析, 估计核爆炸当量。