



国家地震局项目成果 地震科学联合基金会资助

深井观测地震波典型记录 与分析应用

冯德益 张少泉 卫鹏飞 王俊国 编著



1990

地震出版社

国家地震局项目成果
地震科学联合基金资助

深井观测地震波典型 记录与分析应用

冯德益 张少泉 卫鹏飞 王俊国 编著

地震出版社

1990

内 容 简 介

本书是全面介绍近年来由国家地震局科技监测司组织的有关深井观测地震波分析应用的专项研究成果。

全书分上、下两编共六章。第一、二章为上编,重点给出中国不同地区、不同震中距的深井观测地震波的典型记录实例,同时也给出相应的地面记录以便进行对比分析。对深井观测地震波的震相特征等进行了初步解释。此外,还给出了一些深井观测的爆破与塌矿地震波记录以及苏联、美国在不同条件下得到的深井观测地震波记录实例。第三至六章为下编,专门介绍深井观测地震波的分析与应用,包括深井观测地震波的资料分析,理论分析,实验分析,以及深井观测地震波在测震分析、地下介质研究、地震预报和其他各方面的应用。作为附录,最后给出了深井地震观测规程(建议稿)。

本书可供地震观测和分析研究人员、高等院校有关专业的师生参考,也可作为有关专业人员的培训教材。

深井观测地震波典型记录与分析应用

冯德益 张少泉 编著
卫鹏飞 王俊国
责任编辑:李俊
责任校对:李和文

地震出版社出版

北京民族学院南路9号
中国建工出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
全国各地新华书店经售

787×1092 1/16 13.5印张 345千字
1990年10月第一版 1990年10月第一次印刷
印数 001—450

ISBN 7-5028-0400-5/P·257

(788) 定价:7.00元

序

地震波的井下观测,已有半个世纪的历史了,近20年来的发展较快。其主要目的是为了降低背景干扰水平,尤其是为提高平原地区的地震监测能力提供可能的途径。

美国从本世纪30年代开始在井下进行地震波观测,现已建成了SRO、ASRO、DW-WSSN等全球性的井下观测数字化记录地震台网。另外,在北美大陆还有一个区域性井下观测地震台网RSTN。日本从60年代初开始进行井下观测地震波的试验,现已在东京地区建成了岩槻(3510米)、下総(2300米)、府中(2750米)三个超深井观测地震台。苏联于70年代中期开始在中亚建立井下观测地震台,如阿拉木图地区的三个井下观测地震台,其观测井孔深度达800米—1200米。

我国对井下地震观测系统的开发研究,始于70年代中期。近20年来,在我国东部地区的北京、天津、上海、河北、山东、河南、江苏和西部地区的甘肃、云南、四川等地,相继建成了几个地区性的井下观测地震台网和一批井下观测地震台。目前全国用于地震观测的专用井孔已超过70口,其深度为100多米至1000多米,记录物理量多为位移,亦有部分速度和加速度记录。可以说,我国的井下地震观测系统正在从实验性应用阶段转变到实用化阶段,井下观测地震台已成为我国地震监测台网的重要组成部分,在提供地震基本参数、监视地震活动变化、为地震预报提供前兆信息等方面,日益发挥出重要的作用。

但是,由于在井下和地面分别记录的地震波二者之间存在差异,基础理论研究工作又没有完全跟上来,造成了观测与分析,分析与应用脱节的现象,从而影响了井下地震观测系统向实用化阶段的过渡,影响了这些耗资上百万元的系统充分发挥效益,成为了当前地震分析工作中亟待解决的重要问题之一。为此,国家地震局于1985年组织部分科技骨干开展了对井下观测地震波的理论、应用、实验研究,并于1986年5月在天津召开了“井下地震波学术讨论暨工作会议”,同时专门成立了“井下地震观测和研究工作协调组”,以推进井下观测地震波资料实用化研究工作。

经过几年来的深入研究,取得了一批较为满意的成果,对井下观测地震波的走时特征、振幅特征、频谱特征、波形特征以及台基介质特征的影响等,进行了统一的解释。这些成果尽管还不够完善,有些问题尚待进一步探讨,但毕竟是奠定了对井下观测地震波进行系统研究的基础,并在指导井下观测地震台的建设和调整,在地震分析、地震预报研究、地下介质特性研究和某些场地工程参数的确定等方面可以发挥更大的作用。

《深井观测地震波典型记录与分析应用》一书,是在总结近几年研究成果的基础上完成的,是我国第一部关于井下观测地震波资料分析应用方面的专著。该书的出版对推进井下观测地震波资料分析的规范化、解释的定量化、提高资料的利用率,将起到指导作用。

井下地震学是现代地震学的一个重要组成部分。我认为,井下观测地震波的研究,无疑会在促进地震波传播理论及其对软盖层特征的研究等方面起积极的作用。

陈章立

一九九〇年五月十五日

前 言

深井地震观测技术的发展已有半个世纪之久，特别是近20年来发展很快。发展这项技术主要目的是为了避开各种地面噪声的干扰，提高地震监测能力与分辨率。最早的深井地震观测是本世纪30年代在美国进行的，现在已建立了由地震研究观测台（SRO）、简化的地震研究观测台（ASRO）和世界标准地震台网（DWWSSN）组成的全球数字地震台网，其中的SRO系统就有13个孔深为100m的井下地震台；此外，分布于北美大陆的区域地震试验台网（RSTN）的5个台，也都是深井地震观测台。60年代中期，为了提高关东平原地区地震台网的监测能力，日本开始进行深井地震观测的研究，从1971年到1981年在东京及其邻近地区相继建成了岩槻（IWT）、下総（SHM）和府中（FCH）等超深井地震观测台，仪器深度分别为井下3510m，2300m和2750m。苏联于70年代中期开始在中亚地震预报试验场建立了深井地震观测台网，例如，在阿拉木图地震传输台网中就建立了三个深度达800—1200m的深井地震观测台。

我国开展深井地震观测也有近20年的历史，目前已有70多个深井观测地震台，主要分布在京、津、沪三大城市附近及河北、山东、山西、河南、江苏、甘肃、陕西、四川、云南等省，其中相当一部分台采用电信传输方式遥测记录。随着我国深井地震观测台网的不断发展，特别是在沉积覆盖层较厚的平原地区，部分深井观测台网已逐步取代了地面观测台站，因此深井地震观测资料的分析解释与应用就成了需要专门研究的重要课题。

通过深井观测的实践，人们已经发现井下的地震记录与地面记录存在着某些差异，而这些差异会给整个测震资料的统一解释和应用带来一定的困难。为此，国家地震局科技监测司在1985年下达了“井下和地面记录的地震波理论、应用与实验研究”课题，由天津市地震局与国家地震局地球物理研究所共同完成。1986年5月国家地震局与中国地震学会在天津联合召开了首届“井下地震波学术讨论会”，随后国家地震局成立了“井下地震观测和研究工作协调组”，继续组织局地球物理研究所和天津市地震局开展了一系列有关深井地震观测与分析方面的研究工作，现已完成上述课题及后续课题任务，并发表了多篇学术论文。本书就是在完成其中有关井下记录地震波分析研究与应用方面课题的基础上写成的，书中集中地反映了这一课题任务的主要研究成果和国内外研究现状。

本书分上、下两编。上编为深井观测地震波典型记录，从我国25个深井观测地震台的大量地震图中，选出一些具有代表性的，不同地区不同震中距的典型井下地震记录加以简略的解释，拟作为分析深井地震记录图的范例；同时，为了进行对比分析研究，还给出了许多同一地震台记录同一次地震的地面记录的实例，以及一些国外的深井与地面地震记录实例。下编以这些典型记录为基础，介绍深井观测地震波资料的分析解释，深井观测地震波的理论分析与实验分析，以及深井观测地震波在测震分析、地下介质特性研究和地震预报等方面的初步应用。目前国外主要侧重于不同深度上井下地震记录的信噪比研究，而本书着重井下地震仪观测的天然地震记录特征并在震相特点、理论、实验和实际应用方面有较详细的论述。在书后的附录部分给出了深井地震观测工作规程（建议稿），供有关专业技

术人员参考。

本书各章的编写人如下：第一章、二章——王俊国、卫鹏飞、冯德益；第三章——王俊国、冯德益、卫鹏飞；第四章——冯德益；第五章——张少泉；第六章——冯德益、卫鹏飞、王俊国；附录——卫鹏飞、王俊国。全书最后由冯德益统一定稿。

除本书编著者外，近年来参加过深井观测地震波资料收集与分析研究工作的还有吴国、吴晓芝、郭建民、林云松、聂永安、郭瑞芝、何柏荣、荣振德、杨港生等同志。为本书的典型地震记录提供初选地震图的有国家地震局地球物理研究所、国家地震局兰州地震研究所、上海市地震局、天津市地震局、山东省地震局、江苏省地震局、江苏省常州市地震办公室及河南省地震局等单位。为初选地震图加注，并参加震相解释的测震分析人员有：郭瑛、周来顺、张宏志、蔡丽芳、范长清、李慧民、滕日智、周焕鹏、杨学军、张立志、徐元耀、王正庆、蒋放考和陈新民等。

本书是在国家地震局科技监测司的直接组织领导与大力支持下完成的。陈章立、杨懋源、修济刚、王秀文、李凤杰、郑治真、赵荣国等同志曾给予很大的鼓励与帮助，他们中大都审定了初稿，并提出了宝贵意见。崔秀琴同志把本书的内容简介和目录译成英文，有助于其在国际上的交流。

作者在此特向上述单位的领导部门与有关同志以及所有参加井下记录地震波分析研究工作的有关科技人员表示衷心的感谢！

我们希望广大地震观测、分析与研究人员及有关专业高等院校师生能从本书中较全面地了解到有关深井观测地震波典型记录、资料分析解释、理论分析与实验分析以及初步应用等方面的方法、范例与新近研究结果，同时也望能对本书不当之处多加批评指正！

作 者

1989年9月天津—北京

TYPICAL RECORDS OF SEISMIC WAVES OBSERVED IN DEEP BOREHOLES — ANALYSIS AND APPLICATIONS

Synopsis

This book introduces the special results concerning the analyses and applications of seismic waves observed in deep boreholes in China.

The book is divided into two parts containing six chapters. Part 1 consists of Chapter 1 and Chapter 2. It is mainly about the typical records of seismic waves with different epicentral distances and at various regions observed in deep boreholes in China, and their corresponding records on ground for the convenience of comparative analysis are also given. It gives a preliminary interpretation on the phase features of seismic waves observed in deep boreholes. Moreover, it shows some records of seismic waves obtained during blast or in collapsing mines, and also typical records of seismic waves observed in deep boreholes in the Soviet Union and the United States under various conditions. Part 2 consists of Chapter 3 to Chapter 6. Part 2 specializes in the analyses and applications of seismic waves observed in deep boreholes including data analyses, theoretical analyses, and experimental analyses of seismic waves observed in deep boreholes, and the applications of seismic waves observed in deep boreholes in the seismic interpretation, underground media research, earthquake prediction and in other fields. In the end, the regulations (suggested) of seismologic observations in deep boreholes is proposed as appendix.

This book can serve as reference for observers and analyzers at seismologic stations, researchers in seismological institutions, teachers and students of relevant departments at universities and colleges, as well as a training course of all the related professions.

目 录

上编 深井观测地震波典型记录

第一章 资料概况	(1)
§ 1.1 选用台站概况	(1)
§ 1.2 选用地震概况	(3)
第二章 深井观测地震波典型记录图及其初步解释	(7)

下编 深井观测地震波分析与应用

第三章 深井观测地震波资料分析	(119)
§ 3.1 干扰背景分析	(119)
§ 3.2 地震波特性分析	(124)
§ 3.3 平原地区覆盖层对地震波特性的影响	(126)
§ 3.4 井下和地面记录地震波特性的对比分析	(127)
第四章 深井观测地震波理论分析	(131)
§ 4.1 井下与地面记录地震波位移场的理论分析方法	(131)
§ 4.2 井下与地面记录地震波理论地震图计算	(132)
§ 4.3 井下与地面记录地震波频谱计算	(153)
§ 4.4 井下与地面记录地震波特性的理论对比分析	(155)
§ 4.5 深井观测地震波特性在理论上的初步解释	(165)
第五章 深井观测地震波实验分析	(168)
§ 5.1 基本思路	(168)
§ 5.2 室内超声实验	(168)
§ 5.3 现场爆破观测试验	(174)
§ 5.4 波场计算检验	(176)
§ 5.5 软盖层标定实验	(178)
第六章 深井观测地震波的初步应用	(180)
§ 6.1 深井观测地震波在测震分析中的应用	(180)
§ 6.2 深井观测地震波在地下介质特性与结构研究中的应用	(185)
§ 6.3 深井观测地震波在地震预报中的应用	(190)
§ 6.4 深井观测地震波在其他方面的应用	(194)
§ 6.5 与深井地震观测相关的井下观测技术及其综合应用	(195)
附录 深井地震观测工作规程(建议稿)	(197)
参考文献	(202)

Contents

Part I Typical Records of Seismic Waves Observed in Deep Boreholes

Chapter 1 General Conditions of Data	(1)
§ 1.1 General Condition of Stations Selected	(1)
§ 1.2 General Condition of Earthquakes Selected	(3)
Chapter 2 Typical Seismograms of Seismic Waves Observed in Deep Boreholes and Their Preliminary Interpretations	(7)

Part II Analyses and Application of Seismic Waves Observed in Deep Boreholes

Chapter 3 Analyses on the Data of Seismic Waves Observed in Deep Boreholes	(119)
§ 3.1 Analyses on the Noises of Background.....	(119)
§ 3.2 Analyses on the Characteristics of Seismic Waves	(124)
§ 3.3 Influence of the Covering Strata in Plain Area on the Cha- racteristics of Seismic Waves.....	(126)
§ 3.4 Comparative Analyses on the Characteristics of Seismic Waves Observed in Borehole and on Ground.....	(127)
Chapter 4 Theoretical Analyses of Seismic Waves Observed in Deep Boreholes	(131)
§ 4.1 Theoretical Methods for Analyses of the Displacement Fields of Seismic Waves Observed in Borehole and on Ground.....	(131)
§ 4.2 Calculation of Theoretical Seismograms of Seismic Waves Observed in Borehole and on Ground	(132)
§ 4.3 Calculation of Spectra of Seismic Waves Observed in Borehole and on Ground	(153)
§ 4.4 Comparative Theoretical Analyses of the Characteristics of Seismic Waves Observed in Borehole and on Ground	(155)
§ 4.5 Preliminary Theoretical Interpretation on the Characteris- tics of Seismic Waves Observed in Borehole	(165)

Chapter 5 Experimental Analyses of Seismic Waves Ob-	
served in Deep Boreholes	(168)
§ 5.1 Fundamental Idea	(168)
§ 5.2 Ultrasonic Indoor Experiments	(168)
§ 5.3 Observing Test in Field by Explosion	(174)
§ 5.4 Calculating Test for Wave Field	(176)
§ 5.5 Calibration Test for Soft Covering Strata	(178)
Chapter 6 Preliminary Applications of Seismic Waves Ob-	
served in Deep Boreholes	(180)
§ 6.1 Application of Seismic Waves Observed in Deep Boreholes in the Seismic Interpretation.....	(180)
§ 6.2 Application of Seismic Waves Observed in Deep Borehole in the Researches on the Features and Structures of Under- ground Media	(185)
§ 6.3 Application of Seismic Waves Observed in Deep Boreholes in Earthquake Prediction.....	(190)
§ 6.4 Application of Seismic Waves Observed in Deep Boreholes in Other Fields	(194)
§ 6.5 Observing Techniques in Deep Boreholes Related to Bore- hole Seismologic Observation and Their Comprehensive Applications	(195)
Appendix, Normalization of Seismologic Observations in	
Deep Boreholes (Suggested)	(197)
References	(202)

上 编 深井观测地震波典型记录

第一章 资 料 概 况

§ 1.1 选 用 台 站 概 况

本书主要选用我国北京、上海、山东、江苏、兰州、天津等地震台网的25个深井观测地震台的地方震与近震记录。这25个深井地震台的拾震器所处深度、仪器型号、记录方式以及观测的物理量等见表1.1。仪器属短周期型地震仪，固有周期 $0.8s^{(1)}$ 。各台的深井地震仪的频率特性基本相似，图1.1给出了天津静海、河北涿州（属北京台网）及山东菏泽等三个台的仪器频率特性曲线作为实例。此外，深井地震仪与地面地震仪的频率特性曲线也基本相似。例如，天津静海、宁河等地震台的地面记录使用DD-1型短周期地震仪（固有周期为 $1s$ ），其与深井地震仪的频率特性曲线的对比见图3.2。它们的固有周期只差 $0.2s$ ，频率特性曲线相似，深井地震仪的放大倍数比地面地震仪要高。

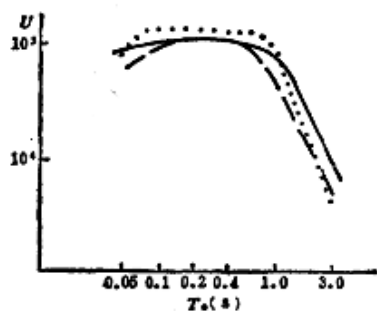


图1.1 静海（实线）、涿州（虚线）、菏泽（点线）三台的深井地震仪频率特性曲线

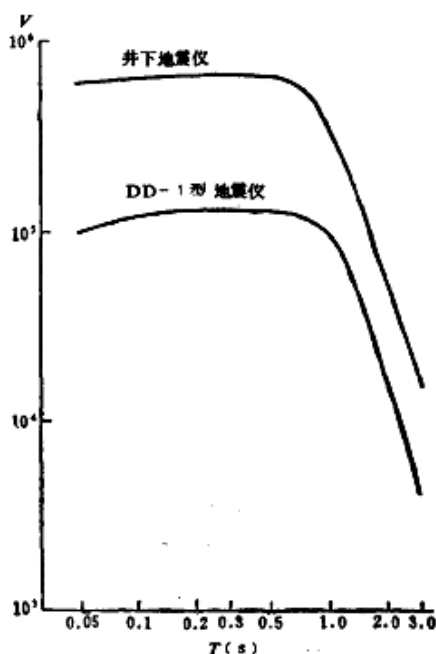


图1.2 静海、宁河等台深井地震仪和地面DD-1型地震仪频率特性曲线横坐标 T 为周期，纵坐标 V 为放大倍数

为对比起见，除选用单独的深井观测记录资料外，还选用了大量的井下与地面仪器在同一个台站同一时间内观测记录到的并列资料。多数台站采用常规的地动位移记录，但上海台网各台同时记录地动位移与速度，因而也可以对比同一次地震的位移记录与速度记录。

表1.1

选用地震台简况一览表

台网	地震台	拾震器深度 (m)	岩 性	拾震器 型 号	记录器 型 号	记 录 方 式	分 量	物 理 量
北 京 台 网	白家疃	257	砾石岩	SJ-1	768	传 输	垂 直	位 移
	马 坊	230	灰 岩	SJ-1	768	传 输	垂 直	位 移
	东三旗	250	灰 岩	SJ-1	768	传 输	垂 直	位 移
	大 兴	110	灰 岩	SJ-1	768	传 输	垂 直	位 移
	龙门庄	447	泥 岩	SJ-1	768	传 输	垂 直	位 移
	涿 州	320	粘 土	SJ-1	768	传 输	垂 直	位 移
	文 安	266	黄 土	SJ-1	768	传 输	垂 直	位 移
	霸 县	453	沙砾岩	SJ-1	768	传 输	垂 直	位 移
	雄 县	358	泥 岩	SJ-1	768	传 输	垂 直	位 移
上 海 台 网	台网中心	565	沉凝灰岩			传 输	垂 直	位移/速度
	凤 城	601	花 岗 岩			传 输	垂 直	位移/速度
	海 运	600	花岗岩			传 输	垂 直	位移/速度
	崇 明	575	花 岗 岩			传 输	垂 直	位移/速度
	虹 桥	651	灰质白云岩			传 输	垂 直	位移/速度
	南 汇	512	玄 武 岩			传 输	垂 直	位移/速度
	四 师	551	花 岗 岩			传 输	垂 直	位移/速度
山 东 台 网	荷 泽	396	砂 层	SJ-1	DJ-1	台站记录	三分量	位 移
	聊 城	370	粘 土	SJ-1	DJ-1	台站记录	三分量	位 移
江 苏 台 网	大 丰	346	粘 土	JS	DJ-1	台站记录/传输	三分量	位 移
	常 州	360	泥 岩	JS	DJ-1	台站记录	三分量	位 移
兰 州 台 网	天 水	377	糜棱岩	JS	768	传 输	三分量	位 移
	定 西	380	砂 岩	SJ-1/JS-2	768	传 输	三分量	位 移
天 津 台 网	静 海	371	黄 土	SJ-1	768	传 输	三分量	位 移
	武 清	450	黄 土	SJ-1	768	传 输	三分量	位 移
	芦 台	267	黄 土	SJ-1	768	传 输	三分量	位 移

为了开阔视野,本书还从文献中收集了少量苏联和美国井下与地面地震仪记录的典型地震图。苏联的资料取自塔吉克试验场阿拉木图电信传输台网的三个深井台(阿拉木图、阿里、新阿列克塞也夫斯卡娅)和两个地面台(塔尔伽尔、湖台),它们的坐标位置见表1.2;另外,还选用了阿拉木图东北约120km处的奇里克台的深井和地面记录。井下地震计的固有频率常取为1Hz;地面记录采用塔吉克综合地震考察队(KCЭ)的短周期仪器,如维开克型,固有频率为1Hz,另外还有CKM型中长周期地震仪,固有频率为0.6Hz,频带较宽。详细情况可参阅文献^[53]。美国的资料取自地震研究观测台(SRO)和简化的地震研究观测台(ASRO)所属阿布魁克、ANMO、ZOBO等台的地震记录^[40,38]。

以及西南太平洋海底钻孔地震仪和海底地震仪的记录^[31]。这些台都采用数字记录,输出的地震信号的频带区间可任意选择,放大倍数也可任意选择。SRO系统共有13个台,都是孔深100m的深井地震台。海底钻孔深度123.8m,钻孔处海底深度为5630m。拾震器都放在钻孔的底部,观测条件较好。

表1.2 苏联塔吉克试验场阿拉木图台网的台站简况

台 站 名	符 号	φ_n	λ_n	海拔高度 $h(m)$	拾震器深度 $H(m)$
塔尔加尔	T	43°14.25'	77°13.55'	1200	0
湖 台	O	43°04.25'	76°59.25'	2960	0
阿拉木图	A-A	43°17.23'	76°59.55'	800	1000; 2000; (960, ...)
阿 里	A	43°33.92'	77°02.13'	550	800
新阿列克塞也夫斯卡娅	H-A	43°23.58'	77°13.64'	770	1200

§ 1.2 选用地震概况

由于我国的深井地震仪目前均为短周期型,对远震波形有畸变,距离较近的大地震记录又经常限幅,故本书主要选用地方震和近震记录,即震中距为 $\angle \leq 10^\circ$,且多数地震的震中距 $\angle < 3^\circ$;而选入地震的震级一般都小于5级,少数较远的地震可达5—6级。震源深度一般为 $h < 30\text{km}$ 。地震的基本参数使用各区域台网提供的测定结果,时间服务系统为北京时间UT₁。除天然地震记录外,还选用了少量的爆破和矿山塌陷(塌矿)记录。表1.3.1及1.3.2给出本书选用的中国地震、爆破和矿山塌陷(塌矿)的目录,以便查阅。

表1.3.1 选用的地震目录(天然地震部分)

年	月	日	发震时间			震中位置			震级		震源深度 (km)	图 号
			时	分	秒	纬度	经度	地 点	M_L	M_S		
1968	3	25	19	01	15.2	35°18'	115°24'	山东菏泽	2.6		10	2.1.1
1985	10	12	14	52	13.3	35°18'	115°22'	山东泽荷	3.1		12	2.1.2
1985	6	12	09	45	32.0	35°17'	115°20'	山东菏泽	3.5		19	2.1.3
1984	12	6	10	53	50.1	31°11'	121°23'	上海川沙	2.6			2.1.4
1985	2	3	07	33	11.2	39°58'	116°15'	北京香山	0.9			2.1.5
1983	12	21	04	27	06.0	33°26'	120°37'	江苏大丰东北	2.6			2.1.6
1987	11	5	22	40	49.5	40°10'	117°12'	北京平谷东	2.7			2.1.7
1987	11	26	14	50	40.8	40°12'	117°12'	北京平谷东北	2.8		9	2.1.8
1987	3	17	09	11	51.9	39°58'	116°30'	北京东郊	2.0			2.1.9
1984	5	15	22	52	38.6	33°09'	120°34'	江苏大丰东南	2.7			2.1.10
1985	5	16	17	16	20.6	33°05'	120°35'	江苏大丰东南	3.6			2.1.11
1985	1	2	03	50	22.0	40°26'	116°35'	北京马道峪	2.3			2.1.12
1986	6	2	09	09	15.2	36°04'	116°27'	山东郛城	3.1		12	2.1.13
1986	5	21	20	05	27.8	31°50'	120°36'	江苏沙洲	3.4		15	2.1.14

续表

年	月	日	发震时间			震中位置			震级		震源深度 (km)	图号
			时	分	秒	纬度	经度	地点	M_L	M_S		
1986	1	4	01	33	07.0	34°19'	105°07'	甘肃礼县	3.2		11	2.1.15, 2.2.28
1986	9	17	07	39	21.9	36°45'	116°48'	山东齐河	3.3		30	2.1.16
1984	10	15	23	48	03.9	38°34'	116°05'	河北河间	3.6			2.1.17
1983	7	3	23	21	27.2	31°55'	120°46'	江苏沙洲	3.1		15	2.1.18, 2.2.4
1986	2	6	13	05	45.3	30°48'	121°45'	上海南汇海城	2.5			2.2.19
1987	7	16	02	16	27.9	39°46'	118°38'	河北滦县	4.8			2.1.20(a), 2.2.22
1987	8	29	14	08	08.5	39°51'	118°42'	河北滦县	3.3			2.1.20(b)
1987	5	16	19	18	12.6	30°58'	120°25'	江苏太湖	3.0			2.1.21
1986	12	27	14	48	07.0	35°45'	116°34'	山东宁阳	3.3			2.1.22
1987	8	2	07	24	43.4	32°38'	120°01'	江苏兴化	3.4		17	2.1.23
1985	3	29	07	02	46.6	34°06'	121°08'	北 黄 海	3.2			2.1.24
1986	5	15	03	50	54.6	35°13'	106°41'	甘肃华亭	3.2		19	2.1.25, 2.2.37
1987	5	22	11	50	42.6	40°00'	116°47'	北京东郊徐辛庄	4.0			2.1.26
1984	12	3	03	30	45.4	39°55'	117°08'	河北三河	3.2		31	2.2.1
1987	7	29	09	21	26.3	39°41'	118°19'	河北古冶	3.9			2.2.2
1985	3	26	23	06	08.2	38°52'	116°25'	河北文安	2.8			2.2.3
1986	8	8	18	35	34.1	37°20'	114°58'	河南南阳东	3.1			2.2.5, 2.2.30
1985	1	13	11	12	00.3	39°36'	117°46'	河北丰南	4.9			2.2.6
1984	5	21	23	27	48.2	32°29'	121°39'	南黄海勿南沙		5.3		2.2.7, 2.2.8, 2.2.24
1984	5	22	00	25	44.9	32°29'	121°41'	南黄海勿南沙	4.3			2.2.9, 2.2.10, 2.2.11
1984	6	8	05	14	51.0	32°31'	121°37'	南黄海勿南沙	4.0			2.2.12, 2.2.13, 2.2.14
1980	11	17	22	03	54.5	39°48'	118°30'	河北滦县	4.7		12	2.2.15
1986	12	16	07	25	56.5	37°16'	114°45'	河北邯郸	4.2		21	2.2.16
1985	4	8	10	40	03.0	32°38'	121°38'	南 黄 海	3.6			2.2.17
1985	7	19	08	16	57.6	32°31'	121°31'	南 黄 海	3.7			2.2.18
1986	1	11	17	54	35.0	37°26'	114°54'	河北巨鹿	4.1			2.2.91
1984	5	22	01	10	49.2	32°35'	121°37'	南 黄 海	3.7			2.2.20, 2.2.27
1985	4	22	02	48	10.3	38°57'	114°00'	河南安阳西南	2.9			2.2.21
1984	12	13	11	20	20.7	39°46'	118°18'	河北古冶	3.8		15	2.2.23
1985	4	13	12	03	26.0	32°25'	121°37'	南黄海勿南沙	2.9			2.2.25

续表

年	月	日	发震时间			震中位置			震级		震源深度 (km)	图号
			时	分	秒	纬度	经度	地点	M_L	M_S		
1984	11	23	01	51	12.1	38°57'	118°47'	渤海	4.7			2.2.26
1985	5	1	03	25	39.6	38°28'	116°33'	河北里坦	2.9			2.2.29
1987	3	21	07	00	21.9	38°15'	114°28'	河北黄壁庄	5.1			2.2.31, 2.3.1
1985	8	23	23	19	31.0	39°52'	118°48'	河北卢龙	4.0			2.2.32
1984	1	4	00	25	39.8	39°45'	118°46'	河北滦县	4.0		14	2.2.33
1985	5	30	23	58	02.1	32°31'	121°44'	黄 海	3.9			2.2.34
1984	5	22	02	51	46.7	32°32'	121°44'	黄 海	4.0			2.2.35
1985	1	29	14	08	16.6	40°33'	114°08'	山西天镇	2.0			2.2.36
1987	6	1	07	38	37.7	36°08'	102°38'	青海民和南	4.3		8	2.2.38, 2.4.2
1987	10	28	07	32	01.8	34°05'	105°42'	甘肃天水西南	4.1			2.2.39
1981	5	12	13	52	30.0	39°58'	118°46'	河北卢龙	3.9		13	2.2.40
1985	6	25	21	24	34.8	35°43'	117°40'	山东新泰南	4.1		15	2.2.41
1985	8	25	17	05	19.3	39°44'	116°26'	河北古冶	4.5			2.2.42
1985	12	21	16	51	05.1	37°50'	116°47'	河北南皮	3.8			2.2.43
1987	7	15	21	43	42.9	34°10'	102°38'	甘肃玛曲	3.8		1	2.3.2, 2.3.7
1984	9	25	04	20	48.7	31°37'	117°26'	安徽巢湖	4.2			2.3.3
1987	7	28	18	15	14.9	38°15'	119°30'	渤海	3.8			2.3.4
1984	11	27	09	54	19.0	40°28'	114°16'	山西天镇东北	4.9			2.3.5
1985	2	18	06	07	04.3	37°46'	115°14'	河北巨鹿	4.2			2.3.6
1986	10	2	04	44	35.2	33°24'	119°36'	江苏宝应	3.9			2.3.8
1987	10	17	02	51	07.5	42°55'	117°34'	内蒙古克什克腾旗	3.2			2.4.1
1986	5	20	02	46	08.4	35°24'	100°26'	甘肃同德西北	3.8			2.4.3
1987	10	11	09	48	35.2	37°46'	101°24'	青海门源西北	3.7			2.4.4, 2.4.13
1985	5	7	04	57	46.6	35°31'	111°15'	山西临汾南	4.1			2.4.5
1986	11	10	04	55	20.5	31.2	104.1	四川什邡	4.2			2.4.6, 2.4.10
1985	5	8	06	16	48.2	36°40'	118°26'	山东益都	3.7		15	2.4.7
1986	7	2	11	56	58.0	38°23'	120°29'	渤海庙岛西	4.6		16	2.4.8
1986	5	9	18	43	33.4	36°15'	110°22'	陕西宜昌北	4.1		16	2.4.9
1987	3	1	01	23	04.3	39°49'	106°30'	内蒙古海拉湾	4.0			2.4.11, 2.5.1
1984	4	6	12	02	05.3	37°48'	102°09'	甘肃九条岭	4.4			2.4.12
1986	8	7	03	55	13.8	28°9	100°8	四川稻城东	5.4			2.5.2
1985	11	30	22	38	24.0	37°2	114°8	河北任县		5.3		2.5.3
1987	8	10	20	12	15.8	38°1	106°5	宁夏灵武		5.1	15	2.5.4
1986	3	13	16	41	19.0	26°2	100°2	云南鹤庆	5.6			2.5.5

表1.3.2

选用的地震目录表(人工爆破与塌矿部分)

年	月	日	发震时间			震中位置			震级		图号
			时	分	秒	纬度	经度	地点	M_L	M_s	
1984	4	15	19	58	38.1			江苏大丰爆破	0.9		2.6.1
1983	7	2	17	00	01.2			上海江南造船厂水下爆破	炸药量 15kg		2.6.2
1987	3	31	10	09	10.5	39°56'	116°55'	北京门头沟塌矿	3.4		2.6.3
1985	11	25	12	00	27.6	33°56'	105°41'	甘肃成县爆破	炸药量 45kg		2.6.4
1985	12	30	12	00	26.3	33°56'	105°41'	甘肃成县爆破	炸药量 233kg		2.6.5, 2.6.6
1987	12	24	18	44	18.3	40°13'	113°00'	山西云岗西北爆破	3.4		2.6.7

第二章 深井观测地震波典型记录图 及其初步解释

本章给出深井观测地震波的一系列典型记录图,并对记录图中的主要震相及波形特征等作一些初步说明与解释。震相分析是参照文献^[2, 15, 22, 24, 26]并根据台站分析人员与作者的经验而作出的,它随震中距不同而有所不同,并伴有一定的地区性差异。如前所述,除井下地震记录外,还给出一些地面记录来进行对比分析。

典型记录主要按震中距 Δ 的范围进行分类,同时还把爆破和矿山塌陷以及国外的地震记录单独列类。这样,就分别列出以下7类地震记录图:

1. 中国地方震, $\Delta \leq 1^\circ$, 见图2.1.1—2.1.26;
2. 中国近震, $1^\circ < \Delta \leq 2^\circ$, 见图2.2.1—2.2.43;
3. 中国近震, $2^\circ < \Delta \leq 3^\circ$, 见图2.3.1—2.3.8;
4. 中国近震, $3^\circ < \Delta \leq 5^\circ$, 见图2.4.1—2.4.13;
5. 中国近震, $5^\circ < \Delta \leq 50$, 见图2.5.1—2.5.5;
6. 中国人工爆破与矿山塌陷, 见图2.6.1—2.6.7;
7. 国外地震与爆破, 见图2.7.1—2.7.10。

记录图中标示出的主要是地方震和近震的基本震相,即:

$\bar{P}$ 、 $\bar{S}$ ——地壳中的直达纵、横波;

P_n 、 S_n ——在莫霍界面形成的纵、横首波;

P_{11} 、 S_{11} ——在莫霍界面上反射的纵、横波。

地方震记录图上的主要震相是 $\bar{P}$ 、 $\bar{S}$ 。在中国东部地区,当 Δ 在 1° 到 1.6° 左右时,一般出现 $\bar{P}$ 、 P_{11} 、 $\bar{S}$ 、 S_{11} 四个主要震相;而在中国西部地区,由于地壳厚度达到50余公里,这四个主要震相可追踪到 $\Delta = 2^\circ$ 左右,此现象尤以西北地区最为明显^[15]。在更大的震中距上,主要震相一般是 P_n 、 $\bar{P}$ 、 S_n 、 $\bar{S}$ 。

除上述基本震相外,在某些情况下还可以分析识别出其他一些震相,如:

P^* 、 S^* ——在康拉德界面形成的纵、横首波, 见图2.2.4;

PS——在地壳内界面形成的近震折射转换波,其特征如文献^[10]所述, 见图2.1.10, 图2.2.30;

π_s 、 L_s ——地壳花岗岩层中的纵波型导波和横波型导波, 见图2.5.2及2.5.3;

PL——地壳中的漏能式面波, 见图2.5.2。