

LILUN YU YINGYONG DIQIU WULI LUNWENJI

理论与应用地球物理 论文集

李 宁 主编



石油工业出版社

内 容 提 要

本论文集收录了北京地球物理学会会员从1987—2007年20年间发表的部分具有代表性的论文,涵盖了地球物理基础理论,石油地球物理勘探,地热地球物理勘查,核资源地球物理勘查,水文、工程、环境地球物理勘探以及获奖论文等六大部分,从不同侧面反映了北京地球物理学会会员在理论与应用地球物理领域取得的成果与进展。收录的论文有些在北京市获奖,有些是某个新领域的代表作,还有一些是重大项目的核心内容。

本论文集适合地球物理专业的研究人员、工程技术人员和大专院校地球物理专业的高年级学生和研究生阅读,对研究地球物理学历史和进展的学者也是有价值的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

理论与应用地球物理论文集/李宁主编.

北京:石油工业出版社,2008.1

ISBN 978-7-5021-6454-6

I. 理…

II. 李…

III. 地球物理学-文集

IV. P3-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第002450号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:彩虹印刷有限公司

2008年1月第1版 2008年1月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:23

字数:590千字 印数:1—1000册

定价:80.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

北京地球物理学会

二十周年纪念

发展地球物理方法技术
服务北京城市经济建设

王光耀 二〇〇七年
十二月廿五日

《理论与应用地球物理论文集》

编 委 会

主 编：李 宁

副主编：乔德新 任国泰

编 委：冉伟彦 侯惠群 杨 进 狄帮让

张中杰 宁杰远 谢昭晖 郑晓东

韩绍阳 丁连靖 常 伟

前 言

北京地球物理学会（以下简称学会）成立于1987年，是北京市地球物理学界科技工作者自愿组成的群众性学术团体。学会致力于地球物理学基础理论与实际应用的研究，特别注重运用地球物理专业知识为北京市建设服务。学会设学术交流、科普宣传、科技咨询和社会服务四个委员会，经过20年的发展，现有理事单位24个，会员1400余人。20年来，在北京市科学技术协会的领导和中国地球物理学会的指导下，发挥北京地球物理学会人才荟萃和学科交叉的综合优势，以经济建设为中心，紧紧围绕地球物理学发展的前沿课题和北京市以及其他地区矿产资源勘探开发等方面遇到的实际问题，积极组织会员开展学术交流活动。20年来，学会坚持每年召开一次学术交流年会，对推动地球物理学的发展和矿产资源的开发作出了重要贡献；同时，还邀请多位中国科学院院士、中国工程院院士和著名科学家积极参加北京市科协组织的历届“北京科技周”科普宣传和“学术活动月”的学术交流活动，取得了良好的社会影响，多次获得北京市科学技术协会的表扬。20年来，北京地球物理学会两次被评为北京市先进学会和2006年全国省级“学会之星”称号。

为了庆祝北京地球物理学会成立20周年，常务理事会决定出版这本综合性论文集。论文集收录了北京地球物理学会会员从1987年到2007年20年间发表的部分有代表性的论文，涵盖了地球物理基础理论、石油地球物理勘探、地热地球物理勘查、核资源地球物理勘查和水文、工程、环境地球物理勘探等五大方面，从不同侧面反映了北京地球物理学会会员在理论与应用地球物理领域取得的重要成果与进展。同时还收编了近10年来北京地球物理学会青年会员获得的北京市青年优秀论文奖和科技建议奖两方面的论文。论文集涉及了五个地球物理学重要研究方面。

1. 地球物理基础理论

地球物理学首要的研究对象是人类赖以生存的地球本体，它是以地球内部的物质组成、物质性质、物质结构和动力学过程为研究对象的学科，其主要手段是基于地球物理理论研究成果和野外观测资料进行数值反演和相应的物理模拟。

地球物理学是地球科学的一个年轻分支，是第二次世界大战后才蓬勃发展起来的。这门分支学科本身就是一个交叉学科，主要是物理学和地质学的交叉，用物理学的方法来研究地球，既拓宽了地质学的研究范围，又使得地球科学的研究更加科学化、定量化，但这门学科同时又大量涉及数学、力学、计算理论和计算技术、各种高精度观测方法和技术、极端物理条件下的实验技术。所以，地球物理学是典型的交叉学科。20年来，随着地球物理观测技术、地球物理实验技术、计算技术以及中国经济的发展，中国地球物理进入了一个快速发展时期，大规模地布设地震台阵、大范围地布设GPS观测台站以及高性能计算设备的建设都是在这期间完成的。这个时期，中国地球物理研究论文的典型特点是由过去的消化吸收国外先进技术逐渐转为以科学问题为中心。其中，在反演技术方面都有了可喜的成绩，在区域结构研究方面也有了成功的尝试，而且研究领域不断扩大，为今后进一步发展奠定了良好的基础。

北京地球物理学会主要从事地球物理基础理论研究的会员单位是：中国科学院地质与地

球物理研究所、中国地震局地球物理研究所、中国地质科学院地质研究所、北京大学和中国地质大学（北京）。

2. 中国地球物理勘探

利用人工激发或自然产生的地球物理场来确定地下地质构造和矿藏的技术称为地球物理勘探技术。它包括地震勘探、地球物理测井、重力勘探、磁法勘探、电法勘探等方法，通常可分为野外测量、地球物理数据解释和解释三个阶段，首先用仪器在地面、或空中、或海洋、或井中测量地球物理场。例如，测量地球重力场、地磁场、地电场和地震波场；然后用计算机对测量的地球物理数据进行处理和分析，消除和压制各种干扰和噪声，提取有效信息；最后，结合地质、钻探资料，对研究对象进行解释和推断。用于寻找石油、天然气的地球物理勘探称为石油地球物理勘探，其应用最为广泛的方法是地震勘探和地球物理测井。

地震勘探是在地表或井中人工激发弹性波，在地表或井中接收来自地下地质体的散射波，包括反射波、折射波和绕射波等，利用计算机对接收的地震波进行处理和分析，确定地下地质构造，预测地下地质体的岩性、物性和含油气性，为油气圈闭评价提供基础。地震勘探的方法主要有两类：地震反射法和折射法。

地球物理测井（以下简称测井）是将探测仪器放入井中，利用连续或定点测量的方法，探测地层的电、声和放射性信号，以曲线或图像方式记录下来，利用计算机进行分析处理，确定地下储层的位置、有效厚度、渗透性和油气水性质，同时定量计算出储层孔隙度、含油饱和度等参数。测井的方法主要有三类：电法测井、声波测井和放射性测井。

石油地球物理勘探的发展可以追溯到 20 世纪初。在地震勘探方面，1914 年，Reginald A. Fessenden 在美国提出利用地震波进行勘探的第一个专利，Ludger Mintrop 在德国设计一种地震仪，其测量精度使得地震勘探成为可能。20 世纪 20 年代，主要是利用折射波进行盐丘勘探。20 世纪 50 年代，Harry Mayne 发明了共中心点（反射点）记录方法。20 世纪 60 年代，数字记录的发明奠定了以反射法为主体的现代地震勘探的基础。从 20 世纪 80 年代，开始了借助计算机进行地震资料交互处理和解释的新阶段。进入新世纪，高密度数字采集、微机集群、三维可视化和虚拟现实技术的应用，使地震采集、处理和解释技术正在孕育着新的革命。在测井方面，1927 年，法国 Schlumberger 兄弟发明了电法测井仪，测井从此诞生。1935 年，Schlumberger 又提出了单发双收声速测井仪专利。1942 年，Archie 提出了利用电阻率计算含油饱和度的公式，奠定了测井解释的基础。著名的地球物理学家翁文波先生是我国测井的创始人。1939 年 12 月 20 日，时任中央大学物理系教授的翁文波先生在玉门油田石油沟油矿 1 号井进行了我国首次电测井。目前，石油地球物理勘探从勘探领域向开发领域延伸，采集、处理和解释一体化趋势明显。地震采集从单分量向多分量、从三维向四维、从地面向井中发展；地震处理从时间域向深度域、地震偏移成像从叠后向叠前延伸；地震解释从叠后向叠前、从反演到多属性综合、从常规属性向分频属性、从构造勘探向岩性勘探延伸。高密度数字地震采集和处理，西部复杂推覆体构造成像，各种沉积背景、各类特殊岩性体的复杂储层预测正成为研究的热点。测井仪器经过半自动测井仪、全自动测井仪、数字测井仪、数控测井仪和成像测井仪五个发展阶段，目前已进入后成像时代，代表性仪器包括阵列感应、微电阻率扫描成像、偶极声波化学元素测井等。其特点是大阵列、全方位、多频率和集成化，正在解决非均质复杂储层的可视化定量解释问题。北京地球物理学会主要从事石油地球物理勘探研究的会员单位是：中国石油勘探开发研究院、中国科学院地质与地球物理研究所、中国石油大学（北京）、中国地质大学（北京）和北京大学。

3. 地热地球物理勘查

地热物探主要是通过物探方法进行地热勘查的前期工作,利用物探方法可以在确定地热勘查区内的地质构造、热储层及热储盖层等地热地质条件,并对地热井的定位和成井深度进行预测,从而减少地热勘查的成本,降低地热井开凿的风险。

目前,在地热勘探中应用的传统物探方法有重力勘探、磁法勘探、直流电阻率测深、人工地震勘探等,近几年引进了微动测深、可控源音频大地电磁测深(CSAMT)、大地电磁测深(MT)、连续(阵列)大地电磁测深剖面(DPEM)、大地电磁场岩性探测系列等新方法、新技术。这些物探方法的有效结合对可以互相弥补,从而得到更合理、更客观的推断结论。

北京地球物理学会主要从事地热地球物理勘查研究的会员单位是:北京市地质勘察技术院。

4. 核资源地球物理勘查

在我国核资源勘查领域,地球物理方法在深部地层结构的高效探测及隐伏铀矿化信息直接识别等领域的应用效果显著,在提高铀资源预测精度、缩短勘查周期等方面发挥了重要作用。尤其是近年来,一些地球物理新技术的开发应用,较好地解决了隐伏铀资源深部探测、定位问题,促进了我国天然铀资源储备的大幅度增加。如EH4电磁成像2D反演软件的开发应用成功地解释了沉积盆地深部地层结构高效探测问题;航空地球物理弱信息提取技术的开发应用在提取隐伏铀矿化的弱信息方面取得了较好的应用效果;车载全能谱信息挖掘技术在放射性成矿信息的快速识别上应用效果显著;基于GIS开发的砂岩型铀矿区域物化探数据处理系统为深部铀成矿信息提取及综合评价提供了计算机辅助决策系统软件;多参数综合测井仪的开发应用在砂岩型铀矿沉积环境识别、储量估算与评价等方面发挥了重要作用。

北京地球物理学会主要从事核资源地球物理勘查研究的会员单位是:中国核科技信息与经济研究院。

5. 水文、工程、环境地球物理勘探

地球物理是应用物理学的理论、方法与技术来研究地球、认识地球。地球物理可以应用其多种分支方法主动灵活地对目标体进行研究,以解决国民经济建设中出现的问题,如地下水资源的开发和利用、城乡发展的工程建设、环境的监测和保护以及各种自然灾害的监测与防治等。因此,地球物理在国民经济建设中发挥着重要的作用。

研究和解决水文、工程及环境问题的方法较多,与其他方法相比,地球物理学方法具有独特的优点,是其他方法无法替代的。这些优点具体表现在:

(1) 效率高、成本低。地球物理方法可以从地面遥测地下介质特征的三维变化,而无需大量的钻井或探槽,如探地雷达、微重力等。

(2) 适用范围广。除具有与其他监测方法同样的应用领域外,地球物理方法在海上、南北极地区等特殊区域研究中更具有独特的优势。

(3) 覆盖率大。通过钻孔和取样方法仅对点或线上的情况进行分析,而采用地球物理方法却能达到对研究区整个空间的覆盖研究。

(4) 无损检测。地球物理方法适用于对堤坝、核废料等不能钻井取样的情况下的各种问题的调查。

(5) 速度快。借助于计算机技术,地球物理测量数据的实时处理时间大大缩短。

随着国民经济建设的发展,城市人口密集,经济活动强烈,可用资源与和谐环境负荷沉重,大部分城市长期超速进行城镇建设,超强度开发利用资源,大量排放废气、废水、废

渣，导致资源破坏，环境恶化，同时产生和引发了一系列地下水、工程和环境等问题。由于这些问题具有危害性、潜在性、突发性、隐蔽性、社会性等特点，已引起世界各国的高度重视，我国政府对此也十分重视。目前，各研究机构正采用现代科学技术，多学科、跨部门联合攻关，解决发展中伴生的各种不良问题。在地下水资源的开发和利用、基础工程和大型工程建设及环境的监测和保护中，地球物理方法取得了突破性的进展，收到了良好的地质效果。

北京地球物理学会主要从事水文、工程、环境地球物理勘探研究的会员单位是：北京市勘察设计院、北京国电水利电力工程公司和中国地质大学（北京）。

总之，本论文集适合地球物理专业的研究人员、工程技术人员和大专院校地球物理专业的高年级学生和研究生阅读，对研究地球物理学历史和进展的学者也是有价值的参考资料。尽管编委会尽了最大努力，论文集也只是收录了学会会员 20 年间众多重要研究成果中的一部分。并且，由于受北京市范围内地球物理不同研究方向研究单位数量和研究人数量的限制，论文集中同一作者和同一单位可能出现了不止一次，也请读者谅解。

编 者

2007 年 12 月 13 日

目 录

地球物理基础理论

中国数字地震台网的接收函数及其非线性反演	刘启元 Rainer Kind 李顺成 (3)
1997 年中国西藏玛尼 $M_s 7.9$ 地震的时空破裂过程	许力生 陈运泰 (12)
松潘地块与西秦岭造山带的下地壳构造: 性质与关系——深地震反射剖面的揭露	高 锐 马永生 李秋生等 (24)
主地震定位法分析以及 1997 年新疆伽师强震群高精度定位	周仕勇 许忠淮 韩 京等 (33)
2002 年夏季长白山天池火山区的地震活动研究	吴建平 明跃红 张恒荣等 (43)
大别造山带上部地壳结构的有限差分层析成像	王椿镛 张先康 丁志峰等 (52)
新疆伽师强震群区三维地壳上地幔 S 波速度结构及其地震成因的探讨	刘启元 陈九辉 李顺成等 (58)
川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究	王椿镛 W. D. Mooney 王溪莉等 (68)
川滇地区速度结构的区域地震波形反演研究	吴建平 明跃红 王椿镛 (83)
对一类相变体积分数计算公式的修正	王曙光 叶国扬 宁杰远等 (92)

石油地球物理勘探

Zoeppritz 方程的近似式及其应用	郑晓东 (105)
地震偏移成像分辨率的定量分析	狄帮让 顾培成 (120)
一种利用核磁共振测井资料评价储层孔隙结构的新方法	刘忠华 周灿灿 刘国强 (127)
小波尺度域含气储层地震波衰减特征	李宏兵 赵文智 曹 宏等 (136)
弹性阻抗在岩性与流体预测中的潜力分析	甘利灯 赵邦六 杜文辉等 (145)
地震物理模型超声测试技术中的几个问题	魏建新 狄帮让 (152)
时移地震监测水驱前沿的方法和应用研究	石玉梅 姚逢昌 谢桂生 (162)

地热地球物理勘查

北京延庆地区地热开发对地质环境影响的分析	丁连靖 冉伟彦 周艳富 (175)
深部地热勘查方法在北京地区应用的探讨	徐光辉 余钦范 袁学诚 (181)
地热井前期勘探中应重视磁法勘探的应用	高宝忠 卢义媛 冉伟彦 (189)
大地电场岩性探测技术在北京地热勘查中的应用	柯柏林 丁连靖 冉伟彦等 (194)
奥运公园地区地热资源赋存状况分析论证	徐光辉 袁学诚 (200)
天然源面波频率—波数法的应用与研究	丁连靖 冉伟彦 (209)

核资源地球物理勘查

车载 γ 全能谱测量系统在砂岩型铀矿勘查中的应用研究

..... 韩绍阳 李必红 陆士立 (219)

基于 GIS 的砂岩型铀矿区域物化探数据处理系统开发

..... 柯 丹 侯惠群 韩绍阳 胡水清 (229)

HD-4002 型综合测井仪的研制 陆士立 袁 明 焦仓文等 (236)

砂岩型铀矿勘查中的 EH4 电磁成像技术应用研究..... 腰善丛 程纪星 王 飞 (243)

地震瑞利面波测深的主要问题讨论 徐贵来 (249)

鄂尔多斯盆地东胜式砂岩型铀矿综合找矿模型研究 韩绍阳 侯惠群 柯 丹 (256)

水文、工程、环境地球物理勘探

地下不同目标体的探地雷达图像特征研究 谢昭晖 (267)

城市地质灾害勘查中地球物理方法的应用效果 杨 进 武 炜 刘兆平 (273)

抽水蓄能电站工程地质勘查中工程物探对策 常 伟 钱世龙 (279)

可控源电磁法联合瞬变电磁法勘探及应用实例 邹桂高 刘金光 严良俊等 (286)

可控源音频大地电磁测深在北京水文地质勘查中的作用

..... 徐光辉 黄力军 刘瑞德 (298)

在隧道地质预报时陆地声呐法探查断层、溶洞的效果

..... 钟世航 孙宏志 王 荣等 (303)

环境地球物理学的现状与发展 程业勋 杨 进 赵章元 (312)

可控源音频大地电磁测深在北京城市地质调查中的应用

..... 黄力军 徐光辉 陆桂福 (320)

获奖论文及建议

关于在北京市城区扩大地热采暖的建议 冉伟彦 (327)

第四纪沉积物天然热释光测量勘查深部油气藏的方法原理及应用

..... 王南萍 王 平 程业勋等 (329)

某工程静载试验桩高应变测试结果分析 谢昭晖 (336)

利用模拟井研究用声波成像资料计算裂缝宽度问题 乔德新 李 宁 尉中良等 (341)

西昆仑造山带下岩石圈地幔速度结构 贺日政 赵大鹏 高 锐等 (348)

地球物理基础理论

入选理由：本文与国际同类研究同步（Kind 等，1995），首次利用接收函数方法研究了中国数字地震台网各台站下方 100 km 深度范围内的地壳上地幔结构，被国内外重要学术刊物广泛引证（被他人引证 34 次）。

中国数字地震台网的接收函数及其非线性反演

刘启元¹ Rainer Kind² 李顺成¹

(1. 国家地震局地质研究所；2. GeoForschungs Zentrum, Germany)

摘要：利用中国数字台网（CDSN）记录的 85 个远震事件的宽频带 P 波波形数据和分离接收函数的最大或然性反褶积方法，获得了 CDSN 台网 10 个台站不同方位的岩石层接收函数。利用这些台站不同方位的平均接收函数和非线性接收函数反演方法，获得了上述各台站下方 100 km 深度范围内的岩石层 S 波速度结构。结果表明，CDSN 台网各台站下方的地壳厚度和岩石层速度结构存在明显的差别。其中，拉萨台下方的地壳厚度为 66 km，地震与地幔之间的界面较模糊，而余山台下方的地壳厚度为 34 km，地震与地幔之间的界面两侧速度反差明显。利用本文方法估计的地壳厚度与已有的结果基本一致。由于 CDSN 台网覆盖了中国大陆的各主要构造单元，本文的结果为研究中国大陆的岩石层 S 波速度结构及其横向变化提供了新的证据。

关键词：中国数字地震台网 接收函数反演 岩石层速度结构

0 引言

中国大陆地处欧亚板块的东南部。由于太平洋板块及印度板块的挤压、碰撞作用，中国大陆产生了明显的构造变形，形成了十分复杂和独具特色的构造环境，这使中国大陆的岩石层动力学研究在全球大陆动力学研究中具有十分重要的地位。

大陆岩石层速度结构及其非均匀性的研究是大陆岩石层动力学研究的重要基础。以往通常采用的探测技术主要是人工震源的折射和反射方法以及天然地震体波走时成像、面波频散和波形反演方法。这些方法在中国大陆的岩石层结构及介质参数研究方面已取得了一系列重要成果，使人们对中国大陆岩石层结构有了基本的了解。但是，这些结果在探测深度或空间分辨率上尚不能满足岩石层动力学研究的需要。

随着宽频带地震观测技术的发展，利用天然地震体波及面波的宽频带波形数据研究地壳、上地幔速度结构已成为人们所关注的热点。例如，Beckers 等利用 CDSN 台网记录的区域地震宽频带 P 波和 PP 波形的拟合研究了沿不同传播路径中国大陆地壳上地幔平均 P 波速度差异。另外，Owens 等发展的利用宽频带远震 P 波波形数据的接收函数反演方法，在研究地壳、上地幔速度结构方面也获得了诸多应用。Kind 等则利用接收函数反演方法系统地研究了德国区域台网的远震接收函数，获得了该台网下方地壳的 S 波速度结构。

人工震源的折射和反射方法观测的主要是频率为若干赫兹的爆炸地震信号；天然地震面

波的方法则主要是研究几十秒的地震面波信号。远震接收函数反演则正好是它们的补充。与模拟完整 P 波波形方法相比,接收函数反演方法的优点在于避免了对震源及其邻近区域混响效应的模拟;另一方面,由于宽频带远震 P 波包含了短周期的高频分量,且在接收区有较小的人射角,利用接收函数反演方法研究地壳、上地幔速度结构时,可以获得较高的垂向和横向分辨率。

近年来,CDSN 台网已积累了大量高质量、宽频带地震波形数据,这为利用接收函数方法研究中国大陆的地壳、上地幔速度结构提供了机会。本文的目的在于利用 CDSN 台网 10 个台记录的宽频带远震 P 波波形数据获得各台站的接收函数,并利用接收函数反演方法给出台站下方岩石层的 S 波速度结构。

1 接收函数反演

所谓接收函数是指接收区介质对入射远震 P 波的脉冲响应。Langston 最早提出了利用等效震源假定从远震长周期 P 波波形数据分离接收函数水平分量的方法。Owens 等把这一方法进一步扩展到了宽频带记录的情况,并发展了利用离散线性反演理论的接收函数反演方法。由于远震 P 波在接收区的人射角不大(20°左右),只要界面的倾斜不十分明显(比如,倾角小于 15°),就可以利用横向均匀分层模型的波形反演实现接收函数的波形拟合。其反演结果则是接收台站下方地壳、上地幔的 S 波速度结构。

接收函数估计所依据的等效震源假定只有在接收区介质足够光滑的情况下才是正确的。特别是对于宽频带记录的情况,当接收区介质上部存在明显间断面时,接收函数的垂直分量不能简单地看成 δ 函数,远震 P 波的垂直分量也不能简单地假定为震源及其邻近区域的混响效应。另一方面,合成地震图的检验已证明接收函数径向分量的反演是不唯一的,反演的结果依赖初始模型的选择。这是因为接收函数的径向分量仅反映传播介质的相对信息,而不包含其绝对信息。

为此,刘启元等发展了接收函数复谱比的非线性反演方法。在该方法中,接收函数复谱比估计不是由单个事件而是由多个事件组成的事件阵的三分量远震 P 波波形数据分离出来的。这是因为在复谱域中,对于由大体上位于同一地点的 n 个远震组成的事件阵,若假定台站接收函数的三个分量相互独立,那么第 k 个远震事件 P 波的第 l 分量的复谱可以表示成线性模型:

$$Y_{lk}(\omega) = X_k(\omega)R_l(\omega) + N_{lk}(\omega) \quad (1)$$

这里, $k=1, 2, \dots, n$; $l=1, 2, 3$; $X_k(k=1, 2, \dots, n)$ 和 $R_l(l=1, 2, 3)$ 分别为震源因子和接收因子, N_{lk} 为第 k 个事件在第 l 分量的噪声。在谱域中,震源因子定义为震源时间函数,是震源区附近的混响效应及仪器响应谱的乘积。利用 Shumway 和 Der 的多道最大或然性反褶积算法则可以根据式 (1) 给出接收函数径向与垂向分量复谱比的最大或然性估计,同时还可得到时间域接收函数垂向和径向分量的初至振幅比。相对于其他接收函数的估计方法,利用上述方法给出的结果具有更高的信噪比和分辨率。

接收函数复谱比的反演采用了 Tarantola 的非线性波形反演理论。据此,在复谱域中构造的目标函数为:

$$s(m) = \frac{1}{2} \{ [g(m) - d]^* C_D^{-1} [g(m) - d] + (m - m_p)^T C_M^{-1} (m - m_p) \} \quad (2)$$

这里, $g(m)$ 和 d 分别为理论和观测的数据矢量, 它们的分量相应于不同频率的接收函数复谱比。 m 为模型参数矢量。角标 p 表示其先验估计。 C_D 和 C_M 分别为数据和模型的协方差矩阵。 $*$ 表示复共轭, T 表示转置。

目标函数的优化采用了具有预条件算子的共轭梯度法; 接收函数复谱比的正演计算采用了反射率法。反演方法中还同时引入了时间域接收函数垂向与径向分量的初至振幅比。对于确定的慢度值来说, 它是一个仅依赖于地表附近介质绝对参数的量。数值检验的结果证明, 接收函数复谱比反演的结果与初始模型的选择无关, 克服了以往接收函数反演方法在这方面的困难。

另外, 由于非线性波形反演方法不要求充分接近“真实”的初始模型, 接收函数复谱比的非线性反演方法不要求根据其他独立观测结果来估计初始模型。这个方法已用于利用宽频带流动地震台阵的远震 P 波波形数据研究地壳、上地幔的精细速度结构, 这个方法也将用于给出本文的结果。

2 数据

为获得本文结果, 所用的数据是 CDSN 台网 10 个台站的三分量宽频带远震 P 波记录。这些台站分别为北京 (BJI)、恩施 (ENH)、海拉尔 (HIA)、昆明 (KMI)、兰州 (LZH)、拉萨 (LSA)、牡丹江 (MDJ)、琼中 (QIZ)、余山 (SSE) 和乌鲁木齐 (WMQ)。图 1 给出了各台站的位置及其分布以及由重力反演得到的中国大陆地壳厚度及其分布。

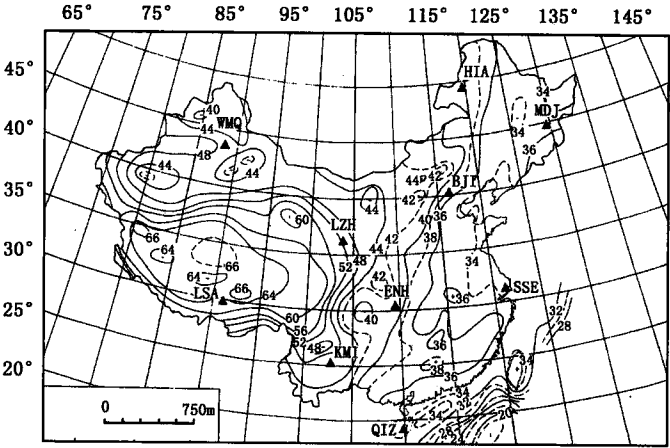


图 1 CDSN 台网各台站的位置及其分布

▲表示台站, 实线为地壳等厚线, 虚线为推测的结果, 数字表示相应的地壳厚度, 单位为 km

由前述可知, 为了获得各台站的接收函数, 首先需要根据震中位置对远震事件进行分组, 形成相应的事件阵。规定每个事件阵的孔径不超过 150 km。根据每个事件阵的三分量远震 P 波波形数据, 可以得到相应方位的接收函数复谱比, 变换到时间域即为相应的接收函数。

由于实际介质可能存在某种横向变化, 而本文计算接收函数复谱比的正演方法采用的是横向均匀分层模型, 进一步压制可能存在的横向非均匀散射效应是必要的。合成地震图模拟的结果表明, 当震中距 Δ 变化不大时 ($\Delta < 20^\circ$), 横向均匀分层介质模型的远震接收函数随

震中距的变化并不明显。因此，通过平均震中距变化不大的不同方位接收函数，可以压制可能存在的横向非均匀散射效应。这样，本文反演的将不是某个方位的接收函数，而是不同方位接收函数的平均结果。

图 2 给出了根据远震事件得到的 CDSN 台网各台站远震事件阵的方位分布。由图 2 可见，对于单个台站来说，各远震事件阵的方位不同，但它们的震中距变化并不大($\Delta < 10^\circ$)。

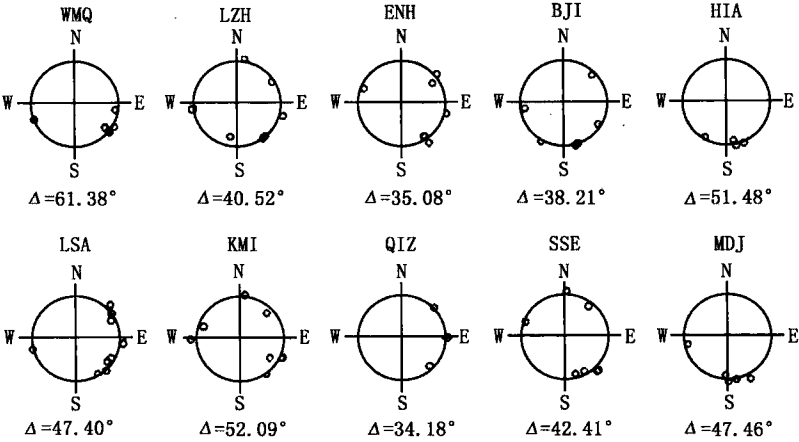


图 2 CDSN 台网各台站远震事件阵的方位分布
 Δ 为相应台站各事件阵的平均震中距

作为一个例子，图 3 给出了 BJI 台不同方位的接收函数，它们是把不同方位接收函数复谱比变换到时间域的结果。由图 3 可见，对于大体相同的方位角，相应的接收函数有近似相同的波形特征，但随着方位的改变，相应的接收函数也发生变化。这表明，台站下方的地壳介质可能存在某种横向的非均匀变化。

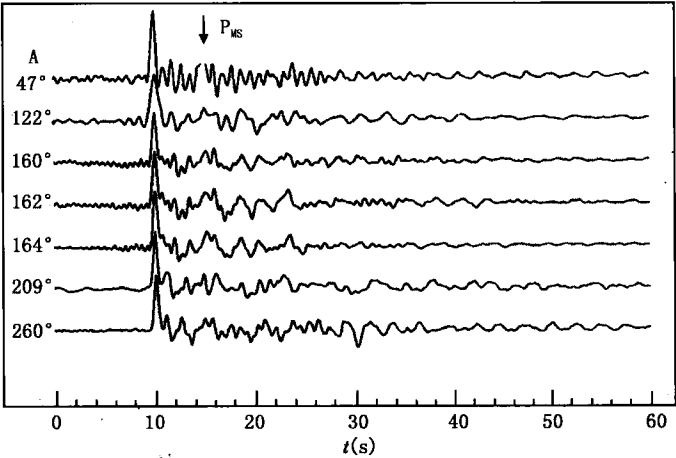


图 3 CDSN 台网的 BJI 台接收函数随方位角的变化
 这里给出的是相对各自垂直分量归一的结果，
 A 表示方位角， P_{MS} 表示在莫霍界面的 PS 转换震相

3 反演结果

下面将给出 CDSN 台网各台站的平均接收函数及其非线性复谱比反演的结果。反演所用的上地壳初始模型的 P 波速度 (v_p) 为 6.0 km/s, 而下地壳初始模型的 P 波速度为 $v_p = 7.0$ km/s。相应的 S 波速度 (v_s) 根据公式 $v_s = v_p / \sqrt{3}$ 给出。相应的密度则根据公式 $\rho = 0.32v_p + 0.77$ 给出。反演所用的上地幔初始模型为 PREM 模型。令 $K = v_p / v_s$, 反演中地壳内取 $K = 1.732$, 地幔中取 $K = 1.80$ 。规定当 $v_s > 4.44$ km/s 时, 相应的最小深度为壳幔边界 (莫霍面) 的位置。事实上, 由于远震接收函数的径向分量所包含的主要是地壳、上地幔中各界面上的 PS 转换波和横波类的多次反射波, 它对介质的 P 波速度和密度模型参数并不敏感。上述参数的选择主要是依据以往有关地壳、上地幔模型研究的一般结果。

利用接收函数中 PS 转换震相的分析, 可以估计初始地壳模型的厚度及其地壳内可能存在的明显间断面, 从而有助于加速反演的收敛。界面的厚度 (h) 可以近似地用公式 $h = v_p \cdot \Delta t_{ps} / (K - 1)$ 确定。这里, Δt_{ps} 为 PS 转换波相对于直达 P 波的到时差。

图 4 给出了 WMQ、LZH、LSA 和 KMI 4 个台不同方位的平均接收函数及其波形拟合的结果。由图 1 可知, 这 4 个台分布在中国大陆的西部。由接收函数反演得到的这 4 个台站下方 100 km 深度范围内的地壳上地幔 S 波速度结构如图 5 所示。

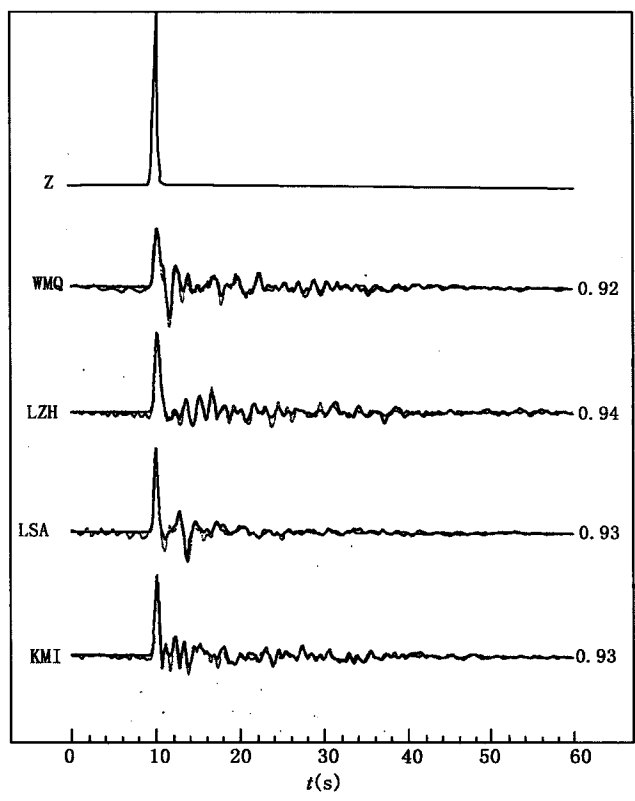


图 4 CDSN 台网的 WMQ、LZH、LSA、KMI 台的不同方位平均接收函数及其波形拟合的结果
虚线为观测数据, 实线为预测的结果, Z 表示垂直分量, 右边数字为相关系数, 下同