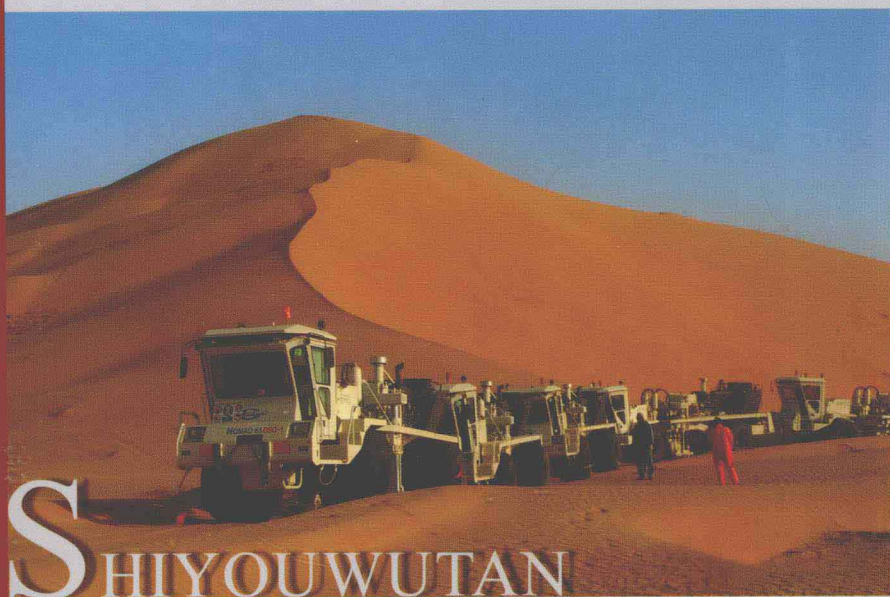


国内外石油技术进展 (十一五)

石油物探

张绍东 等主编



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

国内外石油技术进展(十一五)

—石油物探

张绍东 等主编



中国石化出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

国内外石油技术进展. “十一五”石油物探/张绍东
主编. —北京: 中国石化出版社, 2012. 7
ISBN 978-7-5114-1537-0

I. ①国… II. ①张… III. ①石油开采-世界-
文集 IV. ①TE35-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 125757 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何
形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

河北天普润印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 19 印张 480 千字
2012 年 7 月第 1 版 2012 年 7 月第 1 次印刷
定价: 85.00 元

前 言

《国内外石油技术进展(十一五)》是在对“十一五”期间国内外石油专业技术研究动态、前沿技术以及发展趋势进行了系统性地跟踪调研,并结合国内油田勘探开发的难点、热点问题进行分析的基础上总结编写的一部反映国内外石油技术现状和进展的图书。本套图书以国内外六大石油技术系列为主,有所侧重地介绍了“十一五”期间石油物探、石油地质、石油测井、石油钻井、采油工程、地面工程等专业的技术现状和发展趋势。

本套图书分为《国内外石油技术进展(十一五)-石油物探》、《国内外石油技术进展(十一五)-地质与开发》、《国内外石油技术进展(十一五)-钻井与测井》、《国内外石油技术进展(十一五)-采油工程》、《国内外石油技术进展(十一五)-地面工程》五册。

本套图书涉及面广,技术内容丰富。希望能为油田企业今后的科技工作和生产发展提供参考依据,为广大石油科技工作者及高校师生了解和掌握最新石油技术和动态提供借鉴和参考。

出版本套图书的目的是希望通过交流学习,实现信息共享、资源共享、成果共享,从而有效避免重复研究,提高研究起点,整体提升我国石油勘探开发技术水平。石油开采技术日新月异,书中涉及内容及观点或许有不当之处,敬请广大科技工作者提出宝贵意见。

目 录

第一章 表层结构综合调查技术	(1)
一、不同表层结构调查技术的特点	(1)
二、表层结构综合调查技术实例	(6)
三、表层结构综合调查技术发展趋势及建议	(12)
第二章 地震勘探炸药震源激发技术及应用	(14)
一、炸药爆炸能量研究	(14)
二、地震勘探炸药震源激发条件及其影响因素分析	(17)
三、新型炸药震源的研究	(25)
四、炸药震源勘探实例	(39)
五、炸药震源的发展趋势及建议	(48)
第三章 宽方位地震勘探	(49)
一、宽方位地震勘探的理论分析	(49)
二、国内外发展现状	(49)
三、宽方位地震采集技术	(50)
四、宽方位角地震资料处理	(54)
五、宽方位角地震资料解释及应用实例分析	(60)
六、宽方位角勘探实例分析	(69)
七、宽方位角勘探的优缺点总结及展望	(93)
第四章 OBC 双检地震采集技术	(95)
一、OBC 双检地震采集技术的基本原理	(95)
二、OBC 地震采集作业二次定位系统	(102)
三、多波多分量 OBC 地震采集技术	(114)
四、OBC 技术现状及发展趋势	(133)
第五章 RVSP 地震勘探技术	(141)
一、概述	(141)
二、RVSP 采集设备	(142)
三、随钻地震技术(RVSP)	(145)
四、3D RVSP 资料采集及处理	(154)
第六章 被动地震油藏监测技术	(161)
一、被动地震油藏监测技术	(161)
二、被动地震油藏监测技术现状	(168)
三、被动地震油藏监测技术新进展	(171)
第七章 超万道地震采集技术	(182)
一、超万道地震采集技术现状	(182)

二、超万道地震采集技术新进展	(183)
三、结论与建议	(198)
第八章 特殊地质条件下地震采集技术	(201)
一、压裂裂缝地震采集技术	(201)
二、逆冲推覆带地震采集技术	(211)
三、火成岩地震采集技术	(217)
四、深海地震采集技术	(225)
第九章 多次波去除	(235)
一、散射理论的发展及应用	(235)
二、基于 Curvelet 变换的多次波去除	(244)
第十章 地震波形反演技术	(248)
一、波形反演方法的分类	(248)
二、波形反演的求解方法	(249)
三、实现波形反演的优化方法	(251)
四、波形反演的应用	(252)
第十一章 地震正演模拟的方法及应用	(257)
一、正演模拟方法	(257)
二、正演模拟的应用	(258)
第十二章 时移地震技术	(264)
一、概述	(264)
二、国内外现状	(264)
三、非一致性地震资料处理技术	(264)
四、时移地震的监测及应用实例	(267)
第十三章 地震沉积学新技术	(275)
一、地震沉积学的演化历程及定义	(275)
二、地震沉积学的研究内容和思路	(278)
三、国内外地震沉积学的初步应用及实例分析	(282)
第十四章 地震勘探仪器设备	(286)
一、微型一体化三分量地震仪	(286)
二、三分量检波器	(288)
三、I/ O System Four TM 地震仪	(291)
四、三分量数字检波器 DSU3	(293)
五、三分量数字检波器应用效果	(295)

第一章 表层结构综合调查技术

表层结构调查是一项基础而非常重要的工作。在地震勘探中合理地选择激发井深是获得地震采集资料的基础与关键,通过近地表调查技术的合理应用可较高精度地确定表层结构,不仅为选择激发岩性和激发深度提供了可靠的依据,而且为地震数据的静校正处理提供精确的资料,同时,还可以参考横向不均匀性确定次生干扰以及激发匹配和接收耦合的特性。

表层结构调查方法主要是在横向上以点和线两种方式进行,现有的调查方法多是针对某一点进行的,如钻井取心、浅层折射法、微测井及双井微测井等,而考虑到地表起伏及施工难度等方面,针对线的表层调查方法现今很少大规模运用。此类方法包括:陆地声纳、地质雷达、约束层析反演等。还有一种比较直观的方法,就是在西部地区硬戈壁和山地等岩石出露的地区利用人工踏勘,观察岩石露头,可以直接了解该区的表层整体情况。

一、不同表层结构调查技术的特点

1. 表层取心

利用特殊的钻头,通过钻取近地表的“岩心”确定表层的岩性和不同岩性的厚度和埋深。该方法能非常准确的获得一个点的表层资料,是表层调查中作为点调查的最直接的一种方法。

2. 双井微测井技术

双井微测井就是在一定的距离内钻2口打穿低、降速带的井,2井间的距离一般为4m,如果表层低、降速带内含有流砂层,则应适当地加大2井之间的距离,以保证2井间的原始地层不会被破坏。一口井内布设激发点,另一口井布设检波器。另外,在激发井井口附近布设地面检波器(图1-1)。地面和地下接收用的检波器型号相同,用10Hz或40Hz的单只检波器均可以。地面接收一般采用6~23道,每道一个检波器,检波器呈扇形或直角形,井检距一般采用1~4m。激发系统由电缆、雷管及引线构成,把雷管固定在专用微测井电缆上的指定位置,一次性下入井中,由深至浅逐点激发。井中激发点的间距要考虑到介质的速度、厚度、检波器的灵敏度、仪器的采样间隔和动态范围等,激发点的间距过大会造成控制点数减少甚至丢层,反之,冗余的采样会造成浪费。接收井井下检波器深度和最深的激发点相同。

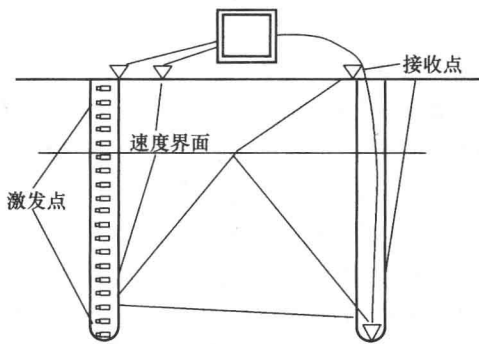


图1-1 双井微测井原理图

在表层结构调查中双井微测井方法较常规微测井方法精度高、效果好。双井微测井提供的各种资料,分别从不同侧面反映了地下的实际情况。将双井微测井地面接收的资料、井下检波器接收的资料及波动力学分析资料综合在一起,能够更准确地分析地下最佳激发深度情况,更有效地指导野外生产,不仅能够保证野外采集的质量,还大大地提高了野外施工速度,减少废

炮。双井微测井技术更能满足高分辨率地震勘探的需要，对隐蔽性油藏和高陡构造的勘探具有重要的意义。

3. 三分量微测井技术调查表层纵横波速度

三分量微测井资料的处理流程如图 1-2 所示。

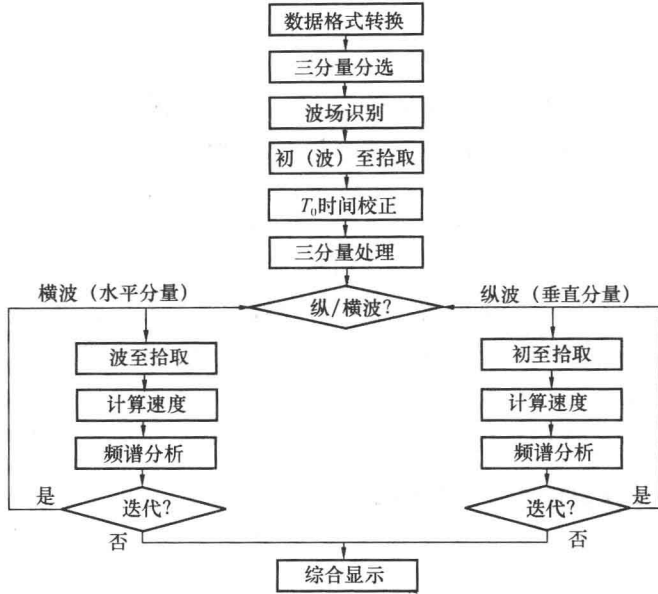


图 1-2 三分量微测井资料的处理流程

在前人基础上，李桂花(2006)用 X 、 Y 、 Z 三个分量同时接收纵波和横波，并利用地震波的运动学和动力学特点来研究表层纵、横波速度的变化和岩性分层，还比较了地面激发、井下接收和井下激发、地面接收以及锤击激发和炸药激发的优缺点。得到如下一些基本结论：

① 地面横向锤击枕木激发、井下三分量检波器接收到易于拾取的 SH 型横波，并且成本较低，易于实现，是一种可行的调查浅层横波速度变化的方法。

② 地面炸药激发，井下三分量检波器接收可接收到清楚的纵波初至，但难以识别可靠的横波波至。要想从这种记录上观测到来自井底以下的上行反射波，激发能量需要加大，但浅层通常比较复杂，对井底以下的上行反射波处理和解释难度也较大。

③ 地下不同深度激发、地面三分量检波器接收，除能观测到清楚的纵波初至外，其水平分量往往也可以接收到清楚的横波波至，并且水平分量上波的动力学特征明显，可以清楚地指示出横波速度分层的位置。除此之外，在地下激发、地面接收时，在地面还可多放置几个检波器，通过多点观测数据的平均值来减少随机误差，提高观测值的精度。单井观测与双井微测井观测相比，后者的资料更加丰富，例如可用于确定潜水面位置，但单井观测的优点是用一口井，成本低，易于实现。

④ 由于横波速度变化较大，在表层变化剧烈地区，三分量微测井或横波微测井井点的密度可适当加大。

⑤ 为了有效地进行多波多分量勘探，做好横波静校正、准确调查浅层横波速度变化显然是至关重要的。但是改善横波激发条件，调查浅层的横波转换界面的位置对于横波资料的采集和处理也非常重要。因此适当加大微测井的井深，适当增加井下激发能量，或者采用其

他的横波震源,采用多级检波器可能会得到更有用的资料。

4. 三分量小折射表层调查

该方法使用小折射仪在野外对表层进行调查,通过直达波和折射波时距曲线计算出近地表各层的厚度和埋深。折射排列形式随试验获得的低速层厚度和速度的不同而变化,一般分为单向激发和双向激发。排列长度和道间距的选择,以必须保证低速带的直达波及高速层折射波都能记录到为原则。浅层折射法使用简单,成本低,是一种常用的表层结构调查方法。

近年来,国内勘探地球物理界进行了大量的三分量微测井技术的研究,其中包括利用横波微测井技术进行表层调查,但三分量小折射表层调查开展的较少,相应的研究成果也不多。一般来说,横波速度低,横向变化大,即使在表层比较平坦的区域,也存在静校正问题,因此在利用小折射进行横波表层调查时,要求表层调查点较纵波表层调查时密,道距小。三分量小折射表层调查的核心内容是横波震源激发和横波资料解释,如何利用 X 、 Y 、 Z 三个分量资料识别和分离不同偏振特性的波(如 P 波、 SV 波、 SH 波)是难点。

5. 陆地声纳法

陆地声纳法基本原理与地震勘探相同,实际上就是近于自激自收的一种近地表调查的地震方法,通过调查可以得到频带较宽($0 \sim 1000\text{Hz}$)的近地表地震剖面,该方法使用方便,通过剖面的解释,能比较清晰地反映地下介质的分布状态。

6. 约束层析反演

约束层析反演采用有限差分法计算通过速度模型的初至旅行时的射线路径,然后引入先验地质信息和正则约束条件,用约束最小二乘正交分解法($CL\ SQR$)进行走时反演,获得近地表速度结构。

7. 地质雷达法

地质雷达向地下介质发射一定强度的高频电磁脉冲(几十兆赫兹至上千兆赫兹),电磁脉冲遇到不同电性介质的分界面时即产生反射或散射,地质雷达接收并记录这些信号,再通过进一步的信号处理和解释即可了解地下介质的情况。对于空气与探测介质间的阻抗差而言,电磁波远远小于声波。

地质雷达反射信号的振幅与反射系数成正比,在以位移电流为主的低损耗介质中,反射系数可表示为:

$$\gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (1-1)$$

式中 ϵ_1 、 ϵ_2 分别为上下介质的相对介电常数,对近地表检测而言, ϵ_1 为低速层的相对介电常数, ϵ_2 为降速层的相对介电常数。

由上式可知,反射信号的强度主要取决于上下介质的电性差,电性差越大,反射信号越强。对低降速层与高速层而言,它们之间存在明显的电性差,可以预期低、降速层底会有强反射出现。不同地层(上、中、下)之间所用材料也存在细微差别,因此,也可以得到较弱的反射信息。

地质雷达检测层面厚度的关键在于精度,而提高精度的关键在于高精度的自动层位拾取和准确的波速提取。雷达波的穿透深度主要取决于地下介质的电性和波的频率。导电率越高,穿透深度越小;频率越高,穿透深度越小,反之亦然。在西部地区准噶尔盆地,由于沙漠地区表层质地疏松、含水量较大,其导电率高于由干燥浮土构成的农田地区表层的导电率,因此,相同频率的雷达波在农田地区表层中的穿透能力大于在沙漠地区表层中的穿透

能力。

地质雷达信号的处理和解释在方法上与众所周知的反射地震法大体相同，只是它所涉及的波形和物性不同。前者为高频电磁波和物质的电磁特性，后者为弹性波和物质的弹性特性。地质雷达在数据处理和解释方面大量借鉴了反射地震中成熟的方法。

8. 电阻率法在近地表速度调查中的应用

在按线测量的方式中，高频电磁法已被证明是一种有效的普查方法，具有以下三个特点：

- ① 具有一定的勘探精度；
- ② 具有一定的勘探深度；
- ③ 轻便，能适应不同的地表条件，特别是山地。

利用高频电阻率法进行近地表调查主要希望实现两个目标：一方面是进行近地表结构调查，另一方面是进行低降速带速度调查。在复杂地区地震静校正时，由于受地震微测井或小折射控制点数量的限制，加之相邻控制点之间的岩性变化，深度、速度关系差异较大，建立地表及近地表速度—深度模型较困难。所以利用电阻率法来调查地表岩性的变化是一种非常有效的近地表调查方法。谭绍泉等利用地质雷达在不同界面的电性差来识别岩性变化特征，快速、准确地查明了某区表层结构，确定了岩性。成爱民等在新疆准噶尔盆地对地质雷达等近地表调查方式进行了综合应用和分析，发现潜水面在地质雷达彩色及波形记录都有明显显示，认为地质雷达的勘探结果可以满足地震勘探的需要并获得较好精度。

利用电阻率法进行速度成像由于受到较多限制，很多问题没有得到解决，应用较少。该方法的基础是地层速度与其电性及埋藏深度之间的关系。例如单纯利用 Faust 公式建立电阻率与速度的关系，进行工区表层速度分析得到的结果较差。为此必须对 Faust 公式本身进行分析改进。同时还须考虑除岩性外，其他因素（如含水性、地表岩石的松散程度等）对电阻率的变化起到的作用。在 Faust 公式 $v \approx k\rho^\alpha H^\beta$ 中，速度与电阻率 ρ 、深度 H 之间呈指数关系，其中： k 为比例系数， α 、 β 为相关系数。而在电法勘探中，一般情况下，电阻率以对数形式随深度变化。我们试图直接分析速度 v 与 $v \approx k\rho^\alpha H^\beta$ 之间的关系。以 $(\lg \rho) \times (H^\beta)$ 为横坐标，以 v 为纵坐标。 β 值的确定可通过试验获得。图 1-3 是砂岩段速度、深度、电阻率关系。当取不同值时得到的关系如图 1-3(a) ~ 图 1-3(c) 所示。从图中可以看到，图 1-3(a) 中离散点相关性较小，如果采用这种关系进行速度成像，必定会使成像精度降低。图

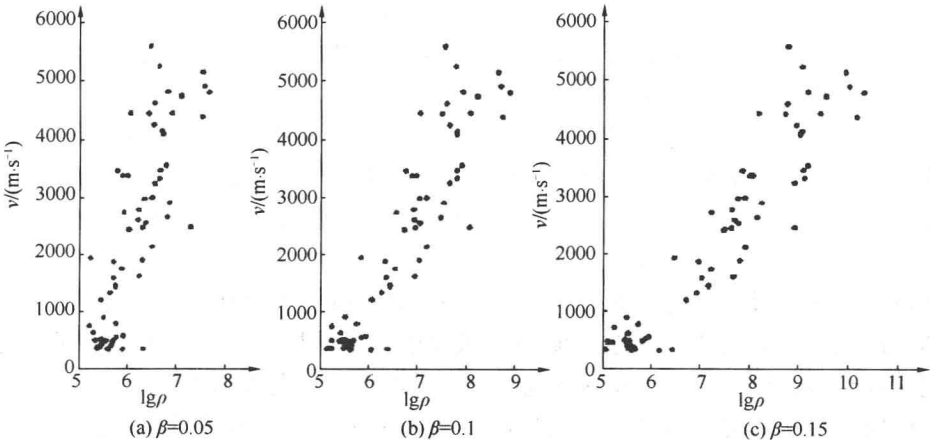


图 1-3 砂岩速度、电阻率及深度的关系

1-3(c) 中离散点聚集成三团,也就是微测井中对应的低速带、降速带和高速带位置,利用此关系的成像结果误差也会较大。综合以上分析,当 $\beta = 0.1$ [图 1-3(b)]时,离散点具有较好的相关性,可以作为成像参数。

由于不同的岩性存在电性差异,不同岩性获得的最佳 β 值必定不一致。通过反复试验,可以得到不同岩性的最佳 β 值如表 1-1 所示。

表 1-1 不同岩石的最佳 β 值

岩 性	灰岩	凝灰岩	碎屑砂岩	杂色砂岩	石英砂岩	砂岩	泥岩	泥灰岩
最佳 β 值	0.1	0.1	0.1	0.15	0.15	0.1	0.15	0.15

岩石的电阻率是表征岩石导电能力的物理参数,岩石的导电能力除了与岩性有关外,还受很多外界因素的影响,如岩石的含水特性、致密程度。所以在反演过程中,不能简单地在某一岩性的所有区段统一采用一个参数来进行运算,而应该将具有相近特性的区域区分开来,单独运算,形成如下的运算过程:

- ① 在同一岩性段内,按特定的选择标准选取与计算点相关系数最小的 3~5 个微测井点位。选取标准为:参数井距离计算点距离越大,相关系数值越小;参数井位的电阻率与计算点的电阻率越接近,相关系数值越大;
- ② 在选取的微测井的每一个深度上插值出相应的电阻率数据;
- ③ 在每口微测井的每个深度段,都建立方程(方程中 β 已知),得到一个超定方程组;
- ④ 利用自适应加权广义逆法求解超定方程组,获得一组系数 a_1, a_2, a_3 ;
- ⑤ 利用获得的系数求解计算点位上的速度值,计算点位从剖面第一点到最后一点一直计算下去,最后得到整个剖面的速度数据。

电阻率法,主要在地面用高密度电阻率法获得工区表层电阻率剖面,再通过钻井电测深方法建立电性特征与表层岩性的对应关系,经过速度模型反演来描述表层速度、厚度的变化细节,从而弥补微测井等单点调查的不足。

9. 利用面波信息调查表层结构

在探测深度介于天然地震和工程物探之间的石油地震勘探中,瑞雷面波是一种很常见的干扰波,一般在资料处理中要去除。实际上石油地震勘探中的瑞雷面波也和折射波、反射波一样包含有地下介质的信息,因此充分利用瑞雷面波信息有可能为研究表层结构开辟一条新的途径。

目前国内石油勘探领域对利用瑞雷面波调查表层结构的研究主要分为两条路线:一条路线是直接应用工程勘探中瞬态瑞雷波勘探技术调查地表结构。这种方式目前已经取得了一定的实际效果,但需要开展专门的野外工作,增加石油地震勘探的投资;另一条路线是借鉴瞬态瑞雷波勘探的思路,利用单炮记录中的面波信息来调查地表结构,这种方式充分挖掘单炮记录信息,不需要专门投资,把常规生产中的干扰波转化成有用信息,如果研究成功,将会具有广阔的应用前景和较高的经济效益,但目前该路线主要处于理论探索阶段,还有一些理论与技术上的问题等待解决。总之瑞雷面波在石油勘探方面的应用研究潜力是非常大的。

利用瑞雷面波的格林函数,采用抛物线形爆炸震源函数,可以合成石油勘探中瑞雷面波的理论记录,(图 1-4)。此理论记录采用 20m 接收道距,偏移距 20m,2ms 采样,单边接收,共 60 道。利用 $p-\omega$ 变换,把 $t-x$ 域共炮点面波转换到 $f-v$ 域,从而可以得到面波的频散曲线(图 1-5)。 $p-\omega$ 作场变换的一个重要特点是能突出信号中能量最强的分量,而对

次级的能量团反应不敏感,因此用 $p-\omega$ 变换提取频散曲线,能准确地得到基阶的频散曲线,但不能有效地分离各级高阶面波的频散曲线。这在图 1-5 中体现得非常清楚,图中的黑线为模型正演的频散曲线, $f-v$ 谱中基阶面波的能量极值与正演结果一致,而高阶面波未能分辨出来。这是 $p-\omega$ 变换的一个固有缺点,但对于石油勘探面波频散曲线的提取而言,又是一个优点,因为它突出了石油勘探面波的主要成分。

从上述分析可以得出结论,石油地震记录中面波呈现正频散特征,而且记录得到的主要是基阶模式的面波垂直分量(对纵波勘探而言)。

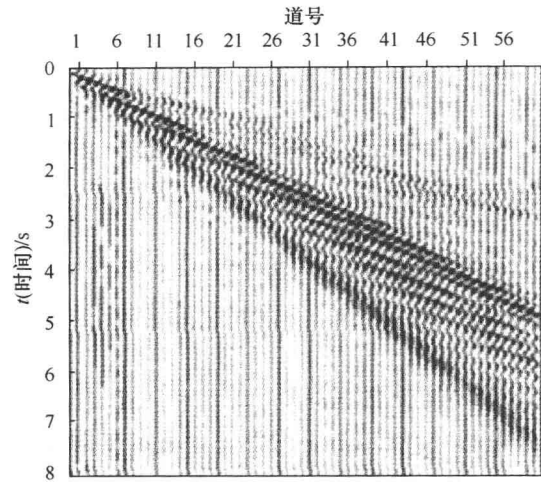


图 1-4 石油勘探中瑞雷面波的理论记录

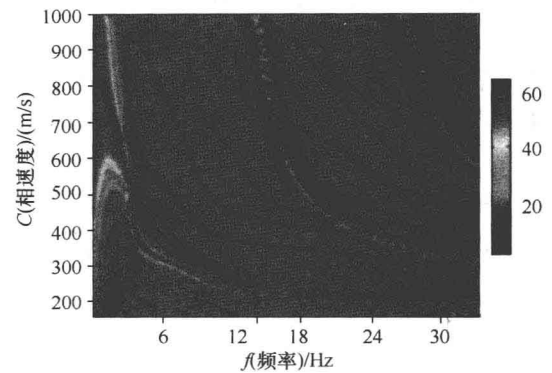


图 1-5 面波的频散曲线

二、表层结构综合调查技术实例

1. 综合物探方法在南盘江表层结构调查中的应用

贵州南盘江地区的表层结构相当复杂,低、降速层的厚度和速度变化较大,给地震资料的采集和低速带调查工作带来了很大的困难。因此,准确查清低、降速层的速度、厚度以及高速层的速度对地震资料的解释处理以及含油气构造的评价都有十分重要的意义。

根据地震勘探工作的需要,在南盘江秧坝区块进行了表层结构调查的试验工作,共投入了包括陆地声纳法、探地雷达法、微分电测深法以及瞬态多点面波法等多种物探方法的试验。结果表明,利用陆地声纳法与微分电测深法,可有效地划分出低速带、降速带的厚度和速度,其结果与微地震测井资料吻合较好;瞬态多点面波法和探地雷达法在本区的地球物理条件下,探测深度不够理想,只对浅部分层起到验证作用。

根据对区内地质及表层结构地球物理特征的广泛分析研究,在本次试验中投入四种物探方法,即陆地声纳法、微分电测深法、探地雷达法和瞬态多点面波法。

(1) 微分电测深

微分电测深 ρ_s-h 曲线上每个转折点,都反映了一层电阻率分界面,可直观地进行定量解释,可十分清晰地反映超低速带、低速带和降速带下界。

由于区内地表普遍覆盖有一层 0.16m 左右厚的黏土、腐植土,电阻率较低,一般低于 $100\Omega \cdot m$,因此大多数点的电阻率曲线首支随深度急剧上升,并在这一层的底界深度达到极大值。在地表为耕植土时,则表现为比下伏层电阻率高的特性。这一层的地震波速度很低,

为超低速带。低速带底界在微分电测深曲线上表现为低阻反映，这是由于强风化岩体中裂隙发育，富含地下水所致。大多数测点在低速带底界以下的电阻率呈上升趋势，只有少数点的电阻率变化不大，但中间有一明显的低阻层。

微分电测深曲线对降速带的反映可分为三种类型：当降速带与高速带位于同一岩性中时，降速带与下部高速带之间有一小段明显的低阻异常，但数值变化不大，如图 1-6(a)；当降速带下伏岩层为致密、厚层的高阻岩层时，在降速带分界线上有强烈的低阻反映，在分界线以下电阻率大幅上升，反映了岩性分界的特征，如图 1-6(b)；当降速带下伏岩层为低阻岩层时，在降速带分界线上有低阻反映，但其分界线以下的电阻率并不高，如图 1-6(c)。

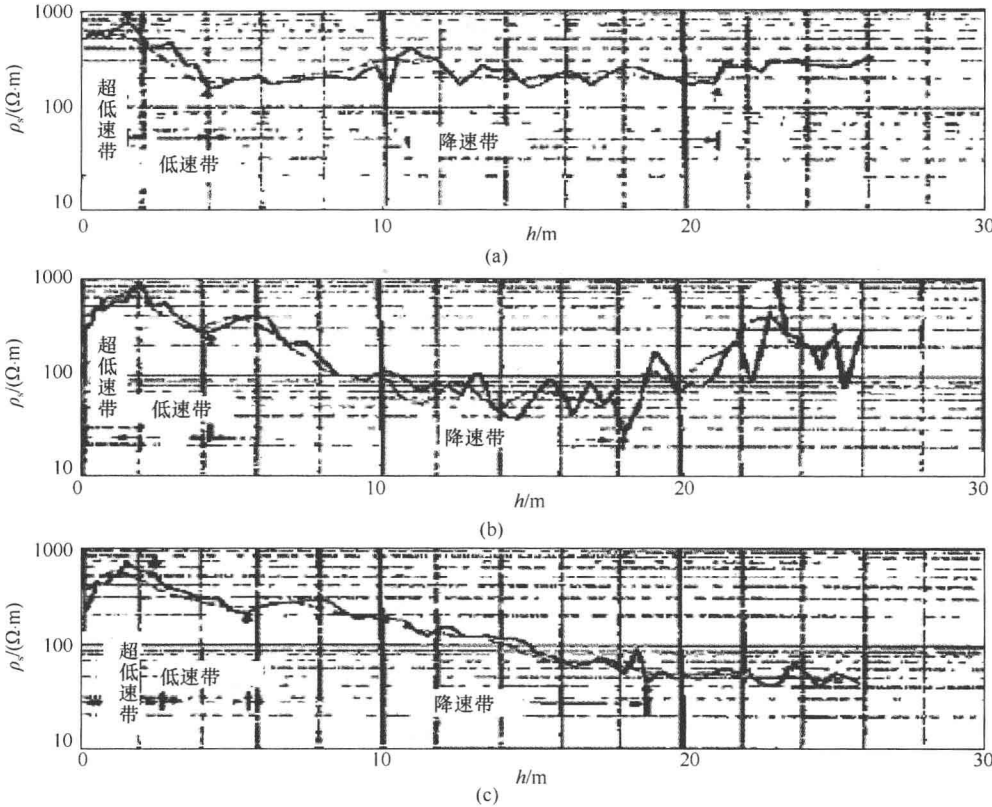


图 1-6 微分电测深的 $\rho_s - h$ 曲线

(a) 降速带和高速带为同一岩性；(b) 高速带为高阻岩层；(c) 高速带为低阻岩层

(2) 陆地声纳

图 1-7 (a) 为 150 ~ 250Hz 频段的陆地声纳似 t_0 时间剖面图。锤击震源子波首相位为负半周，所以每一目的层的反射波首波亦为负半周。由该图可以看出，从地面向下有 3 组明显的反射同相轴：第一组反射波连续性较好，反射时初至约为 4ms 左右，是地表粘土、腐植土、耕土等超低速带下界的反射；第二组反射波时有断续，起伏较大，反射时为 14ms 左右，是低速带下界的反射信号；第三组反射波连续性较好，起伏较大，反射时为 20ms 左右，是降速带下界的反射。在确定了目的层反射同相轴以后，逐点读取各反射波的反射时，再利用微分测深法所得的各层的深度，可计算出各层的平均速度，结果如图 1-7(b) 所示。

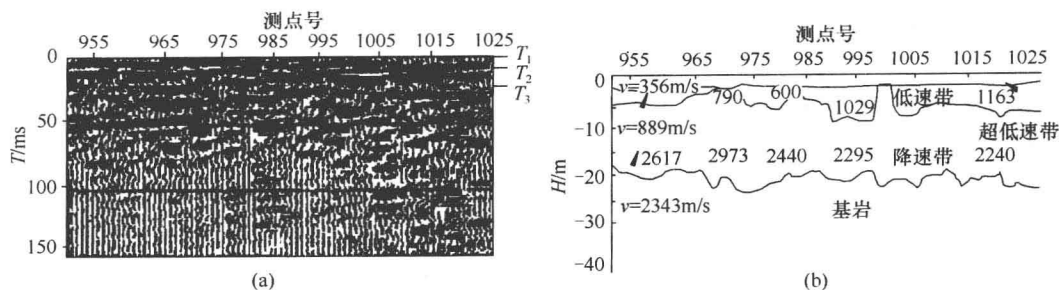


图 1-7 陆地声纳似 t_0 时间剖面及解释成果

(a) 陆地声纳 t_0 时间剖面; (b) 解释成果

(3) 探地雷达法和瞬态多点面波法

探地雷达法和瞬态多点面波法能较好地反映低速层的变化情况, 部分地段 3 ~ 15m 内的降速层有不同程度的反映。

(4) 与微测井资料对比分析

微测井是利用多次激发而得到的透过波时距曲线的拐点和折线段的斜率来划分低、降速层及高速层的速度和厚度。用微地震测井法测量表层速度, 可以精确地划分速度层。

图 1-8 是 96715 桩号的微地震测井成果和微分电测深曲线。微测井测得低速带下底界面埋深为 3m, 低速带波速为 605m/s; 降速带的底界面埋深为 20m, 波速为 3000m/s。陆地声纳和微分电测深的解释结果是低速带的下底界面埋深 316m, 超低速带与低速带的平均波速为 576m/s; 降速带下底界面埋深 2014m, 波速为 2973m/s, 其解释结果与微地震测井吻合较好。

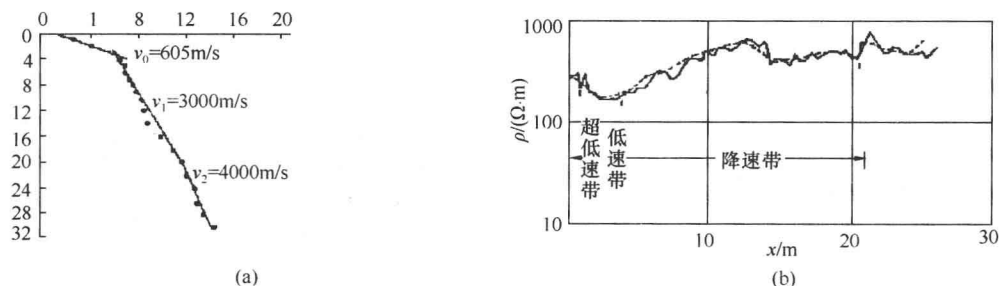


图 1-8 96715 桩号的微地震测井成果和微分电测深曲线

(a) 微地震测井成果; (b) 微分电测深曲线

利用微分电测深法确定超低速带、低速带和降速带的下界深度, 再用陆地声纳法在相同测点上确定这些界面的反射时间, 然后计算出相应层的层速度, 即用微分电测深法和陆地声纳法的组合, 是表层结构调查中较为理想的综合物探方法。

2. 面波表层结构调查实例

已知 A 区地震测线 1 的采集参数为: 道距 50m、炸药震源激发、中间放炮、接收道数 360 道, 野外小折射调查的低降速带数据如图 1-9、图 1-10 所示, 该区低速带的速度、厚度比较稳定, 但降速层厚度变化大。

从速度分布看, 高速层速度变化大, 特别在大桩号处, 小折射方法调查不出高速层数据。分析该区单炮记录, 选取面波十分发育的桩号 512000 ~ 518000 区间的大炮记录进行分析。

从图 1-11 的分析结果可看出, 在这类地区, 通过瑞雷面波分析可以比较清楚地反映出高速区瑞雷面波平均速度与厚度的关系, 从而可以确定低降速带的厚度。图中深度的转换采用面波速度—厚度曲线绘制方法。计算的表层瑞雷面波速度与频率的关系见图 1-12。

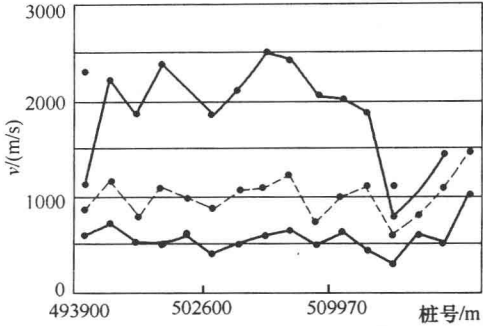


图 1-9 测线 1 的低降速带速度分布图

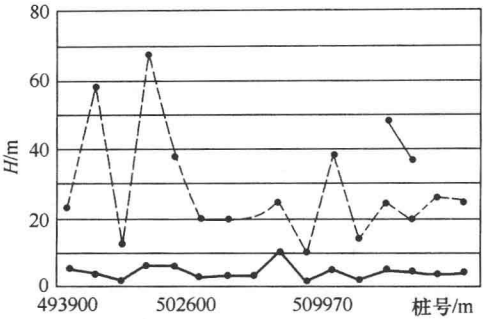


图 1-10 测线 1 的低降速带厚度分布图

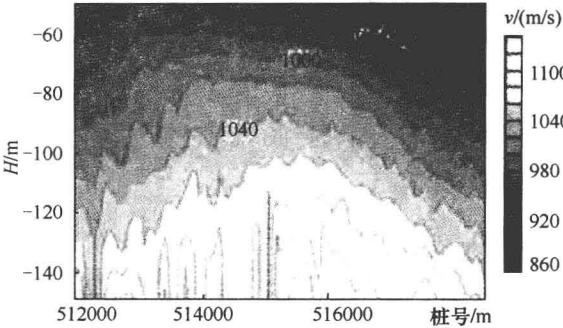


图 1-11 测线 1 速度—厚度剖面图

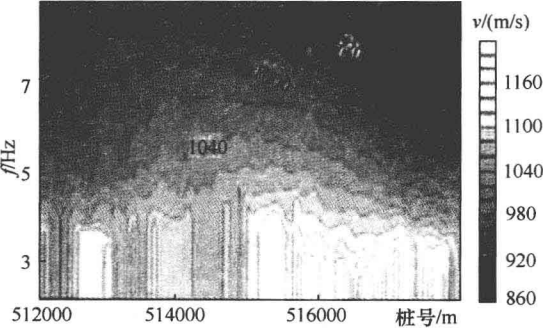


图 1-12 测线 1 频率—速度剖面

图 1-13 为解释的频散曲线, 图 1-14 为拟合出的另一沙漠区瑞雷面波速度与纵波速度的线性关系图, 该图说明瑞雷面波速度与纵波速度之间可以直接转换。分析瑞利面波速度与纵波的线性关系, 可得出一般沙漠区的通用公式, 即为

$$v_p = av_R - b \quad (1-1)$$

在小折射或微测井方法调查很有效的地段, 至少选择两个点(最大速度、最小速度)的瑞雷面波和纵波速度, 代入式, 即可解出系数。

在 A 区测线 1 上选取两点代入

(1-1) 式求得: $a=6$, $b=3700$, 再将该参数代入方程求出瑞利面波速度, 然后对图 1-11 数据体进行转换。从图 1-15 的转换结果中可看出, 该图与野外调查的图 1-9 相比, 速度变化相当, 可作为对小折射调查表层结构的验证和补充, 这对于求准静校正量是非常重要的。

3. 对南方复杂地区电阻率近地表结构调查

目标区块不仅具有地表和地下地质条件的双重复杂性, 同时面临着山地和碳酸盐岩裸露区地震勘探的双重困难性, 对地震采集资料质量的影响十分严重。

强烈的构造运动造成地表和地下地层的破碎、断裂。由于该区中下古生代地层曾经历了

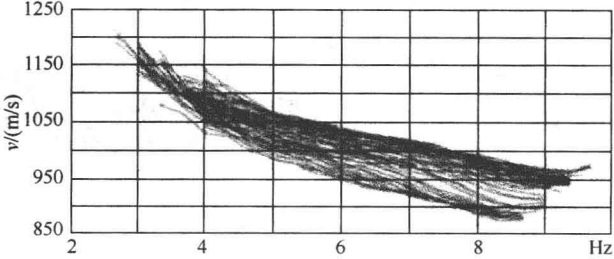


图 1-13 测线 1 的解释的面波频散曲线

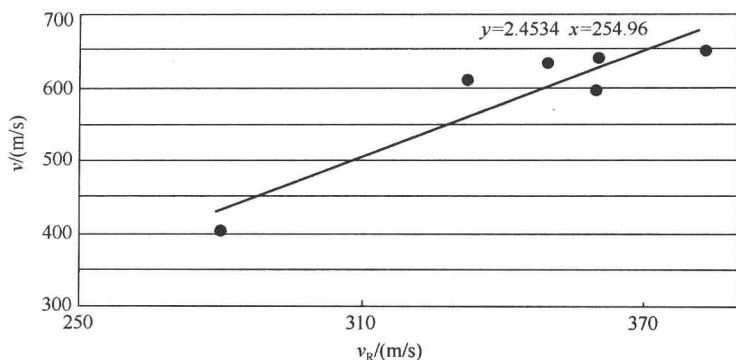


图 1-14 沙漠区面波与纵波线性关系

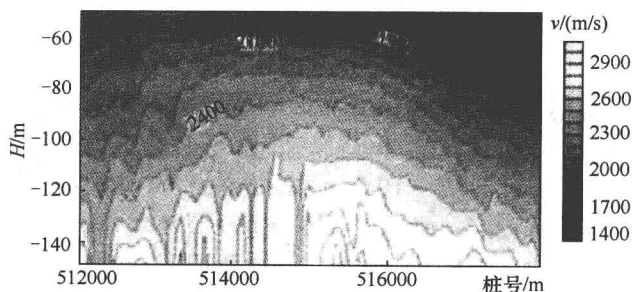


图 1-15 测线 1 利用面波转换的纵波速度 - 厚度剖面

从古生代到新生代的加里东、印支、燕山和喜山等多期构造运动，使得古生代老地层直接裸露于地表，同时受到强烈的构造抬升、挤压作用，深浅层岩石破碎严重，岩性变化差异较大，地下构造断裂及断层众多，地层产状变化多端，倾角大、直立地层增多。裸露于地表的岩石长期遭受风化、淋漓、剥蚀作用，溶洞、裂缝十分发育，山体内喀斯特地貌发育，溶洞较多，使得地表岩石弹性变差。

图 1-16(a) 是工区的一段电阻率剖面，为了显示方便，纵横比例尺之比为 10:1。从图

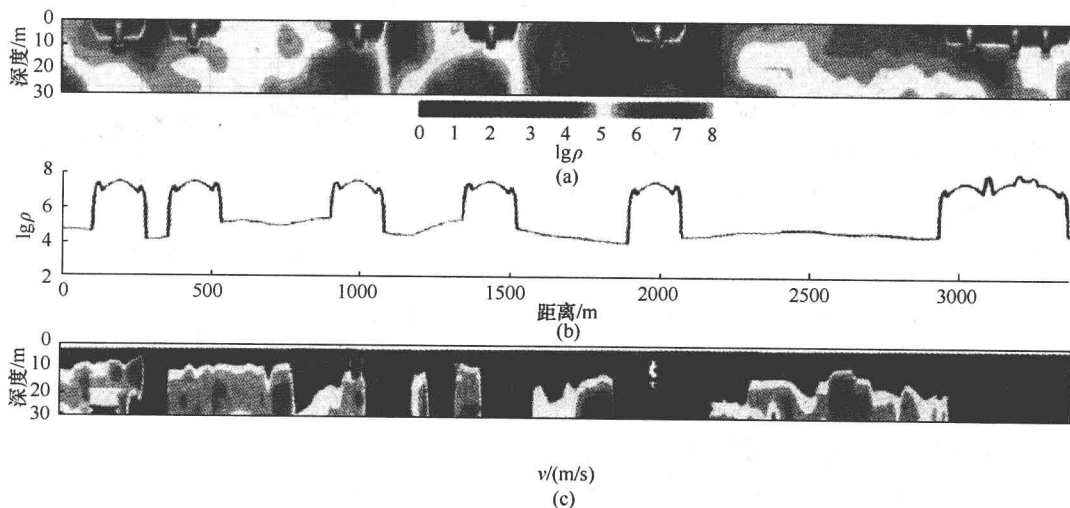


图 1-16 工区某处对数电阻率剖面及初始反演结果

(a) 高密度电法得到的电阻率剖面；(b) 电阻率剖面零深度值剖面；(c) 初始反演速度剖面

中可以看到，地表电阻率跳跃比较大，共有 6 处电阻率值发生了突变。为更好地显示其变化规律，图 1-16(b) 将地表(深度为零)电阻率绘制成一条曲线，其中横坐标是点位，纵坐标为对数电阻率 $\lg\rho$ 。从曲线中可以明显地看到，6 处电阻率的增高不是呈渐进式的，而是突变的。查验现场处于砾石区，电阻率测量不准确。微测井位置分布不规律，这是因为该区地形复杂，有些地段不适合布井。

图 1-17 是微测井解释的低速带、降速带和高速带的速度值。水平坐标为微测井的位置，纵坐标为解释的速度。每口井都解释了 3 个速度值，其中蓝色圆点为低速带速度，绿色方点为降速带速度，红色十字点为高速带速度。灰色折线分别把低速带、降速带和高速带速度值连接起来。对比微测井解释速度和图 1-16(c) 的成像速度，结果有较大差异。特别是在 300m, 1100m, 1900m 和 2100m 处，图 1-16(c) 所示的速度从地面到深度为 30m 时都在 1000m/s 以下，从另一个角度说明了图 1-16(c) 的结果无效。

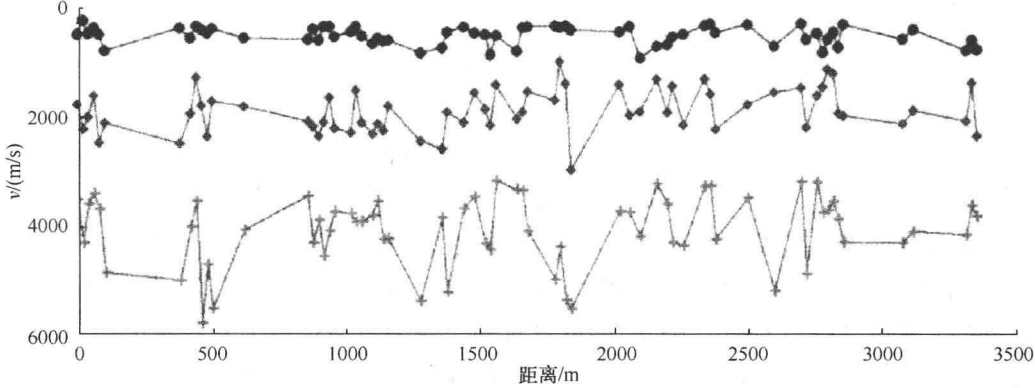


图 1-17 微测井速度

成像速度的巨大差异主要是由表层岩性和岩石电性的巨大差异引起的。而这种差异在南方复杂地区比较普遍，要获得较好的成像效果，只能通过改善算法来达到提高成像精度的目的。图 1-18 是利用此方法进行速度成像的结果。对比图 1-18 和图 1-16(c)，可以看到在图 1-16(c) 中的“挂面条”现象得到了很好的修正，同时速度值也趋于合理。为了进一步分析成像结果的准确性，需要与微测井资料进行对比。图 1-19 是该段微测井解释结果。工区每口微测井都解释了 3 层数据，以微测井位置为横坐标，以深度为纵坐标，同一层用相同

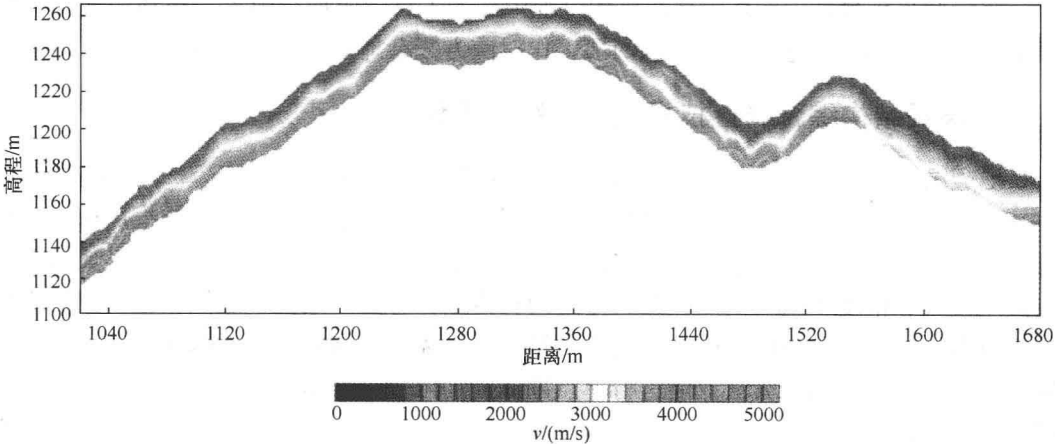


图 1-18 速度成像结果