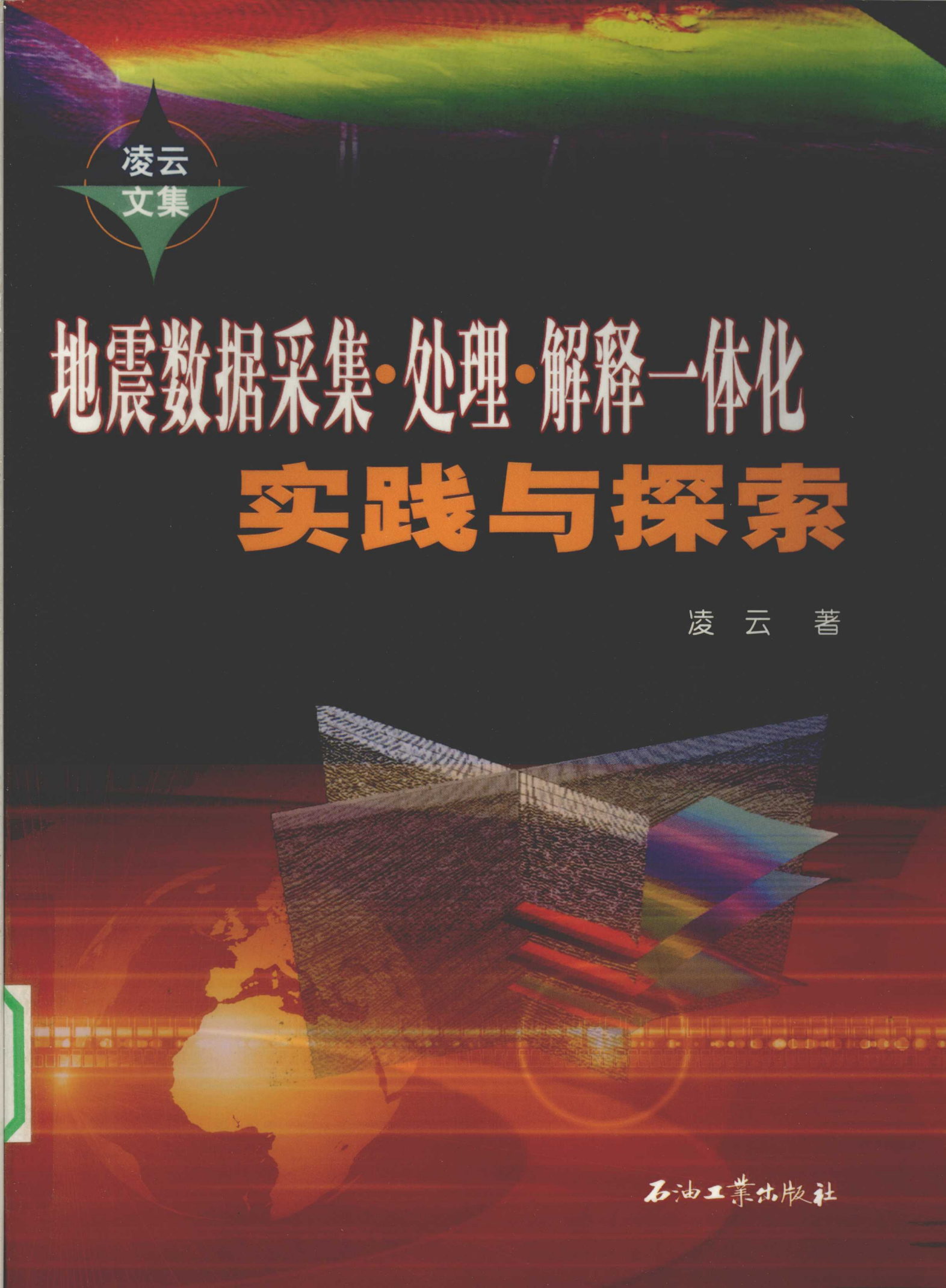




凌云
文集

地震数据采集·处理·解释一体化 实践与探索

凌云 著

石油工业出版社

地震数据采集·处理·解释一体化
实践与探索

凌云文集

凌云著

石油工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地震数据采集·处理·解释一体化实践与探索: 凌云文集 / 凌云著.
北京: 石油工业出版社, 2007.11

ISBN 978-7-5021-6315-0

I. 地…

II. 凌…

III. ①地震数据—数据采集—文集

②地震数据—数据处理—文集

IV. P315.63-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 167915 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) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2007 年 11 月第 1 版 2007 年 11 月第 1 次印刷

889×1194 毫米 开本: 1/16 印张: 23

字数: 700 千字 印数: 1—1500 册

定价: 198.00 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

地震勘探是采用人工激发地震波勘测与地下石油、天然气及煤田等有关的地质结构和地层岩性的方法总称。由于地下介质的力学性质不同,地震波在传播过程中,会发生其频率、振幅、相位、速度等信息的空间变化及波场类型的转换,这些变化的信息可通过地表或井下的高精度仪器和相应的观测系统获得。利用地震数据成像处理技术,这些信息可转换为地质学家(包括油气田及煤田开发工程师)可识别的图像。再经地质学家的地质解释,最终不仅可以获得地下地层的构造形态和断裂展布,而且可以获得古地理和古沉积环境及沉积相的信息,进而达到预测储层与油气藏(或煤田)的目的。

地震勘探属于地球科学中地质学领域的应用地球物理学范畴。从地震勘探的信息链角度看,它具有明显的跨学科特点,它的发展离不开构造地质学、沉积地质学、石油地质学、岩石物理学、近代地球物理学、计算数学、计算机与电子学,以及精密机械技术的发展。如今,地震勘探已经发展成为一门相对独立的学科——勘探地震学。从地震勘探跨学科的特点看,笔者将地震勘探的发展归纳为几个主要阶段。

地震勘探初级阶段:从20世纪初出现折射波和反射波理论以来,于20世纪30—50年代建立了以光点地震仪观测和单次覆盖解释技术为主要特征的地震勘探初级阶段。这一阶段的显著特征是:通过理论与实践,初步形成了通过地震信息认识地下地质信息的能力和办法。

地震勘探发展阶段:随着人们对地震勘探认识的逐步提高,以及对地震数据采集和处理精度的需求,20世纪50—70年代间,光点地震仪被模拟地震仪和数字地震仪所替代,人工的单次覆盖解释技术被模拟计算机和数字计算机的处理以及二维多次覆盖解释技术所替代,形成了地震勘探理论快速的发展阶段。这一阶段的显著特征是:地震数据采集和处理数字化;基于反褶积、NMO叠加和 15° 叠后偏移为主要处理方法的地震数据处理流程基本形成;相应的地震数据处理软件系统开始出现。

立体地震勘探阶段:随着地震采集设备和大型计算机的快速发展以及地震勘探理论的逐步完善,20世纪70—90年代间,地震勘探开始进入空间三维立体的地震勘探阶段。这个阶段的显著特征是:基于三维DMO、三维叠后变速陡倾角偏移及三维叠前时间/深度偏移的处理理论与处理软件系统逐步形成和完善;同时相应的三维地震数据解释软件系统开始形成。随着空间三维地震勘探能力的发展,地震数据采集、处理和解释的一体化地震勘探平台也随之形成。

综合地震勘探阶段:在以上三个发展阶段的基础上,从20世纪90年代至今,地震勘探正转入面向地质目标体,以三维数据(纵波)采集、处理、解释一体化,三维多波(纵波和转换波),三维VSP,井间地震,井下地球物理和四维地震为主线的综合地震勘探发展阶段。这一发展阶段的主要特征是:各大国际地球物理公司推出具有地震勘探综合概念的技术系列,如:斯伦贝谢公司推出以井信息为导向的基于海上、陆上Q系统的地震勘探综合技术系列;CGG推出面向储层的Eyes-D地震勘探综合技术系列。从当今世界地震勘探的发展趋势看,这个阶段势必进一步推进地震勘探综合技术的集成与完善,进而形成直接面向油气藏的精细勘探。

面对地震勘探综合技术和信息融合的发展趋势及中国陆相沉积储层的复杂性,中国地震勘探发展将面临更严峻的挑战(其中包括企业管理水平的完善、企业经济结构的调整、科技系统研发、创新与管理水平的提高,以及职业理念和团队精神等文化氛围的进步等诸多领域)。但笔者认为,只要敢于面对中国油气勘探中的实际问题,抓住地震勘探中的主要矛盾,坚持实践检验真理的标准,在地质理论指导下,以地震勘探理论为基础,走地震数据采集、处理、解释一体化和地震勘探综合技术发展之路,

相信中国的地震勘探技术发展一定能跟上国际大物探公司的发展步伐，同时也能解决中国油气田亟待解决的实际问题。

在这一理念指导下，近 20 年来，笔者及以笔者为主要执笔人的凌云研究组，以地震数据采集、处理和解释的系统研究为己任，针对中国陆相薄储层特点，紧紧围绕陆上近地表影响问题、地震成像分辨率问题、地震信息与井信息标定问题、薄储层沉积的古地貌和沉积微相等解释问题进行了许多实践和探索研究，并发表了相应的技术论文。为能较全面地反映整个研究思路的形成过程与发展，笔者将分散的 39 篇文章汇集成本文集。为了便于阅读，文集将收录的文章分为四个部分：第一部分为地震数据采集和地震数据处理；第二部分为地震数据处理和地震数据解释；第三部分为地震信息与地质解释；第四部分为地震勘探与油藏开发。

笔者的主要研究思路是：注重地震勘探中宏观与微观认识的衔接问题求解；注重实际问题 and 理论间的问题求解；注重地震勘探问题的相对求解和绝对求解；注重地震数据采集、处理、解释和井信息间的衔接问题求解；注重地震勘探中的主要矛盾和次要矛盾的分析与求解；同时十分重视地震数据采集、处理和解释过程中的质量监控和定量分析方法的研究。

具体实施的研究步骤是：从地震数据采集观测系统和近地表吸收衰减以及干扰的分析出发，研究了近地表影响的消除与补偿方法；在此基础上，提出了基于采集和处理数据质量监控条件下的相对保持振幅、频率、相位和波形的提高分辨率和高精度成像处理理念与具体方法；在相对保持振幅、频率、相位和波形的高精度成像地震数据条件下，采用地震数据参考标准层与井信息的相对标定和沿参考标准层的地震属性提取，以及基于层序地层学和地震地层学的储层演化地震数据解释，最终达到认识薄储层的古地貌、古沉积环境、沉积相和空间展布的目的。

由于所收录的文章时间跨度较长，其中有少量文章的部分图件无法恢复，加上统一排版的需要，本文集对一些文章作了少量修改。其中 2002 年至 2005 年期间，为促进团队发展和职业理念的进步，笔者多以羊屋三维处理、解释一体化方法研究组和凌云研究组署名发表了一些文章。此外，由于发表文章的时空条件限制，文集中必然存在许多问题与不足，望读者批评指正，同时也热忱希望就本文集中提到的一些问题展开诚挚的讨论，以求推进中国地震勘探技术的进步。

凌云研究组简介

随着综合地震勘探技术的发展，世界各大地球物理技术服务公司正逐步推出以地震勘探系统技术服务为依托的技术市场竞争。斯伦贝谢公司在并购西方地球物理公司后，试图通过井中技术与地面地震技术的融合巩固其在地震勘探领域中的领先地位。CGG 公司也随其后推出针对地质目标体的 Eyes-D 地震勘探系统理念与技术系列。从这一发展趋势看，地震勘探已进入面向油气藏的系统技术和信息综合的精细地震勘探阶段。

这一发展趋势表明，今后地球物理勘探技术的研发投资将会明显增大，并且投入的研究人员也会有所增加，这就要求企业在系统技术的研发和创新能力、研究团队协作的文化氛围、职业道德的理念等方面有较大的发展。

为此，笔者从 1983 年开始，在任塔里木中美合同办计算中心处理技术负责人和石油地球物理勘探局（简称石油物探局）研究院处理中心应用程序组组长、方法研究组组长、方法研究部主任期间，在老一代地球物理学家的指导下，依靠团队的智慧和力量解决了当时大量的实际问题。从 1997 年起，笔者和一些研究人员一起，开始了基于相对保持振幅、频率、相位和波形的提高分辨率系统处理技术的研究，以及四维地震数据处理技术的研究。在这一过程中，笔者深刻感受到仅仅依靠地震勘探基础理论难以获得复杂地质问题的正确求解，只有在地质理论的指导下，以地震勘探理论为基础，通过地震数据采集、处理和解释一体化的系统研究，最终才能获得正确认识地质目标的目的。

从 2000 年开始,凌云研究组开始了地震数据采集、处理和解释一体化的研究。在近 6 年的研究中,凌云研究组与各油田公司合作完成了如下研究项目:针对稠油蒸汽热采四维地震的处理研究(1998 年辽河油田分公司、2000 年新疆油田分公司);针对小于 $1/4$ 波长地震分辨率储层的处理和解释一体化研究(2002—2003 年塔里木油田分公司);基于全方位、高密度三维采集、处理和解释一体化研究(2002—2003 年新疆油田分公司、中国石化西部指挥部);针对砾石区全方位、可控震源点激发和高密度的三维采集、处理和解释一体化研究(2003—2004 年吐哈油田分公司);针对岩性油气藏的宽/窄方位角的地质解释评价研究(2004 年东方地球物理公司);针对河流相、叠置薄储层和深部复杂地质目标的叠前时间偏移的地质解释评价研究(2004—2005 年东方地球物理公司^①);针对叠置薄储层的宽方位角采集数据的处理和解释研究(2005 年大庆油田有限责任公司);针对四维地震与开发的系统研究(2005 年 CNPC 科技局);针对叠置残留盆地的沉积相研究(2006 年大港油田分公司);针对叠置扇体岩性圈闭研究(2006 年吉林油田分公司)。通过以上采集、处理和解释一体化的研究,研究组为油田提供了重要的和有益的地震勘探技术思路与油田开发信息。

在此,笔者代表凌云研究组对那些给予研究组大力支持的同仁或单位表示衷心的感谢,他们是:李立诚教授、张国珍教授(四维地震项目研究);匡立春副总经理(新疆油田分公司)、吕焕通教授,以及新疆油田物探研究所(拐 19 宽方位三维和拐 8 三维处理、解释一体化研究);孙龙德总经理、周新源副总经理(塔里木油田分公司)、杨举勇教授,以及塔里木油田研究院(羊屋三维、哈德 4 三维和哈德 11 三维处理、解释一体化研究);牟书令教授(原中国石化副总经理)、张永刚教授、钱基教授、蔡希源教授、赵殿栋教授(庄 1 井区三维采集、处理、解释一体化研究);袁明生教授(原吐哈油田副总经理)、阎玉魁教授,以及吐哈油田研究院(胜北三维和善勒三维处理、解释一体化研究);陈树民教授、刘振宽教授、王建民教授,以及大庆油田勘探开发研究院(肇 35 三维处理、解释一体化研究);刘振武局长(中国石油天然气集团公司科技局,四维地震与开发项目研究);吴永平副总经理(大港油田)、熊金良教授,以及滩海公司和大港油田研究院(张巨河三维处理、解释一体化研究);梁春秀副总经理、赵志魁总经理助理(吉林油田分公司)、杨光大教授,以及吉林油田勘探开发研究院(伊通断陷三维处理、解释一体化研究);杨学文副总经理(新疆油田)、新疆油田评价处刘明高、张明玉,研究院李岩(车 76 油藏评价三维处理、解释一体化研究);大港油田评价处李东平、王娟(大港油田王官屯油藏评价三维资料处理解释研究);大庆油田勘探开发研究院张尔华、宋永忠(肇源南三维处理解释综合研究);辽河油田孟卫工副总经理、邹启伟、辽河油田勘探开发研究院(辽河西部凹陷欢喜岭地区三维地震资料处理解释研究);东方地球物理公司科技发展部和研究院(东方地球物理公司研究项目);Paradigm 公司(给予软件赞助)。同时,特别向东方地球物理公司原总经理徐文荣、董事长王小牧、总经理王铁军、副总经理张伟、副总经理夏义平为研究组创造的良好工作环境和对团队建设的帮助表示深深的感谢!

此外,通过与国际上一些大石油公司(沙特阿拉伯国家石油公司、壳牌石油公司、BP 石油公司、法国道达尔石油公司)的技术交流、技术研讨和技术宣传等国际活动,笔者深深地感受到地震数据采集、处理和解释一体化系统研究的重要性,以及市场的竞争力。笔者认为:只有创造宽松的研究环境,促进研究团队的建设和推动职业道德理念的进步,即便是在现有的环境下,企业仍能实现在“综合地震技术发展”、“技术市场竞争”和“人才竞争”中的快速发展。

通过多年的实践与探索,凌云研究组采用了开放和流动的方式,重在体现团队的精神,同时也为研究组成员提供了一个发挥聪明才智的平台。从 2000 年至今,凌云研究组的郭向宇、王晓平、王世瑞、陈波、罗晓明等同志先后获得了中国石油大学、中国地质大学和中国矿业大学的博士学位,林吉祥同志仍在研究组完成其博士论文。同时,凌云研究组还为东方地球物理公司和各个油田培养了一批

^① 东方地球物理勘探有限责任公司简称为东方地球物理公司。

地震数据采集、处理 and 解释的研究人员。

另外,笔者向现在仍在凌云研究组共同奋斗的高军(地球物理硕士)、孙德胜(地球物理硕士)、林吉祥(地质博士)为团队精神和地震系统技术研究作出的巨大贡献表示感谢!同时,也向曾经在凌云研究组共同工作和奋斗过的郭向宇(地球物理博士)、王晓平(地质博士)、张汝杰(地球物理硕士)、吴琳(处理工程师)、张红梅(解释工程师)、陈波(地质博士)、王世瑞(地质博士)、罗晓明(地球物理博士)、吴伟康(处理工程师)为地震技术研究作出的贡献表示感谢!

作者简介



凌云,生于1956年,1971年参加石油勘探工作,1980年毕业于长春地质学院物探系,1983年晋升为工程师,1991年破格为高级工程师,1992年获成都理工学院硕士学位,1995年获成都理工学院博士学位,1997年晋升为教授级高级工程师,并为享受国家特殊津贴专家,现为SEG、EAEG、AAPG会员。笔者从第一天参加石油勘探工作起就与地震勘探结下了不解之缘,从事过汽车修理、野外地震放线、司钻、数控数字仪操作员、塔里木中美合同办计算中心处理技术负责人、原石油物探局研究院IBM处理中心应用程序组组长、方法研究组组长、研究院处理中心方法研究部主任、研究院总工程师,现任东方地球物理公司副总工程师。

在1971至1976年期间,笔者主要在陕甘、华北、大港、玉门、新疆塔里木等地区从事野外采集工作。1980年后,全力投入对塔里木沙漠区、中东沙漠区、吐哈盆地山前带、巴基斯坦山前带、苏丹火成岩、滇黔桂山地、柴达木盆地山前带、酒泉盆地山前带、大港滩海过渡带、鄱阳湖沼泽带、中东滩海过渡带、准噶尔盆地腹部、大庆三肇凹陷、吉林乾西北等地区的近地表和岩性储层问题进行采集、处理和解释一体化实践及探索性研究,现在正致力于吉林伊通断陷区叠置扇体和大港深层叠置残留盆地的沉积相和岩性圈闭储层的处理和解释一体化研究。

在36年的野外采集、室内处理和方法研究,以及近年来采集、处理、解释一体化研究中,笔者逐步体会到地震勘探系统技术融合的重要性和必要性,同时也体会到其中的困难与艰辛。

在笔者成长的过程中,特别感谢接维增(原217地震队队长)、汤大丰(原217地震队钻井组长)、袁平(原217地震队仪器组长)、邝少荣(原石油物探局研究所领导)、刘颂威(原石油物探局局长)、李玉超(原石油物探局党委书记)、徐文荣(原东方地球物理公司总经理)、赵瑞平(原石油物探局副局长)、张永刚(原石油物探局研究院院长)、赵世贤(原石油物探局研究院副院长)、凌克宽(父亲)和徐锡云(母亲)给予的人生教诲与帮助。

在笔者的学术生涯中,特别感谢周熙襄教授(博士生导师)、俞寿朋教授(研究生导师)、李庆忠院士、陈祖传教授、孟尔盛教授、郑於莹教授(原处理中心方法组长)、周兴元教授、李立诚教授、汪廷璋教授、牛毓荃教授给予的培养与指导。

笔者也特别感谢刘光鼎院士、马在田院士、黄绪德教授、欧庆贤教授、贺振华教授、何樵登教授、牟永光教授、李承楚教授、杜世通教授、刘雯林教授、陆邦干教授、赵化昆教授等给予的教诲与鼓励。

最后笔者还要向全力支持本人工作的王玉兰女士(夫人)和凌维泽(儿子)表示谢意。

目 录

■ 地震数据采集和地震数据处理

近地表影响分析与消除	3
基于一维弹性阻尼波动方程理论的沙丘 Q 吸收补偿	3
地表一致性变步长预测反褶积与沙丘鸣震的压制	11
近地表散射波的叠后衰减	17
模型初至地表一致性静校正	25
有效波与干扰检测、压制	31
三维地震数据的分析与检测方法研究	31
方型排列干扰波调查方法研究	39
非规则干扰信噪比分析	46
激发药量与药型分析	52
仪器前置滤波参数分析	58
观测系统研究	64
宽方位角观测应用研究	64
宽 / 窄方位角勘探实例分析与评价 (一)	72
宽 / 窄方位角勘探实例分析与评价 (二)	77

■ 地震数据处理和地震数据解释

叠前提高分辨率处理	85
大地吸收衰减分析	85
地表一致性统计振幅补偿	94
时频域球面发散和吸收补偿	99
时频空间域球面发散与吸收补偿	107
可控震源自适应地表一致性反褶积	115
非地表一致性噪声压制方法	122
瞬时吸收率检测与高频噪声的剔除	132
纵波 VTI 介质理论与应用研究	143
VTI 介质的 AVO 理论与应用研究	153
叠前相对保持振幅、频率、相位和波形的地震数据处理与评价研究	162

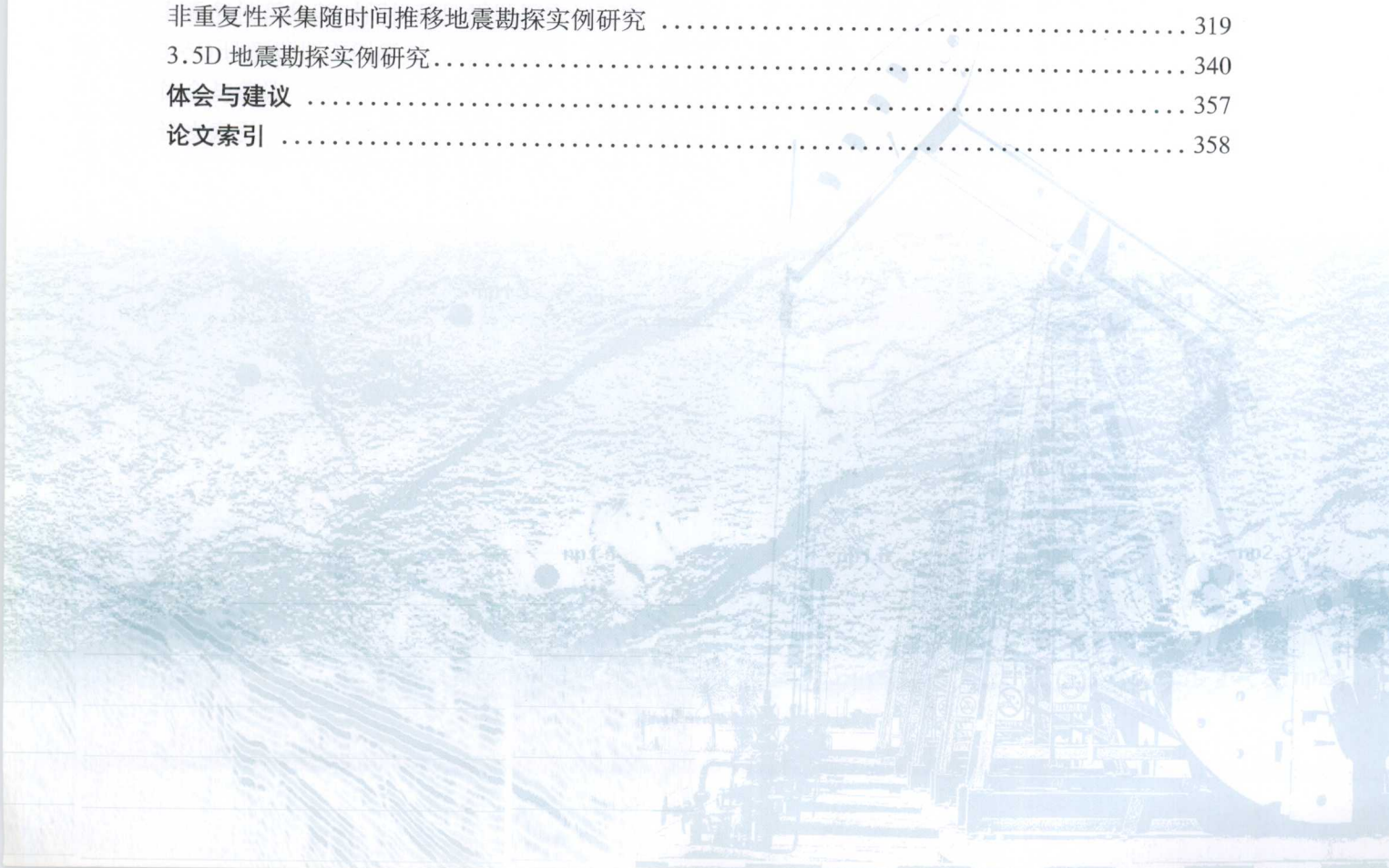
叠后提高分辨率处理	173
叠后零相位同态反褶积	173
应用非线性理论判据求解相交物探信息闭合问题	182
叠后相对保持振幅处理研究	187
叠后与叠前时间偏移成像处理	193
三维 DMO 速度的求取	193
15° 有限差分串联偏移问题讨论和方法改进	197

■ 地震信息与地质解释

测井与地震信息标定研究	210
基本地震属性在沉积环境解释中的应用研究	217
地震分辨率极限问题的研究	228
储层演化地震分析	236
一个被开发证实的隐蔽油气藏解释实例	244
基于三维地震数据的准层序组内砂体的解释研究	250
叠置薄储层的沉积微相解释研究	261
针对不同地质目标的叠前时间偏移成像解释评价	275
基于地质概念的空间相对分辨率地震勘探研究	287

■ 地震勘探与油藏开发

随时间推移 (TL) 地震勘探处理方法研究	311
非重复性采集随时间推移地震勘探实例研究	319
3.5D 地震勘探实例研究	340
体会与建议	357
论文索引	358



地震数据采集和地震数据处理

该部分收录了笔者 12 篇文章。这些文章从近地表干扰波调查和近地表激发、接收的影响分析入手,讨论了不同观测系统对地质目标体成像的影响问题。文章简介如下:

“基于一维弹性阻尼波动方程理论的沙丘 Q 吸收补偿”讨论了近地表沙丘吸收衰减的物理机制和影响问题,并于 1997 年提出了基于一维弹性阻尼波动方程消除其影响的处理方法。该处理方法的主要特点是:不用直接求取子波和提供 Q 吸收衰减量,而是基于沙丘空间起伏变化自动求取沙丘吸收量,最终达到有效补偿近地表沙丘吸收衰减和提高分辨率以及消除沙丘起伏引起的空间时频差异的目的(该方法形成了当时石油物探局研究院处理中心试运行软件)。

“地表一致性变步长预测反褶积与沙丘鸣震的压制”讨论了近地表沙丘鸣震产生的机理和影响问题,并于 1998 年提出了应用变步长地表一致性预测反褶积消除陆上鸣震的处理方法。该处理方法的主要特点是:无需人为提供预测反褶积的预测步长,而是基于近地表风化层厚度自动求取鸣震周期,最终应用变步长地表一致性预测反褶积消除沙丘鸣震干扰(该方法形成了当时石油物探局研究院处理中心试运行软件)。

“近地表散射波的叠后衰减”讨论了由近地表起伏和低降速层的空间速度变化产生的近地表散射的干扰机理和影响问题,并于 2002 年与郭向宇(博士)协作完成了基于二维地震数据的近地表散射干扰波的消除方法研究。该方法的主要特点是:利用波动方程收敛近地表散射波场,并通过识别和空间噪声压制方法消除此类干扰波。

“模型初至地表一致性静校正”讨论了新疆沙漠地区具有连续介质特点的沙丘近地表静校正影响问题,并于 1992 年提出了基于模型初至地表一致性静校正方法。该方法的主要特点是:基于连续沙丘介质的假设,利用包含直达波、折射波、反射波全部初至信息进行静校正计算,从而达到有效提高沙丘静校正精度的目的(该方法形成了当时石油物探局研究院处理中心试运行软件)。

“三维地震数据的分析与检测方法研究”讨论了三维采集数据质量监控和定量与半定量的评价问题,并于 2002 年提出了三维数据采集和数据处理的质量监控方法以及定量和半定量分析方法。该三维数据质量监控方法实现了精细、直观、快速有效的三维空间数据质量监控与处理质量监控,并在大量实际数据采集和处理应用中得到了十分好的效果(该方法目前已部分形成克浪软件,并已申报国家发明专利)。

“方型排列干扰波调查方法研究”基于国际上盒子波野外调查的基础上,讨论了野外近地表干扰波的调查方法以及量化分析方法,并于 2000 年在西藏地区,对实际近地表干扰波进行了实际观测和调查研究。研究表明,方形排列观测方法可以十分有效地获得近地表干扰波速度、方向和大小等参数,并能给出面积组合衰减效果的定量分析结果,它对野外观测系统设计和组合设计具有指导意义(该方法已形成克浪软件)。

“非规则干扰信噪比分析”讨论了地震数据采集中非规则高频干扰波的形成机理和影响问题,并于 2001 年提出了时频域检测和压制此类干扰的方法。通过实际数据试验和应用表明,该方法可以在相对保持振幅的条件下,有效剔除 50Hz 工业电干扰和压制高频随机干扰(该方法形成当时石油物探局研究院处理中心试运行软件)。

“激发药量与药型分析”讨论了如何评价野外激发试验参数(药量、激发药型和激发井深)的问题,并于 2001 年提出了时频和频时分析的综合定量分析方法,该方法可以较准确地求取激发药量和药型引起的激发能量变化,从而指导野外确定采集施工参数(该方法已形成克浪软件)。

“仪器前置滤波参数分析”讨论了如何分析地震采集数据的动态范围问题,并于 2001 年基于时频

域和频时域统计分析方法,求出了实际采集数据的瞬时频率域动态范围,以及时频域信噪比临界点等重要参数,这些参数对更好地应用仪器前置滤波提供了重要的依据(该方法已形成克浪软件)。

“宽方位角观测应用研究”讨论了宽方位角观测的国际发展趋势,并于2002年和新疆油田分公司合作,完成了中国首块全方位角地震数据采集和处理、解释研究,提出宽方位角地震数据采集,在岩性和HTI介质等地质目标的地震勘探中具有广阔的应用前景。

“宽/窄方位角勘探实例分析与评价(一)”针对岩性圈闭和隐蔽型油藏讨论了宽/窄方位角观测的优劣问题,并于2005年提出,在地层较平坦、速度场相对简单和地震数据具有一定信噪比条件下,采用宽方位角(纵横比大于0.5)勘探岩性和隐蔽油藏较窄方位角具有更高的空间成像分辨率。

“宽/窄方位角勘探实例分析与评价(二)”针对裂缝性储层讨论了宽/窄方位角观测的优劣问题,并于2005年提出,当地层相对比较平坦、速度场相对简单和地震数据具有一定信噪比的条件下,采用宽方位角(纵横比大于0.5)勘探HTI介质类储层较窄方位角能获得更直接的裂缝信息和断裂空间展布信息。

综上所述,笔者认为:从单炮和叠加剖面上难以直观获得采集参数试验的评价与分析结果,只有通过特定的观测方法、有效的定量或半定量分析方法,或严格的相对保持振幅、波形的处理、三维空间陡倾角成像,以及沿参考标准层的地震属性评价,最终才能获得正确的采集参数试验评价结论。特别是在极限地震数据采集观测条件下,针对地质目标体的处理和解释评价是找出具有经济价值和使用价值采集参数的最佳方法与途径。这是本部分采用“地震数据采集和地震数据处理”题目的主要原因。

基于一维弹性阻尼波动方程理论的 沙丘 Q 吸收补偿^①

凌 云 高 军 张汝杰
(石油地球物理勘探局研究院)

摘 要 塔克拉玛干沙漠是世界上第二大沙漠,其中最高的沙丘可达 200m 左右。鉴于该地区的短波长静校正已基本解决,目前的主要困难是资料信噪比低,如何进行沙丘吸收补偿?为此,本文从沙漠地区实际地震资料分析入手,提出了基于一维弹性阻尼波动方程的沙丘 Q 吸收补偿方法。这一方法不仅克服了低信噪比资料中求取子波的困难,而且避开了沙丘起伏引起的激发能量、频率变化影响问题,能较好地补偿沙丘起伏引起的 Q 吸收衰减,并通过实际数据的试算,获得了较好的效果。

关键词 一维弹性阻尼 波动 Q 吸收补偿 沙丘 信噪比 分辨率

引 言

塔里木盆地的塔克拉玛干沙漠是世界上第二大沙漠。沙漠区地震勘探的首要问题是静校正问题。通过多年的勘探与实践,已找到了基于沙丘曲线的静校正方法,基本上解决了沙漠区的短波长静校正问题。目前影响勘探精度的主要问题是资料的信噪比和分辨率问题。

多年来,为提高沙漠地区地震资料的信噪比,物探工作者作出了不懈的努力。因为只有在高信噪比的资料中才能获得较高的速度场精度、剩余静校正和反褶积效果,最终才能获得高分辨率的成像剖面。但是,一味地提高信噪比又会造成诸如有效波的高频损失,波形畸变,剩余静校正和信噪比的交叉影响问题。因此,在采取提高资料信噪比的措施时,务必谨慎从事。

如果我们能在一定程度上提高资料的分辨率,并使沙丘上、下激发和接收的信号得到补偿,这将有助于提高资料的分辨率、信噪比和静校正精度。

回顾现有的许多提高分辨率和整形处理技术,大多是通过从地震道求取子波来实现的。这样,如何求取子波就成了提高分辨率处理的关键步骤。地表一致性反褶积和统计子波反褶积是通过地表一致性统计方法提取地震子波实现反褶积的处理方法。对于低信噪比数据,或在沙丘不同高度激发、接收,从一个炮集,或一个检波点集提取子波时,求得的子波均存在多解性。另外,时窗和炮检距选择不当,也会引起炮与炮、检波点与检波点间求出的统计子波发生剧烈变化,并不能很好地反映各点地表一致性子波特点,造成反褶积难以达到提高分辨率和补偿近地表差异的目标。因此,在设计地震数据处理流程时,应考虑噪声类型和提高信噪比处理,然后再进行反褶积。去噪方法对信号波形产生的畸变往往被忽略,这将影响地震数据的成像分辨率和储层信息可信度。

为了避免时窗、炮检距、沙丘起伏和噪声等对求取子波的影响,本文提出了基于一维弹性阻尼波动方程的波场延拓沙丘 Q 吸收补偿方法,从而达到真正基于物理方程的沙丘 Q 吸收补偿,而无需提取子波。尔后可以再进行去噪和静校正处理。

方 法 原 理

在沙丘上、下不同部位激发和接收的地震波能量、频率、相位和波形存在很大的差异。图 1 给出

① 本文源自:石油地球物理勘探,1997,32(6):795~803。

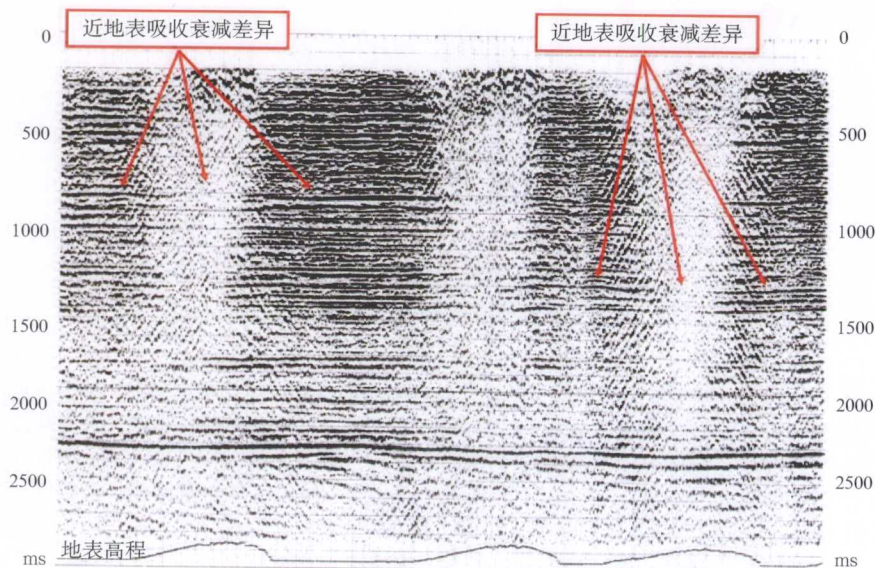


图1 沙漠区实际地震叠加数据的纯波显示

塔克拉玛干沙漠地区的叠加数据。从图1中的地表高程曲线可以看出，这段剖面穿过三个沙丘（最高达150m）；由于沙丘吸收作用，对应沙丘部位的振幅和频率明显降低。为了查清沙丘上激发和接收两者是否存在很强的吸收，做如下分析。

图2给出1000m共炮检距纯波显示数据。从图2中可看出信号振幅和频率在穿越沙丘时存在明显变化。从图3和图4（沙丘上、下激发的共炮检距1000m的纯波显示）中可以看出，在穿越沙丘不同位置时，地震信号的振幅和频率随之变化。从沙丘上、下激发的共炮集统计频谱（如图5a和图5b所示）的对比中可看出，在沙丘上激发时，振幅随频率的吸收远大于沙丘下激发的吸收作用。

而从沙丘上（图6）和沙丘下（图7）接收时的1000m炮检距纯波显示图对比中难以明显看出其差别，显然在沙丘上和沙丘下接收对振幅和频率的影响相对要小。这表明在沙丘上激发是振幅衰减和随频率吸收的主要原因。接收点也影响振幅和频率，但不是主要因素。从而也表明，在沙丘上激发，

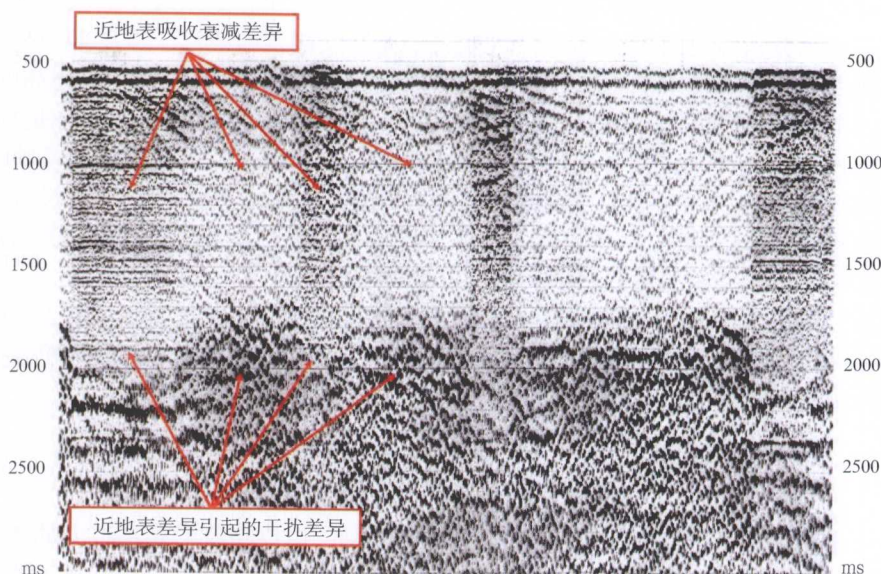


图2 1000m 共炮检距数据的纯波显示

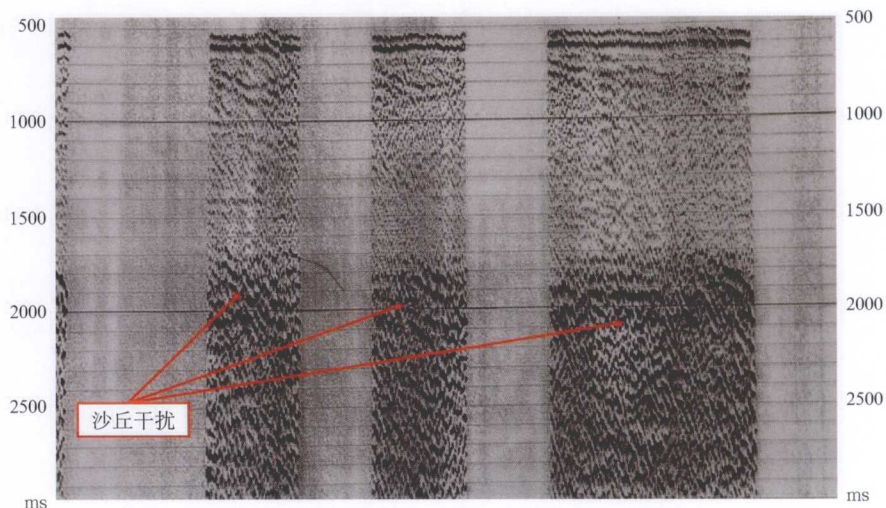


图3 沙丘上激发 1000m 共炮检距数据的纯波显示

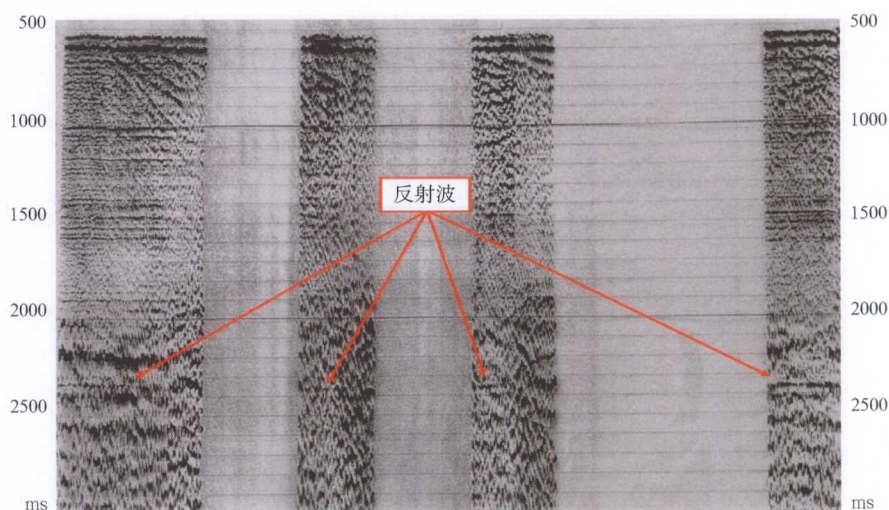


图4 沙丘下激发 1000m 共炮检距数据的纯波显示

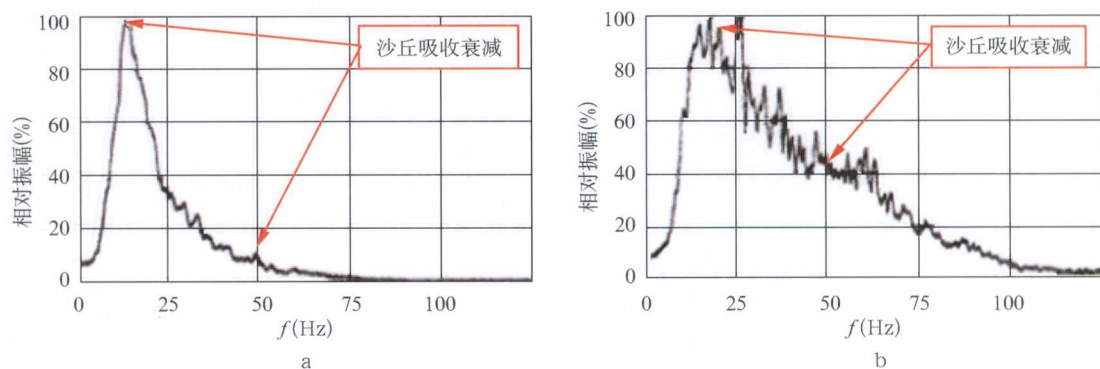


图5 在沙丘上 (a)、下 (b) 激发的统计频谱分析

波场传播可能会引起相对较大的沙丘吸收作用，这也是本文研究沙丘 Q 吸收和补偿的主要原因。

从以上分析可以看出，在沙漠要想获得高分辨率地震成像结果，应尽可能在沙丘下激发。但实际沙丘分布又是我们必须面对，有时是无法避免的。同时在尽量选择沙丘下激发时，也会引起缺炮和大、

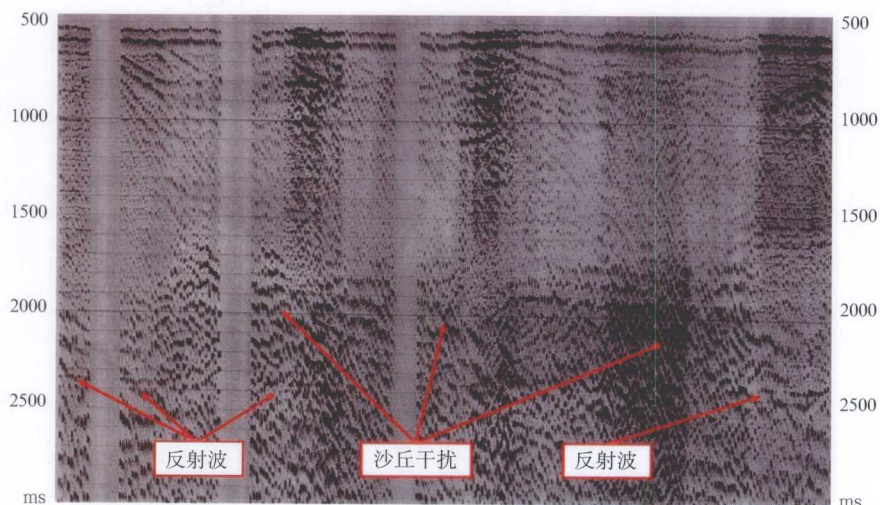


图6 沙丘上接收 1000m 共炮检距数据的纯波显示

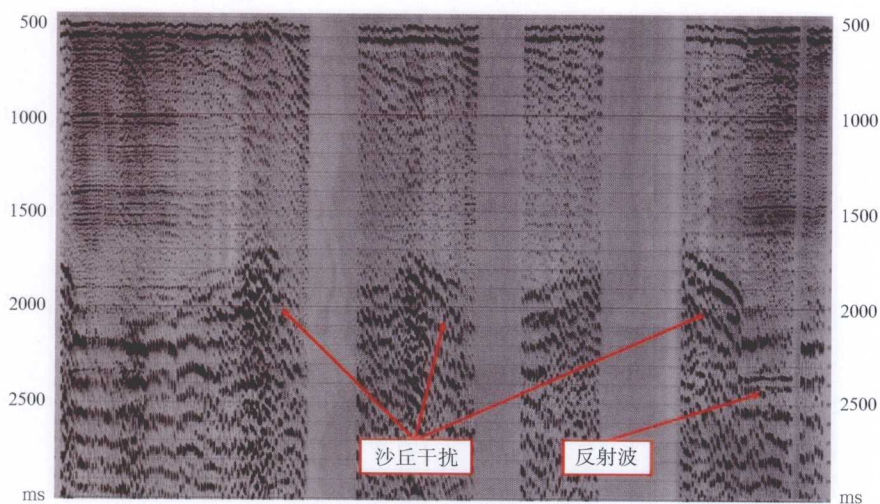


图7 沙丘下接收 1000m 共炮检距数据的纯波显示

小炮检距分布不均,以及覆盖次数不均和叠加缺口等问题。所以,如何解决沙丘上激发和接收的 Q 吸收补偿成为沙漠高分辨率勘探中数据处理的关键环节。

通过分析表明:沙丘上激发是提高分辨率的主要矛盾,而接收点仅是次要因素。显然,共炮点的沙丘吸收补偿是主要问题,同时也会想到用地表一致性反褶积和统计子波反褶积来实现沙丘 Q 吸收的补偿。但存在以下影响:①在沙丘起伏变化剧烈时,每炮中的噪声干扰(如面波和次生干扰等)不同,难以获得正确的统计子波;②沙丘的起伏变化会引起接收点对炮点统计子波的影响;③时间方向的时窗选择,及炮检距选择对求准统计子波有较大影响。

为此,本文基于已知静校正量的前提下,提出了一维弹性阻尼波动方程延拓的沙丘 Q 吸收补偿方法。这一方法回避了求取子波的种种困难,根据在沙丘不同位置的激发点进行符合物理意义的沙丘 Q 吸收补偿。

基于波动理论进行一维波场延拓实现沙丘 Q 补偿,必然要分析沙丘吸收的物理机制。波传播过程中的介质吸收量,这在数学上属于非完全弹性体的传播问题。描述这一物理过程有两种理论:一种是黏弹性波动理论,基于剩余应变消耗弹性能量引起振幅衰减;另一种是源于内摩擦理论提出的弹性阻尼波动理论,基于机械能转化为热能引起振幅衰减。下面分别给予讨论。

黏弹吸收

一维黏弹性纵波波动方程为

$$\rho \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \left[(\lambda + 2\mu) + \left(\lambda' + 2\mu' \frac{\partial}{\partial t} \right) \right] \Delta \varphi \quad (1)$$

式中: λ 、 μ 是弹性介质中的拉梅常数; λ' 、 μ' 是黏滞系数; ρ 为介质密度。

设其平面波的解为

$$\varphi = A e^{i\omega t - i(f + i\alpha)z} \quad (2)$$

式中: α 为介质的吸收系数; f 为波数。它们的表达式为

$$f = \left\{ \frac{\rho \omega^2 (\lambda + 2\mu)}{2[(\lambda + 2\mu)^2 + (2\mu')^2]} \left[\left(1 + \frac{\omega^2 (2\mu')^2}{(\lambda + 2\mu)^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\alpha = - \left\{ \frac{\rho \omega^2 (\lambda + 2\mu)}{2[(\lambda + 2\mu)^2 + (2\mu')^2]} \left[\left(1 + \frac{\omega^2 (2\mu')^2}{(\lambda + 2\mu)^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

当 $(\lambda + 2\mu) \gg \omega^2 \mu'$ 时

$$\begin{cases} \alpha \approx F(\omega^2) \\ f \approx \frac{\omega}{V_p} \end{cases} \quad (5)$$

其解为

$$\varphi = A e^{i\omega t} e^{i f z} e^{\alpha z} \approx A e^{i\omega t} e^{-\frac{i\omega z}{V_p}} e^{F(\omega^2)z} \quad (6)$$

代入边界条件, 则有

$$\varphi(\omega, z) = \varphi(\omega, 0) e^{-\frac{i\omega z}{V_p} + F(\omega^2)z} \quad (7)$$

上式表明, 从地表传播到深度 z , 黏弹性介质的吸收和频率的平方成正比。

弹性阻尼吸收

一维弹性阻尼纵波波动方程为

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + b \frac{\partial \varphi}{\partial t} = c^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \quad (8)$$

式中: b 为阻尼系数; c 为波速。

设解为

$$\varphi = A e^{i\omega t} e^{-i(f + i\alpha)z} \quad (9)$$

代入公式 (8) 有

$$c^2(f^2 - \alpha^2) - \omega^2 + i(b\omega + 2\alpha f c^2) = 0 \quad (10)$$

则有

$$\begin{cases} c^2(f^2 - \alpha^2) - \omega^2 = 0 \end{cases} \quad (11a)$$

$$\begin{cases} b\omega + 2\alpha f c^2 = 0 \end{cases} \quad (11b)$$

将式 (11b) 换算为 $f = -\frac{b\omega}{2\alpha c^2}$, 代入式 (11a) 中求得

$$\begin{cases} \alpha = -\frac{\omega}{\sqrt{2}c} \left[\left(1 + \frac{b^2}{2\omega^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \end{cases} \quad (12a)$$

$$\begin{cases} f = -\frac{b}{\sqrt{2}c \left[\left(1 + \frac{b^2}{2\omega^2} \right)^{1/2} - 1 \right]} \end{cases} \quad (12b)$$

令: $Q = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\left(1 + \frac{b^2}{\omega^2} \right)^{1/2} - 1}}$, 则式 (12b) 可简化为

$$\begin{cases} \alpha = -\frac{\omega}{Qc} \end{cases} \quad (13a)$$

$$\begin{cases} f = \frac{Qb}{2c} \end{cases} \quad (13b)$$

当 $\omega \gg b$ 时, 则有

$$\begin{cases} \alpha = -\frac{b}{2c} \end{cases} \quad (14a)$$

$$\begin{cases} f = \frac{\omega}{c} \end{cases} \quad (14b)$$

式 (14) 表明在频率大于 b 时, 吸收和摩擦系数成正比, 与频率无关; 否则吸收与频率成正比, 吸收量决定于 Q 的大小。这时引起时间滞后的现象, 解为

$$\varphi(\omega, z) = \varphi(\omega, 0) e^{-i\frac{Q\omega}{2c}z} e^{-\frac{Q\omega}{2c}z} \quad (15)$$

当 $\omega \gg b$ 时, 有

$$\varphi(\omega, z) = \varphi(\omega, 0) e^{-i\frac{\omega z}{c}} e^{-\frac{bz}{2c}} \quad (16)$$

推导分析

分析以上两种理论, 可得出以下结论:

首先是在地震波吸收时间无滞后现象时, 有两种可能: ①黏弹性吸收, α 与 ω^2 成正比 [式 (5)]; ②弹性阻尼吸收, $\omega \gg b$, α 与 ω 无关 [式 (14a)]。

其次是在地震波吸收有时间滞后现象时, 也存在两种可能: ①黏弹性吸收 [式 (4)]; ②弹性阻尼吸收, α 与 ω 成正比 [式 (13)]。

通过以上分析可知, 在沙丘上激发, 地震波场的传播过程存在两个阶段: ①瞬间脉冲激发阶段, 它会产生强烈的内摩擦, 将波动的机械能转换成热能, 引起振幅的强衰减 [满足式 (14), 吸收与频率无关, 没有滞后现象]。实际采集数据如图 2 所示, 沙丘上激发时振幅明显衰减, 并和频率关系不大; ②瞬间激发后的传播阶段, 这时吸收与频率成正比。采用下式

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N [\ln X_m(f) - \alpha f]^2 \quad (17)$$

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N [\ln X_m(f) - \alpha f^2]^2 \quad (18)$$

对沙丘上、下激发的统计频谱 (图 5a 和图 5b) 进行拟合分析, 其中式 (17) 的拟合误差小于式