

沈鸿雁,王鑫,李欣欣.近地表结构调查及参数反演综述[J].石油物探,2019,58(4):471-485

SHEN Hongyan, WANG Xin, LI Xinxin. Near-surface structure survey and parameter inversion review[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(4): 471-485

近地表结构调查及参数反演综述

沈鸿雁^{1,2}, 王 鑫¹, 李欣欣^{1,2}

(1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西西安 710065; 2. 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西西安 710065)

摘要: 如何消除近地表对地震波场造成的影响是高分辨率反射地震勘探需要解决的核心问题之一。复杂的近地表地震-地质条件不但会严重影响采集参数的选择, 而且会引起地震波能量被强烈吸收和衰减, 并导致严重的静校正问题, 获得精细的近地表结构特征及准确的参数模型是解决这些问题的关键。概述了近地表基本地质特征及其对地震波场的影响, 回顾了近地表结构调查的方法和手段, 系统总结了当前近地表地震波能量吸收衰减与 Q 补偿、速度反演与近地表结构参数建模的研究现状, 深入分析了目前近地表结构参数获取及建模存在的问题和面临的挑战, 针对日趋复杂的近地表地震-地质条件和地震资料“三高”处理要求的不断提高, 指出未来仍然需要在近地表地震波场传播规律及能量吸收衰减机理、联合反演、全波形反演、反射资料中的面波成像等方面进行持续深入的研究, 以期获得精度更高的近地表结构及参数模型, 使近地表对地震波场造成的不利影响得到有效控制。

关键词: 近地表; 结构调查; 能量吸收与补偿; Q 值; 层析成像; 反演; 速度建模

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-1441(2019)04-0471-15

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1441.2019.04.001

Near-surface structure survey and parameter inversion review

SHEN Hongyan^{1,2}, WANG Xin¹, LI Xinxin^{1,2}

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. Shaanxi Key Laboratory Oil and Gas Accumulation Geology, Xi'an 710065, China)

Abstract: The adverse effects of near-surface structures on the seismic wave field are one of the core issues that need to be addressed in high-resolution reflective seismic exploration. Complex near-surface seismic-geological conditions can seriously affect the selection of acquisition parameters, and cause strong absorption and attenuation of seismic energy, prompting a serious static correction. Obtaining fine near-surface structural features and accurate parametric models is the key to solve these issues. In this paper, the basic near-surface geological features and their effects on the seismic wave field are summarized. The methods and techniques of near-surface structure investigation are reviewed. The research status of current near-surface seismic wave energy absorption attenuation and Q compensation, velocity inversion, and near-surface structure parameter modeling are summarized systematically. The problems and challenges in the acquisition and modeling of near-surface structure parameters are analyzed. It is pointed out that the near-surface seismic-geological conditions are becoming more and more complex, and seismic data processing is becoming increasingly demanding. Further research is required in the future on the near-surface seismic wave field propagation law, energy absorption and attenuation mechanisms, joint inversion, full-waveform inversion, and surface wave imaging in reflection data. It is expected that such research will lead to more accurate identification of near-surface structures and parametric models, so that the adverse effects of poorly characterized near-surface structures on the seismic wave field will be reduced.

收稿日期: 2019-04-29; **改回日期:** 2019-05-16。

作者简介: 沈鸿雁(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事油气地震勘探和近地表地球物理勘探方面的教学和研究工作。Email: shenhongyan@xsyu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(41874123)、中国石油科技创新基金项目(2014D-5006-0303)和陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2017JZ007)共同资助。

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.41874123), the PetroChina Innovation Foundation (Grant No.2014D-5006-0303) and the Shaanxi Province Natural Science Basic Research Project (Grant No.2017JZ007).

Keywords: near-surface, structure survey, energy absorption and compensation, Q value, tomography, inversion, velocity modeling

在地震勘探过程中,近地表是一个十分特殊的地层范畴,一般指地表以下未成岩的低速介质区,厚度从几米至数百米不等^[1]。实际上,除了地面以下复杂的低降速带以外,近地表还包括起伏的地表因素。近地表地层除了结构、物性、含水性、风化程度、形成年代等存在差异外,在环境、温度、气候等不同时,表现出来的弹性属性也千差万别。虽然近地表不是油气勘探的目标层,但它的存在却对深部油气藏勘探有着重要意义,正因为有近地表低降速带的存在,才使得各种高频干扰被吸收,并保证了地震波能量能够顺利地传播到地层深处。然而,复杂的近地表地震-地质条件也严重影响着地震资料采集的品质和最终的数据处理质量,概括起来主要包括震源激发及接收条件差、地震波能量吸收与衰减和静校正问题突出等^[2-10]。具体来说,震源激发条件不理想必将导致地震子波的品质下降;疏松的近地表地震-地质条件则会引起地震波能量被强烈吸收和衰减,并由此产生诸如低频面波等干扰噪声,从而降低地震资料的信噪比和分辨率;起伏的地表及复杂的近地表地层结构会带来严重的静校正问题,并由此影响到后续的速度分析、动校正、水平叠加和偏移成像等处理环节的质量。如果上述问题得不到有效解决,必将造成最终的地震勘探成效下降。

要想消除复杂近地表因素带来的影响,必须对近地表结构有清晰的认识,并在此基础上获得准确的结构参数模型(如品质因子 Q 值模型、层速度模型等)。为此,人们在近地表结构调查^[11-16]、近地表介质的吸收衰减与补偿^[17-24]、近地表速度建模及静校正^[1,25-30]等方面开展了大量的研究工作。本文回顾了近地表结构调查的方法和手段,总结了当前近地表对地震波能量的吸收衰减与补偿、近地表速度反演与结构参数建模的研究现状,分析了目前近地表结构参数获取及建模存在的问题和面临的挑战,展望了近地表结构研究领域未来的发展方向。

1 近地表结构调查方法与技术

近地表结构调查是指围绕近地表介质的地质和物理特征开展相关的研究工作,调查内容主要包括低降速带的速度、厚度、埋深、横向变化规律及近地表起伏状况等。近地表结构实际上就是低降速带的结构,具体包括地表低速层和降速层两个部分。低速层主要指暴露于大地表层不胶结的松散介质层,厚度一般

较小;降速层位于低速层之下,通常成不胶结或半胶结状态;而高速层则指成岩地层。在大部分地区,由于地表接受连续或间断的沉积,低降速带具有良好的成层性,存在明显的速度分界面;在山区或山前地带,高速层顶界面起伏剧烈,近地表介质在横向或纵向上不存在明显的连续性,速度变化大,甚至缺失低速层或降速层,或基岩直接出露地表;在沙漠覆盖区,往往沙层巨厚,介质单一,低降速层之间并没有明显的速度界面,在压实作用下,常常表现为速度随深度递增的连续介质特征。实际上,低降速带的划分并没有严格的定义,通常将近地表介质按速度划分为低速层(速度 < 1000 m/s)、降速层(速度介于 $1000 \sim 2000$ m/s)和高速层(速度 > 2000 m/s)^[1]。

在地震数据采集过程中,近地表结构调查是一项非常重要的基础工作。近地表的岩性不同会造成震源激发的子波、频率、能量等存在较大差异,而接收条件不理想则会产生严重的干扰噪声。为了能够采集到高品质的地震数据,必须选择合理的采集参数,而近地表结构是合理选取震源激发参数及地震波接收方式的重要依据^[12,14-15]。此外,在地震波传播过程中,受地面各种地质因素及近地表地震-地质条件的影响,地震波的传播会发生相应的改变,地震波的强度和稳定性也随之发生变化。不同的地表起伏情况、近地表结构、物性、风化程度、含水性等表现出来的地震响应特征显著不同。为了有效消除近地表因素导致的地震波能量吸收衰减、波形畸变、旅行时延迟等问题,需要获得准确的近地表结构及诸如速度、品质因子 Q 值等参数模型,选择针对性方法和技术,实施有效的补偿、校正或处理。

目前广泛使用的近地表结构调查方法主要有小折射和微测井两种^[31-32]。微测井是在穿过低降速带的井中激发、地面接收(或反之)的地球物理调查方法,利用透射波垂直时距曲线来计算地层速度和厚度等参数,进而划分低降速带^[33]。实践表明,该方法获得的近地表结构及参数较为准确,尤其对于低降速层较厚、速度变化大的表层结构,其计算精度优于其它近地表结构调查方法,且该方法基本不受地表条件的限制,适用范围广。随着近地表复杂地质问题的不断发现,该方法技术也在不断完善和拓展。例如,针对低速层、虚反射及近震源区导致的地震波衰减与补偿,李子顺^[34]、于承业等^[32]、张文等^[22]先后采用双井微测井调查近地表结构;翟桐立等^[35]则提出了一种深井激发、浅井和地面短排列联合接收的井地一体化

调查方法;为了改善检波器耦合特性及接收信号的一致性,李天树等^[16]提出了井中多极接收微测井调查方法;李桂花等^[13]利用三分量微测井技术同时获得纵、横波速度。微测井方法成本较高,而且效率偏低,一般仅用于近地表结构调查的控制点测量。此外,该方法通常井深有限,当近地表速度横向变化较大时,有限的微测井难以控制表层结构的横向变化。小折射是一种根据折射定律、通过直达波和折射波时距曲线计算近地表地层速度、厚度和埋深的近地表结构调查方法。该方法的优势在于操作简单、成本低、效率高,适用于地表平缓、近地表结构简单且低降速带变化较小的区域^[36]。对于地形起伏剧烈、表层速度变化大、无明显折射层、存在低速或高速夹层的地区,该方法的应用受到限制。随着勘探技术的发展,在传统纵波小折射的基础上发展了联合纵、横波研究近地表结构的三分量小折射技术^[37]。

除上述两种传统的近地表结构调查方法外,浅层反射波法、面波法、高密度电法、瞬变电磁法、探地雷达、工程 VSP 以及地质露头调查等也在近地表结构调查中发挥了积极的作用,取得了一定的效果^[11,31,38]。每一种调查方法均有各自的适用条件和应用范围,可视具体的近地表地质-地球物理勘探条件来选择使用。

2 近地表介质的能量吸收衰减与补偿

当地震波穿过地层时,会发生能量吸收和衰减,导致地震信号频带变窄、分辨率下降。地震波的能量吸收衰减和频散特性与地层的物质组成、孔隙度、充填物及饱和度等密切相关,可通过地层品质因子 Q 来描述^[39]。近地表地层具有压实作用弱、结构复杂且疏松、非均质性强、各向异性发育、速度变化快、泊松比高等特点,地震波在其中传播时受大地滤波作用的影响十分严重,往往会引起地震信号的高频成分快速衰减和频带变窄,地震子波的能量也快速减弱并伴随相位畸变,而且近地表地震-地质条件越复杂,这种吸收衰减效应越严重。

为了消除近地表因素造成的地震波能量吸收衰减带来的不利影响,必须对能量进行补偿。掌握地震波能量吸收与衰减的机制是准确描述地震波在近地表介质中的传播规律并进行地震波振幅和相位补偿的基础^[40]。早在 20 世纪 60 年代初,FUTTERMAN^[17]就开展了相关研究工作,明确了岩石对地震波的吸收衰减是地层的基本特性。然而,不同地区的近地表地层结构特征及物性存在不同程度的差异,即

使同一地区,低降速带的变化也不一定相同,从而导致地震波的吸收衰减机制十分复杂。因此,全面弄清地震波吸收衰减的原因并对其进行补偿不是一件轻而易举的事。尹喜玲等^[41]以沙漠覆盖区的近地表吸收衰减问题为例,采用线性过渡体理论探讨了近地表介质的吸收衰减规律,认为近地表普遍存在速度界面,多次反射和透射损失是造成地震波能量衰减的重要原因;李合群等^[5]认为,沙漠地区除沙层吸收衰减之外,震源子波差异、检波器耦合差异等因素也是导致地震资料品质下降的一个重要原因;此外,地震记录中强烈的震源近场影响,也极大地增加了地震波衰减补偿参数估算的难度^[42]。

尽管如此,人们仍然孜孜以求,试图全面揭开近地表因素导致地震波吸收衰减的机理并给予充分的补偿。目前已经认识到品质因子 Q 值是描述介质吸收衰减强弱的基本参量,其本身就反映了地表的岩石物理特性,因此,提取近地表 Q 值参数并对地震信号进行反 Q 滤波,就可以有效消除近地表因素对地震波场造成的影响,达到补偿能量、提高地震信号分辨率和进行相位校正的目的。该技术的关键是建立高精度的近地表 Q 值模型^[43-44],由于地层吸收会导致能量衰减、改造地震子波并使其某些动力学特征发生变化,因此可以基于不同的子波特征变化实现相应的 Q 值计算。在这一理论指导下,目前已发展了多种 Q 值估算方法,具体包括上升时间法^[45]、振幅衰减法^[46]、谱比法^[18]、解析信号法^[47]、质心频移法^[48-52]、峰值频率法^[53-54]和能量比法^[55]等。其中振幅衰减法和谱比法是两种传统的并被广泛使用的 Q 值计算方法,它们均利用地震波能量的线性衰减速率定量估算品质因子 Q 值。由于振幅受几何扩散、反射、透射等效应的影响较大,因此仅由振幅衰减很难准确估算出非弹性介质对地震波的吸收情况^[23],尤其对于 Q 值小于 30 的近地表强衰减情况,补偿效果会更差。子波振幅谱质心频率下降或波形加宽等衰减特征受上述因素影响较小^[23,56],因此,质心频移法可以获得更加稳定和可靠的 Q 值。目前认为该方法比较通用,且 Q 值计算精度比较高。王晓涛等^[57]通过修正传统的能量比法并利用地震波能量的指数衰减速率估算 Q 值,减小了常规方法的理论误差,也取得了一定的补偿效果。此外,基于波场外推原理的近地表吸收衰减补偿^[58]、震源与地震记录波形互相关计算品质因子 Q 值^[59]、时间域利用 Levinson 算法及频率域利用傅里叶变换求取近地表吸收补偿因子^[20]、改进的广义 S 变换地层吸收衰减补偿^[60]、双线性回归估算 Q 值^[61]和基于多信息融合估算 Q 值^[23]等方法,均见到

了有益的补偿效果。

在近地表吸收衰减调查方面,微测井是一种应用较为广泛的技术^[62]。然而,由于激发岩性、能量大小等因素的影响,不同井深激发的地震子波存在明显差异^[35],加之检波器耦合性不一致、震源近场和干扰波影响等因素的存在,基于微测井资料求取的品质因子 Q 值实际应用效果仍然欠佳。为此,李伟娜等^[61]探索了基于微测井提高 Q 值估算精度的途径。双井微测井是求取近地表地层 Q 值的另一项技术,李子顺^[34]利用双井微测井资料计算 Q 值,并用其对地震资料实施确定性反褶积处理,在补偿由近地表低速层、虚反射及近震源区导致的地震波衰减方面,优于传统方法的处理效果;于承业等^[32]、张文等^[22]利用双井微测井资料、通过频移法计算近地表 Q 值,并指出近地表衰减补偿能够在时间、空间和频率三域内有效消除近地表因素带来的不利影响。从现有的技术来看,通过双井微测井资料估算 Q 值的效果明显优于常规微测井。然而,双井微测井同样存在不同震源间的子波有差异、检波器耦合一致性难以保证、容易受其它波场干扰等问题,影响其测量精度。针对常规微测井近地表 Q 值估算面临着激发与接收耦合的一致性差、虚反射以及震源近场的影响等问题,翟桐立等^[35]提出了一种深井激发、浅井和地面短排列联合接收的井地一体化测量近地表 Q 值的方法,有效避免了低速层底部界面虚反射对子波的干涉,最大限度保证了激发和接收的耦合一致性。

除了传统的利用透射波和直达波估算 Q 值以外,目前还发展了利用反射波、面波等计算 Q 值的方法。刘学伟等^[63]、裴江云等^[64]将面波进行几何扩散校正后,用其反演风化层的 Q 值,进而补偿风化层对反射波的吸收,有效提高了反射地震资料的分辨率;NIZARE 等^[65]利用折射波和反射波的振幅及频率变化特征,基于表层模型反演估算近地表 Q 值;LI 等^[21]通过井地联合地震观测对近地表吸收进行实验分析,并提出了一种不受激发因素影响的吸收参数层析反演方法。这些方法技术的出现,极大地方便了近地表地震波能量的吸收衰减与补偿,推动了高分辨率反射地震资料处理技术的向前发展。

3 近地表速度反演与建模

近地表地层在沉积时间、构造形态、岩性、压实程度、环境、含水量及地表起伏情况等方面的差异,导致了近地表异常,影响地震波在其中的传播。除了发生能量吸收衰减效应以外,还会产生传播方向的改变,

引起旅行时超前或延迟。地震波旅行时超前或延迟对于地震资料的处理及解释极为不利,必须予以校正,这就是通常所说的静校正。做好静校正的前提条件和基本保障是获得精确的低降速带速度模型。如果构建的近地表速度模型不准确,则会直接影响地震资料的静校正处理质量,并进一步影响到反射波速度分析、动校正、水平叠加及偏移成像等后续环节的处理质量,从而导致地震成像质量下降^[29,66]。此外,精确的偏移成像高度依赖于速度模型的精确程度,不仅要求深层的速度精确程度高,而且也要求浅层的速度精确程度高。浅层速度模型不精确时,其对地震波场引起的误差也会传递到深层,最终引起成像质量下降^[4,67-69]。因此,获得精确的近地表速度模型对于复杂地区的地震成像精度具有十分重要的意义。

目前,近地表速度获取方法和手段已经取得了可喜的进展,并发展出多种方法技术,总体上可归结为测量方法和反演方法两大类。测量方法包括微测井和小折射,反演方法则是利用地震波携带的信息重建地下速度及结构模型。由于覆盖次数不足和缺少近地表反射波,叠加速度分析和偏移速度分析一般很难得到有效的速度信息,而测量法因成本较高、效率偏低等受到限制,因此速度反演越来越受到人们的青睐和重视^[70]。目前,近地表速度反演已发展了初至波走时层析反演、初至波波形层析反演、初至波走时-波形联合层析反演、全波形反演和面波频散曲线反演等多种方法^[66]。

地震层析成像始于 BIOS 等^[71]的井间速度结构成像研究,由于层析成像能够有效重构目标介质的物性参数分布特征及规律,该技术已成为研究地球内部结构、构造的重要手段之一,并被广泛应用于地球物理勘探的各个领域^[72]。目前该技术也逐渐被拓展应用于近地表速度结构研究领域。近地表层析速度反演依据费马原理、利用实际数据和理论模型的初至波旅行时来反演近地表低降速带的速度、埋深和厚度等信息,所用的初至信息包含直达波、折射波和回折波(潜波或潜水波)。不同性质的初至波反映了不同近地表介质模型及性质,直达波主要反映均匀介质属性,折射波反映均匀层状介质属性,回折波(潜波或潜水波)则反映了连续介质属性,因此层析反演特别适用于较复杂的近地表速度结构成像^[26]。面波在反射地震勘探中通常被当作干扰波被剔除,近年来的研究表明,反射地震资料中的面波也是值得利用的一种有效波^[73]。由于面波能量强,主要沿地表附近传播,而且具有抗干扰能力强、对速度变化反应敏感、探测精度高等优点,因此这种传统意义上的“干扰波”频散曲

线反演也逐渐在近地表结构及速度建模中发挥了积极的作用。

3.1 走时层析反演成像

走时层析反演成像是一种利用地震初至波走时重建地下介质速度及结构的方法^[74]。地震初至波是从震源出发、经地下介质最先到达接收点的地震波,主要在近地表传播,其走时必然携带了大量的近地表结构及速度信息^[70],且能量强、易追踪。初至波走时层析成像具有简单、直观和通用等优点,因此近地表结构及速度反演中得到了广泛的应用。近地表速度建模的主要目的之一是获得精确的静校正量^[75-78],层析成像可有效解决因近地表速度变化引起的静态时移和构造成像等问题^[79]。李录明等^[80]研究表明,初至波层析反演能适应速度横向变化,获得精度较高的近地表速度模型。陈云峰等^[81]利用层析成像方法反演近地表速度模型,获得了较为准确的近地表低速带速度变化情况;李福中等^[82]将初至层析反演应用于三维地震资料处理,精确重建了风化层和低速带的速度结构模型。目前,走时层析反演已逐渐从高频近似的射线理论^[83]发展到更加精确的波动理论^[84],从线性反演发展到了非线性反演^[85-86]。

层析成像的理论基础是 Radon 变换。受地震观测方式的限制,层析成像解具有非唯一性,或非全空间投影特征^[87]。数据和射线的不均匀覆盖决定了层析反演在数学上是一个混定方程组,因此初至波走时层析成像在本质上属于不适定问题^[70],在反演过程中必须采取有效的措施加以约束,才能防止可能出现的畸变,加快收敛速度,提高反演的稳定性和精确性。常用的方法是在反演过程中加入先验信息来约束反演进程,近地表结构调查资料(如微测井和小折射)是先验信息的直接来源,这些信息除了直接用于构建层析反演的初始模型外,还可用于限制反演过程中地层速度的分布范围^[88]。此外,为有效避免多解性,在反演过程中需要进行正则化处理并辅以适当的最优化。ZHANG 等^[85]提出了正则化非线性折射波走时层析成像方法,CLAPP 等^[89]利用正则化方法将已知地质信息融入到层析成像反演算法中以提高成像精度,刘玉柱等^[90]通过正则化方法将先验信息引入到初至波层析成像方程中以取代传统的外部约束,FOMEL^[91]采用正则化方法对模型进行平滑处理,王薇等^[92]采用非线性稀疏约束正则化方法并采用对偶方法求解稀疏约束泛函的极小值,有效提高了不连续介质模型的边缘识别能力,崔岩等^[70]建立了 Tikhonov 正则化层析成像反演模型,并采用加权修正步长的梯度下降算法求解极小化问题。针对三维地震初至走时层析

成像数据量大、计算速度慢等问题,NOBLE 等^[93]将伴随状态法引入到层析反演中,实现了并行运算,有效解决了大数据量计算的问题。

射线追踪是走时层析的核心技术之一^[94-95],射线追踪正演算法的计算精度和速度直接影响着层析反演的精度和运算效率。目前,射线追踪算法已经发展了打靶法^[96]、试射法^[97]、有限差分求解程函方程法^[98-99]、最短路径法^[100-101]、波前法^[102]、走时线性插值法^[103]和快速行进法(Fast Marching Methods,简称 FMM 法)^[104]等。虽然方法很多,但不同方法适用的条件不尽相同,计算效率和精度也有所差异,在实际应用中,需要综合考量近地表结构的复杂程度、要求精度以及运算成本等因素之后,再加以选择。

地震层析成像是非线性反演问题,具有非线性、多解性、局部病态等特点。此外,弯曲射线、大扰动、有限频带、数据覆盖不均匀、有限观测角及参考模型引起的非线性误差等问题也不容忽视^[105]。对于层析成像的目标函数求解,目前也发展了多种方法,如 WHITE^[83]通过阻尼最小二乘法求取近地表的速度和层厚度;李录明等^[106]将近地表模型离散成矩形单元网格,并采用阻尼最小平方 QR 分解(简称 DLSQR 算法)求解稀疏矩阵;张建中^[107]利用双线性函数表示近地表速度单元,并采用 LSQR 解非线性最优化问题;韩晓丽等^[108]采用非显式射线追踪算法并在全偏移距内进行反演,明显提高了近地表模型的计算精度;卢回忆等^[109]将医学成像领域中的多模板快速进行法(Multi-stencils Fast Marching Methods,简称 MSFM 法)引入到层析反演中的走时计算,有效改善了 FMM 法在对角方向误差大的缺陷,尤其对复杂地表模型具有很强的适应能力。

网格划分也是决定层析反演质量的一个重要因素。受观测系统的制约,野外获得的地震记录道数(或射线密度)有限,要想取得高质量的成像效果,网格划分不能太细,否则有些网格内的射线覆盖次数会过低甚至为零。但如果网格划分太粗,则难以保证射线追踪的计算精度,且无法对一些小构造进行准确成像^[110]。为此,ZHOU 等^[111]引入多尺度层析技术解决非均匀射线覆盖问题,有效减少了层析反演中的多解性;赵连锋等^[112]提出并行交错网格层析成像方法,采用不同尺度的成像网格和射线追踪网格,通过双曲线插值实现网格节点上的速度关联;马德堂等^[113]则提出了双重网格层析成像方法,将射线追踪和层析反演的网格分离,在较细的网格上进行射线追踪正演,而在射线覆盖次数达到一定要求的较粗网格上进行层析反演。对于较复杂的异常体,在固定网格

尺寸反演过程中,无论网格取大或取小均无法获得满意的效果,且反演中也无法优化和评估网格尺寸。LIU 等^[114]将多尺度层析技术应用到含高速夹层的近地表速度结构成像中,李庆春等^[110]则采用多尺度渐进反演策略,两者在改善速度异常体成像质量方面,均取得了明显的效果。

起伏地表和复杂构造条件下的近地表速度结构精细成像是山区和山前地带地震勘探面临的难题之一。为了提高这类地区地震波旅行时正演计算的精度和效率,聂建新等^[115]将旅行时二次插值与线性插值方法联合,张赛民等^[116]用抛物线插值取代线性插值,张东等^[117]在正演过程中采用多方向循环的计算方法,王琦等^[118]对完全矩形网格剖分的旅行时线性插值方法进行了改进。这些技术的应用,均不同程度地降低了反演运算过程中的累积误差。桑运云等^[119]提出了基于抛物旅行时插值的最短路径射线追踪方法,有效克服了最短路径方法中“之”字射线路径的缺陷,并进一步提高了建模精度。胖射线概念的引入,也是一种提高运算效率、缓解多解性的有效策略,通过不同加粗射线的方式可有效降低层析反演矩阵的稀疏性,提高反演的稳定性^[72]。VASCO 等^[120]开展了胖射线走时层析方法研究,杨雪霖等^[121]进一步提出基于多频组合的胖射线概念,即通过调整射线胖瘦来反演不同尺度的速度趋势。此外,为了克服走时层析成像的高频局限,先后发展了菲涅尔体^[122]、波路径层析成像方法^[123]和非线性菲涅尔体地震层析成像方法^[124],均取得了一定的效果。

总体来说,走时层析是一种较为稳健的地下速度结构成像方法,具有非线性程度弱、计算效率高等优点。但该方法以高频近似假设为前提条件,而地震震源产生的子波是有限频带信号,当地层空间变化尺度接近于地震子波的波长时,难以用走时层析方法进行速度成像。此外,走时层析仅利用初至波的旅行时,忽略了地震记录中包含在振幅中的动力学信息,导致走时层析成像存在建模“盲区”,反演出来的速度模型是次优的,在分辨率和精度上仍然存在些许不足^[125]。

3.2 波形层析反演成像

对于地层结构简单的近地表来说,利用基于射线理论的走时层析成像就能够取得较好的速度建模效果。然而,在地层结构较为复杂的情况下,仅靠运动学信息进行走时层析反演获得的近地表速度模型仍然达不到提高静校正精度和改善深层成像质量的要求,为此,TARANTOLA^[126]提出了波形层析反演方法。波形层析成像不仅利用初至波走时信息,而且利

用与初至波动力学相关的信息来预测地下的速度、能量衰减和密度分布特征等信息^[110]。与走时层析反演相比,该方法层析依据充分,能够明显减小振幅变化的影响,从而有效提高速度反演的可靠性。同时,由于波形层析不依赖于高频近似假设,且初至波波形都包含在残差函数的极小化问题中,因此波形层析反演结果的分辨率远远高于走时层析反演。

目前,波形层析反演已逐渐从理论研究发展到实际应用,形成了早至波波形反演技术^[127],具体包括时域波形反演^[126]和频域波形反演^[128]两个方向。虽然波形层析反演方法在理论上具有更高的反演精度,但其对初始模型依赖程度高,对噪声能量也较敏感,如果初始模型与实际模型相差较大,则容易陷入局部极值^[129]。

3.3 联合层析成像

在近地表速度建模方法研究的早期,近地表结构相对简单,初至波走时层析的目标函数中局部极值个数少,非线性程度相对较弱,计算和求解相对稳定和简单,同时初至波在地震记录上比较明显,初至波走时拾取也相对容易,因此走时层析成像得到了很好的应用^[130]。随着近地表地震-地质条件日趋复杂,在叠前地震记录上获得清晰的初至波形越来越困难,影响初至波形的各种干扰因素又无法得到有效去除^[131],因此走时层析反演很难得到令人满意的速度成像效果,人们也逐渐将近地表速度建模研究的重心由初至波走时层析转向能够利用地震记录上多种信息的初至波波形层析成像,以期获得更高分辨率的速度结构模型。然而波形层析是局部寻优的方法,对初始模型的依赖程度高,抗噪能力有限,面对复杂地质条件下的低信噪比资料,经常陷入难以适用、无法兼顾反演时效性与准确性的困境。为了克服波形层析反演面临的困难,在保证反演稳定性的前提下进一步提高反演模型的精度,发展了联合层析反演的思路。目前联合层析反演已形成了多类波型走时联合层析反演和走时-波形联合层析反演两个方向。

3.3.1 多类波型走时联合层析反演

地球物理反演是多参数的非线性问题,只利用单一波型信息难以准确、全面地重构地下速度结构,多类波型联合反演为复杂地质问题的精确成像提供了一种有效的解决方案。学者们从反演的稳定性、多参数之间的权衡系数等方面做了大量尝试性研究工作,发展了 Subspace 反演算法^[132]、参数归一法^[133]、参数分离法^[134]、加权算法及其改进算法^[135]等。RAJASEKARAN 等^[136]给出了基于反射波和折射波的约束层析速度建模方法并用于静校正,取得了很好的应用

效果;BOONYASIRIWAT等^[137]将时域多尺度波形层析成像用于挤压构造带的速度估计,联合利用反射波和折射波能量实现近地表及深部速度结构的有效估算。研究结果表明:无论是成像深度,还是成像空间分辨率,初至波与反射波旅行时联合层析的质量均优于单类波型旅行时层析^[110,138]。

3.3.2 走时-波形联合层析反演

理论上,速度场可分为长波长分量和短波长分量,长波长分量对应于光滑的背景速度,而短波长分量则对应于精细的速度结构。在地表复杂地区,近地表低降速带的速度和厚度变化较大,速度建模时无法准确刻画出近地表速度结构是长波长静校正问题产生的主要原因^[27]。长波长分量可通过走时层析反演得到,并且该模型可以作为波形反演的初始模型,而短波长分量则可通过波形层析反演获取^[139],由此形成了走时-波形联合反演方法。综合应用初至波走时层析和波形层析的方法被简称初至波 WTW(Wave equation Travel-time and Waveform inversion)。当初始模型与实际模型差异较大时,走时-波形联合层析反演可有效避免陷入局部极值^[140]。

3.4 全波形反演成像

全波形反演被认为是勘探地球物理领域中进行速度建模的一项终极成像技术^[141]。自20世纪80年代TARANTOLA^[126,142]提出基于广义最小二乘时间域全波形反演方法以来,全波形反演已得到了快速发展^[143-145]。理想的全波形反演是一套全自动化的反演过程,只要输入原始地震数据,就可直接给出精确的速度模型^[146]。然而,全波形反演在实际应用中仍然面临着诸多困难和挑战,该反演方法在数学上是一个高度病态的非线性问题,低频数据与初始模型的耦合是在实际资料应用中遇到的最大瓶颈问题^[141],此外还面临强烈依赖初始速度模型以及假频、噪声、各向异性等因素的制约问题^[146]。

目前,全波形反演在海洋地震资料处理中已经获得了成功的应用^[147-148]。RATCLIFFE^[147]研究指出,全波形反演能够有效解决浅层、高精度、复杂构造的速度建模问题,尤其擅长精细刻画浅层速度结构特征。陆地资料虽然见到了一些应用例子,但缺乏代表性,尤其在陆上近地表速度建模领域,至今尚未见到成功的案例报道。就理论分析而言,要想完全解决近地表速度建模问题,除了全波形反演以外,目前似乎还找不到理论上更加合理而又广泛适用的解决方案^[146]。

3.5 瑞雷面波频散曲线反演

自RAYLEIGH^[149]发现瑞雷面波、HASKELL^[150]

发现面波在层状介质中具有频散特性以来,瑞雷面波在地球内部结构研究,尤其在近地表工程、环境探测等领域^[151-154]已经得到了广泛的应用。反射地震勘探受仪器、观测系统和疏松的近地表地震-地质条件等因素的制约,面波干扰已成为地震资料的重要组成部分。近年来,人们逐渐意识到这类“干扰波”也携带了丰富的近地表地质信息,如何将这类干扰波变废为宝,充分利用它们来提取近地表结构及岩性横向变化等信息并加以利用,已成为今后面波利用研究的一个重要发展方向。MARI^[155]率先利用反射地震资料中的Love面波反演近地表S波速度结构,并用于横波静校正;席拥军^[156]对塔里木山地反射地震资料开展了利用面波信息进行反射波静校正处理的研究;曾校丰等^[157]以沙漠地区反射地震资料中的面波为例,深入探讨了面波提取所需要的条件、存在的问题和提取方法技术,并指出利用“大炮”地震记录中的面波解决近地表问题具有良好的应用前景;周熙襄等^[158]、王振国等^[159]深入分析了利用面波调查近地表结构的可行性,并指出利用反射地震记录中的面波调查近地表结构是反射波静校正和地震成像新的技术手段;颜俊华等^[160]提取勘探地震记录中的面波,并反演出低降速带的横波速度结构模型;LAAKE等^[161]利用中东和非洲两个油气田反射地震资料中的面波信息构建出3D近地表速度结构模型;STROBBIA等^[162-164]结合大量实例,深入讨论了面波的再利用问题,为反射地震资料中的面波分离和再利用提供了十分有用的思路;李子伟^[165]利用瑞雷面波频散信息调查油田近地表结构和潜水面深度,取得了一些有实际意义的成果和认识;张向权等^[166]通过提取反射地震资料中的面波反演近地表结构,并根据面波属性与近地表结构参数之间的关系,建立了利用面波反演巨厚戈壁区表层结构的技术流程;米晓利等^[167]提取三维地震数据体中面波携带的信息用于表层结构调查;沈鸿雁等^[168]利用反射地震资料中的瑞雷面波反演出150m以浅的低降速带结构,有效补充了反射波成像剖面中缺失的浅层信息;姜福豪等^[169]探讨了大炮面波频散分析和反演中应注意的问题,通过实际资料处理并与微测井和小折射调查结果比较,证明了大炮面波反演近地表结构的可靠性。

上述研究充分表明,反射地震资料中的面波再利用潜力很大,目前已成为近地表结构探测和速度参数来源的重要组成部分。

4 结论与展望

近地表对地震波场的影响主要体现在采集参数

选择、能量吸收衰减和静校正等方面。如果近地表的影响不能得到有效消除,将导致地震资料信噪比和分辨率严重下降、速度分析精度和成像质量难以得到保证,从而导致最终的油气藏勘探成效下降。近地表结构调查和参数反演是高分辨率反射地震勘探的重要内容和基础保障,目前已经建立了以微测井、小折射为主,浅层反射、工程面波、高密度电法、探地雷达等技术为辅的近地表结构调查技术系列,形成了以振幅衰减法、谱比法、质心频移法等多种方法估算品质因子 Q 值以及层析成像构建近地表速度模型为核心的近地表结构参数反演方法体系。然而,随着近地表地震-地质条件的日趋复杂,尤其是地表高程起伏大、横向速度变化剧烈、低降速带巨厚等地区,高分辨率地震勘探对地震资料的“三高”处理要求不断提高,现有的近地表结构调查及参数反演方法、技术手段难以有效满足实际生产的需求,未来仍然需要开展持续深入的研究,具体方向如下。

1) 目前近地表结构调查的方法手段已经比较丰富和全面,未来发展的重点应是针对具体的近地表调查情况,优化技术的局部细节调查能力,以提高近地表结构调查的精细程度,同时兼顾野外调查的时效性。

2) 近地表地震波能量吸收衰减与补偿是高分辨率地震资料处理的重要内容之一。尽管目前已经形成了多种估算 Q 值及补偿的方法和手段,然而,复杂的近地表地质因素下,不同地理环境、不同地震-地质条件、不同地层特征等情况下的地震波传播规律及能量吸收衰减机制不尽相同,要想彻底补偿近地表因素造成的地震波能量吸收衰减,仍然需要持续加强近地表地震波传播规律与吸收衰减机理的研究。因此,地震波能量吸收与补偿仍然是未来高分辨率反射地震资料处理研究的重点内容和难题。

3) 近地表速度建模方法和手段有待进一步完善和拓展。目前近地表速度建模主要利用初至波信息,充分利用地震波运动学和动力学信息的波形反演和走时-波形联合反演的潜力还有待进一步挖掘。此外,全波形反演在理论上是建模精度最高的手段,对于要求精细刻画速度结构的近地表来说应该是特别适合的方法,虽然有关方面的研究工作早已开展并取得了一系列重要进展,但在实用化过程中还存在诸多问题和挑战,因此全波形反演仍然是今后近地表速度建模研究的一个重要方向。

4) 线性反演已经比较成熟并得到了推广应用,然而受波场分离的不完整性、假频和噪声引入的误差、地震数据采集存在的固有缺陷等因素的制约,加

之地球物理参数反演本身是一个多参数、多极值的高度非线性迭代优化过程,理论上非线性反演更容易获得地球物理反问题的全局最优解,但非线性反演算法稳定性差、反演效率低下的缺陷仍然有待进一步解决。此外,联合反演也是一种解决近地表结构参数反演问题的策略,波场类型之间的联合反演和线性与非线性反演方法之间的联合目前已有报道,但其潜力有待进一步挖掘,解决近地表问题的能力有待进一步提高。

5) 常规地面反射地震资料中的面波再利用已展现出良好的利用前景,但截至目前仍然没有形成一套较为完备的面波成像处理技术。究其原因,是反射地震中的面波与工程面波相比频率更低、传播距离更大、穿透能力更强、波场更复杂,直接套用相对成熟的工程面波反演技术难以取得好的成像效果。因此,开发适合于大炮面波的处理及成像技术是这类面波再利用的关键所在,可以判断,反射地震中的面波成像与近地表结构研究仍然是未来的一个热门研究课题。

参 考 文 献

- [1] 郑鸿明,吕焕通,娄兵,等.地震勘探近地表异常校正[M].北京:石油工业出版社,2009:1-22
ZHEN H M, LV H T, LOU B, et al. Near-surface anomaly correction for seismic exploration[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009:1-22
- [2] 刘伊克,常旭,王辉,等.三维复杂地形近地表速度估算及地震层析静校正[J].地球物理学报,2001,44(2):272-278
LIU Y K, CHANG X, WANG H, et al. Estimation of near-surface velocity and seismic tomographic static corrections[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44(2):272-278
- [3] 李桂林,陶宗普,陈春强.陆上高分辨率地震勘探炸药震源激发条件分析[J].石油物探,2005,44(2):183-186
LI G L, TAO Z P, CHEN C Q. Explosive energization condition analysis of high-resolution seismic exploration offshore[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2005, 44(2):183-186
- [4] 程玖兵,马在田,陶正喜,等.山前带复杂构造成像方法研究[J].石油地球物理勘探,2006,41(5):525-529
CHENG J B, MA Z T, TAO Z X, et al. Imaging study of piedmont complex structures [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2006, 41(5):525-529
- [5] 李合群,孟小红,赵波,等.塔里木沙漠区地震数据品质与沙层 Q 吸收[J].石油地球物理勘探,2010,45(1):28-34
LI H Q, MENG X H, ZHAO B, et al. Seismic data quality and sand layer Q absorption in Tarim desert area[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(1):28-34
- [6] 李 G, CAO M, ZHOU H. Effects of near-surface absorption on reflection characteristics of continental interbedded strata: the Dagang oilfield as an example[J].

- Acta Geologica Sinica, 2010, 84(5): 1306-1314
- [7] 潘宏勋, 方伍宝, 李满树. 南方山前带 B 区地震速度建模及偏移成像[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(4): 526-530
- PAN H X, FANG W B, LI M S. Velocity model building and migration imaging in a foothill belt area[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(4): 526-530
- [8] 王华忠, 刘少勇, 杨勤勇, 等. 山前带地震勘探策略与成像处理方法[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(1): 151-159
- WANG H Z, LIU S Y, YANG Q Y, et al. Seismic exploration strategy and image processing in mountain areas[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(1): 151-159
- [9] 陈志德, 王成, 刘国友, 等. 近地表 Q 值模型建立方法及其地震叠前补偿应用[J]. 石油学报, 2015, 36(2): 188-196
- CHEN Z D, WANG C, LIU G Y, et al. Modeling method of near-surface Q value and its seismic pre-stack compensation application [J]. Acta Petrolel Sinica, 2015, 36(2): 188-196
- [10] 刘定进, 蒋波, 李博, 等. 起伏地表逆时偏移在复杂山前带地震成像中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(2): 351-324
- LIU D J, JIANG B, LI B, et al. Rugged-tomography reverse time migration in complex piedmont zone[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(2): 351-324
- [11] 曾校丰, 钱荣毅, 邓新生, 等. 面波勘探及其在沙漠地区表层地质结构调查中的应用[J]. 现代地质, 2001, 15(1): 94-97
- ZENG X F, QIAN R Y, DENG X S, et al. Rayleigh wave exploration applied to investigate surface geological stricture in desert zone [J]. Geoscience, 2001, 15(1): 94-97
- [12] 张付生, 贾烈明, 王莉. 陆上地震激发因素的选择方法探讨[J]. 石油物探, 2004, 43(2): 149-152
- ZHANG F S, JIA L N, WNAG L. Study on selection of shooting parameters for land seismic data acquisition [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2004, 43(2): 149-152
- [13] 李桂花, 朱光明. 利用三分量微测井技术调查表层纵、横波速度[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(2): 160-165
- LI G H, ZHU G M. Using 3-C uphole survey technique to survey P-wave and S-wave velocity on surface[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2006, 41(2): 160-165
- [14] 曹务祥. 疏松地表对震源信号的影响与施工方法的改进[J]. 石油物探, 2007, 46(2): 170-173
- CAO W X. Impact of loose surface on vibrator signal and the improvement in field operation[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2007, 46(2): 170-173
- [15] 刘成斋, 刘传鹏, 张世鑫. 合肥盆地近地表结构调查和地震激发方式选择[J]. 石油物探, 2008, 47(6): 604-608
- LIU C Z, LIU C P, ZHANG S X. Investigation on surface geologic structure and selection of seismic shooting mode at Hefei basin [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2008, 47(6): 604-608
- [16] 李天树, 张国富, 苏德仁, 等. 井中多极接收微测井调查表层吸收衰减技术[R]. 宜昌: 中国石油学会物探技术研讨会, 2015
- LI T S, ZHANG G F, SU D R, et al. Research on surface absorption and attenuation technology by multipole receiving micro logging survey[R]. Yichang: Geophysical Exploration Technology Seminar of China Petroleum Society, 2015
- [17] FUTTERMAN W I. Dispersive body waves[J]. Journal of Geophysical Research, 1962, 67(3): 5279-5291
- [18] HAUGE P S. Measurements of attenuation from vertical seismic profiles[J]. Geophysics, 1981, 46(11): 1548-1558
- [19] 田刚, 石战结, 董世学, 等. 利用微测井资料补偿地震数据的高频成分[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(5): 546-549
- TIAN G, SHI Z J, DONG S X, et al. Using uphole survey data to compensate high-frequency component of seismic data [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 40(5): 546-549
- [20] 王建民, 陈树民, 苏茂鑫, 等. 近地表高频补偿技术在三维地震勘探中的应用研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1837-1843
- WANG J M, CHEN S M, SU M X, et al. A study of the near surface high-frequency compensation technology in 3-D seismic exploration [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(6): 1837-1843
- [21] LI G, ZHENG H, ZHU W, et al. Tomographic inversion of near-surface Q factor by combining surface and cross-hole seismic surveys [J]. Applied Geophysics, 2016, 13(1): 93-102
- [22] 张文, 周志才, 于承业. 一种改进的近地表强吸收补偿方法研究[J]. 石油物探, 2017, 56(2): 210-215
- ZHANG W, ZHOU Z C, YU C Y. An improved compensation method for near surface strong absorption [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(2): 210-215
- [23] 宋吉杰, 禹金营, 王成, 等. 近地表介质 Q 估计及其在塔河北部油田的应用[J]. 石油物探, 2018, 57(3): 436-442
- SONG J J, YU J Y, WANG C, et al. Q estimation for near-surface media and its application in the Northern Tahe Oilfield, China [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(3): 436-442
- [24] 丁冠东, 张小明, 陈浩林, 等. 激发深度和检波器耦合对近地表 Q 值估算的影响分析[J]. 石油物探, 2018, 57(5): 678-684
- DING G D, ZHANG X M, CHEN H L, et al. Affects of excitation depth and geophone coupling on near-surface Q value estimation [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(5): 678-684
- [25] LANDA E, KEYDAR S, RESHEE M. How far is the seismic image correct [J]. The Leading Edge, 1998, 17(7): 919-922
- [26] 谭昌勇, 王彦春, 张伟宏, 等. 静校正方法在黄土塬地区的联合应用[J]. 石油物探, 2009, 48(3): 252-257
- TAN C Y, WANG Y C, ZHANG W H, et al. Joint ap-

- plication of statics method in loess tableland[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2009, 48(3): 252-257
- [27] 王志刚, 刘志伟, 王彦春, 等. 复杂近地表区综合长波长静校正方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2014, 49(3): 480-485
- WANG Z G, LIU Z W, WANG Y C, et al. An integrated long-wavelength static correction method for complex near-surface area[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2014, 49(3): 480-485
- [28] 费建博, 杨子川. 双界面匹配一体化速度建模技术研究与应用[J]. *石油物探*, 2016, 55(4): 533-539
- FEI J B, YANG Z C. Double interfaces matching integrated velocity model building and its application[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2016, 55(4): 533-539
- [29] 曾庆才, 曾同生, 欧阳永林, 等. 复杂山地层析反演静校正新方法及应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2017, 52(3): 418-425
- ZENG Q C, ZENG T S, OUYANG Y L, et al. A new tomographic inversion for static correction in complex mountain areas[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2017, 52(3): 418-425
- [30] 赵玲芝, 谷跃民, 张建中. 多信息融合的近地表速度建模技术及应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2017, 52(1): 34-41
- ZHAO L Z, GU Y M, ZHANG J Z. Near-surface model building with multi-discipline fusion[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2017, 52(1): 34-41
- [31] 杨振武, 查树贵. 复杂地区综合地球物理勘探方法技术应用[J]. *石油物探*, 2003, 42(3): 417-421
- YANG Z W, ZHA S G. Application of integrated geophysical methodology in complex survey area[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2003, 42(3): 417-421
- [32] 于承业, 周志才. 利用双井微测井资料估算近地表 Q 值[J]. *石油地球物理勘探*, 2011, 46(1): 89-92
- YU C Y, ZHOU Z C. Estimation of near surface Q value based on the datasets of the uphole survey in double hole[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2011, 46(1): 89-92
- [33] 徐峰, 尹成, 李忠, 等. 井中激发地表接收的近地表结构调查方法[J]. *石油物探*, 2009, 48(3): 294-298
- XU F, YIN C, LI Z, et al. Investigation method for near-surface structure with shot in hole and receive at surface[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2009, 48(3): 294-298
- [34] 李子顺. 地震波衰减规律及其恢复方法[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(5): 1545-1551
- LI Z S. Seismic wave attenuation and recovering method[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(5): 1545-1551
- [35] 翟桐立, 马雄, 彭雪梅, 等. 基于井地一体化测量的近地表品质因子 Q 值估算与应用[J]. *石油物探*, 2018, 57(5): 685-690
- ZHAI T L, MA X, PENG X M, et al. Near-surface Q factor measurement by combining surface and cross-hoel seismic surveys[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2018, 57(5): 685-690
- [36] 陈吴金, 张志林, 朱勇, 等. 永新地区综合表层调查方法探讨[J]. *石油地球物理勘探*, 2008, 43(S2): 70-73
- CHEN W J, ZHANG Z L, ZHU Y, et al. Discussion on integrative near-surface survey method in Yongxin area[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2008, 43(S2): 70-73
- [37] 段云卿, 皮金云, 刘兵, 等. 三分量小折射表层调查研究[J]. *石油地球物理勘探*, 2008, 43(6): 652-655
- DUAN Y Q, PI J Y, LIU B, et al. Study on near-surface survey by 3-component (3-C) shallow refraction[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2008, 43(6): 652-655
- [38] 沈鸿雁, 严月英, 赵雍. 近地表地球物理勘探[M]. 北京: 中国环境出版社, 2017: 1-283
- SHEN H Y, YAN Y Y, ZHAO Y. Near surface geophysical prospecting[M]. Beijing: China Environmental Publishing House, 2017: 1-283
- [39] 俞寿朋. 高分辨率地震勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993: 1-189
- YU S P. High resolution seismic exploration[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993: 1-189
- [40] 杜增利, 施泽进, 徐峰, 等. 近地表疏松介质吸收补偿的数学模拟研究[J]. *西南石油大学学报*, 2007, 29(1): 44-46
- DU Z L, SHI Z J, XU F, et al. The mathematical modeling of absorption compensation in loose medium at subsurface[J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2007, 29(1): 44-46
- [41] 尹喜玲, 石战结, 田钢. 近地表低降速带地震波传播规律初探[J]. *地球物理学进展*, 2009, 24(2): 398-407
- YIN X L, SHI Z J, TIAN G. Study on transmittable laws of seismic waves in unconsolidated layers[J]. *Progress in Geophysics*, 2009, 24(2): 398-407
- [42] MANGRIOTIS M D, RECTOR J W, HERKENGOFF E F. Effects of the near-field on shallow seismic studies[J]. *Geophysics*, 2011, 76(1): B9-B18
- [43] WANG Y H. A stable and efficient approach of inverse Q filtering[J]. *Geophysics*, 2002, 67(2): 657-663
- [44] SHI Z, TIANG G, WANG B, et al. Near-surface absorption compensation technology and its application in the Daqing[J]. *Applied Geophysics*, 2009, 6(2): 184-191
- [45] KJARTANSSON E. Constant Q -wave propagation and attenuation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84(B9): 4737-4748
- [46] WARD R W, YOUNG C Y. Mapping seismic attenuation within geothermal systems using teleseisms with application to the Geysers-Clear Lake region[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1980, 85(B10): 5227-5236
- [47] ENGELHARD L. Determination of seismic-wave attenuation by complex trace analysis[J]. *Geophysical Journal International*, 1996, 125(2): 608-622
- [48] QUAN Y L, HARRIS J M. Seismic attenuation tomography using the frequency shift method[J]. *Geophysics*, 1997, 62(3): 895-905
- [49] 赵宁, 曹思远, 王宗俊, 等. 频域统计性属性组合提取品质因子 Q [J]. *石油地球物理勘探*, 2013, 48(4): 545-552

- ZHAO N, CAO S Y, WANG Z J, et al. Seismic Q estimation by combination of frequency statistics attributes [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2013, 48(4): 545-552
- [50] 王宗俊. 基于谱模拟的质心法品质因子估算[J]. *石油物探*, 2015, 54(3): 267-273
- WANG Z J. Quality factor estimation by centroid frequency shift of spectrum fitting [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2015, 54(3): 267-273
- [51] 李君君, 王志章, 张枝焕, 等. 质心频率线性拟合法估算品质因子 Q [J]. *石油地球物理勘探*, 2015, 50(2): 254-259
- LI J J, WANG Z Z, ZHANG Z H, et al. Quality factor Q estimation based on linear fitting of centroid frequency curve [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2015, 50(2): 254-259
- [52] 白利娜, 赵凌云. 时间域属性组合法提取品质因子 Q [J]. *石油地球物理勘探*, 2015, 50(3): 436-443
- BAI L N, ZHAO L Y. Quality factor extraction with an attribute combination method in time domain [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2015, 50(3): 436-443
- [53] ZHAO C, ULRYCH T J. Estimation of quality factors from CMP records [J]. *Geophysics*, 2002, 67(10): 1542-1547
- [54] 高静怀, 杨森林. 利用零偏移 VSP 资料估计介品质因子方法研究 [J]. *地球物理学报*, 2007, 50(4): 1198-1209
- GAO J H, YANG S L. On the method of quality factors estimation from zero-offset VSP data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(4): 1198-1209
- [55] WANG Z, CAO S, ZHANG H, et al. Estimation of quality factors by energy ratio method [J]. *Applied Geophysics*, 2015, 12(1): 86-92
- [56] YANG S, GAO J. Seismic quality factors estimation from spectral correlation [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(4): 740-744
- [57] 王晓涛, 谭佳, 毛海波, 等. 强衰减条件下能量比法的修正及其应用 [J]. *石油地球物理勘探*, 2017, 52(1): 42-47
- WANG X T, TAN J, MAO H B, et al. Correction of energy ratio method under strong attenuation condition and its application [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2017, 52(1): 42-47
- [58] HARGREAVES N D, CALVERT A J. Inverse Q -filtering by Fourier transform [J]. *Geophysics*, 1991, 56(4): 519-527
- [59] 徐平, 王宝善, 张尉, 等. 利用互相关函数求地震波衰减 [J]. *地球物理学报*, 2006, 49(6): 1738-1744
- XU P, WANG B S, ZHANG W, et al. Estimating seismic attenuation using cross correlation function [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(6): 1738-1744
- [60] 张固澜, 熊晓军, 容娇君, 等. 基于改进的广义 S 变换的地层吸收衰减补偿 [J]. *石油地球物理勘探*, 2010, 45(4): 512-515
- ZHANG G L, XIONG X J, RONG J J, et al. Stratum absorption and attenuation compensation based on improved generalized S -transform [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2010, 45(4): 512-515
- [61] 李伟娜, 云美厚, 党鹏飞, 等. 基于微测井资料的双线性回归稳定 Q 估计 [J]. *石油物探*, 2017, 56(4): 483-490
- LI W N, YUN M H, DANG P F, et al. Stability Q estimation by dual linear regression based on uphole survey data [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2017, 56(4): 483-490
- [62] SHI Z, TIAN G, DONG S, et al. Attenuation compensation of low-velocity layers using micro-seismogram logs: case studies [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2004, 1(3): 181-186
- [63] 刘学伟, 邵圣宏, 何樵登. 用面波反演风化层 Q 值-补偿风化层吸收提高分辨率 [J]. *石油物探*, 1996, 35(2): 89-95
- LIU X W, TAI S H, HE J D. Inversion of quality factor Q for weathered layer using surface-compensating seismic wave absorption in weathered layer to increase resolution [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 1996, 35(2): 89-95
- [64] 裴江云, 吴永刚, 刘英杰. 近地表低速带反演 [J]. *长春地质学院学报*, 1994, 24(3): 317-320
- PEI J Y, WU Y G, LIU Y J. Near surface low velocity zone inversion [J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 1994, 24(3): 317-320
- [65] NIZARE E Y, FABIAN E, MULDER W. Near-surface attenuation estimation using wave-propagation modeling [J]. *Geophysics*, 2008, 73(6): 27-37
- [66] 崔栋, 张研, 胡英, 等. 近地表速度建模方法综述 [J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(6): 2635-2641
- CUI D, ZHANG Y, HU Y, et al. The review of near surface velocity modeling [J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(6): 2635-2641
- [67] 胡英, 张研, 陈立康, 等. 速度建模的影响因素与技术对策 [J]. *石油物探*, 2006, 45(5): 503-507
- HU Y, ZHANG Y, CHEN L K, et al. Influencing factors and technical countermeasures of speed modeling [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2006, 45(5): 503-507
- [68] 李源, 刘伟, 刘微, 等. 各向异性全速度建模技术在地震成像中的应用 [J]. *石油物探*, 2015, 54(2): 157-162
- LI Y, LIU W, LIU W, et al. Application of anisotropic full velocity modeling in the mountainous seismic imaging [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2015, 54(2): 157-162
- [69] 段文胜, 李飞, 黄录忠, 等. OVT 域宽方位层析速度建模与深度域成像 [J]. *石油地球物理勘探*, 2016, 51(3): 521-528
- DUAN W S, LI F, HUANG L Z, et al. Wide azimuth tomographic velocity model building and depth imaging in the OVT domain [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, 51(3): 521-528
- [70] 崔岩, 王彦飞. 基于初至波走时层析成像的 Tikhonov 正则化与梯度优化算法 [J]. *地球物理学报*, 2015, 58(4): 1367-1377
- CUI Y, WANG Y F. Tikhonov regularization and gradient descent algorithms for tomography using first-arrival seismic traveltimes [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(4): 1367-1377

- [71] BIOS P, PORTE M L, LAVERGNE M, et al. Well-to-well seismic measurements [J]. *Geophysics*, 1972, 37 (3): 471-480
- [72] 刘小民, 邬达理, 梁硕博, 等. 潜水波胖射线走时层析速度反演及其在深度偏移速度建模中的应用 [J]. *石油物探*, 2017, 56(5): 718-726
- LIU X M, WU D L, LIANG S B, et al. Diving wave tomography velocity inversion using fat ray in prestack depth migration [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2017, 56(5): 718-726
- [73] 沈鸿雁, 李庆春, 严月英, 等. 多道瞬态面波相速度分析 [J]. *石油物探*, 2016, 55(5): 692-702
- SHEN H Y, LI Q C, YAN Y Y, et al. Phase velocity analysis of multi-channel transient surface wave [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2016, 55(5): 692-702
- [74] 井西利, 杨长春, 李幼铭. 建立速度模型的层析成像方法研究 [J]. *石油物探*, 2002, 41(1): 72-76
- JING X L, YANG C C, LI Y M. Study of tomographic inversion in the construction of velocity model [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2002, 41(1): 72-76
- [75] 林伯香, 孙晶梅, 刘清林. 层析成像低速带速度反演和静校正方法 [J]. *石油物探*, 2002, 41(2): 136-140
- LIN B X, SUN J M, LIU Q L. Tomography for LVZ velocity inversion and statics [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2002, 41(2): 136-140
- [76] 李满树, 方伍宝, 周腾, 等. 初至波走时信息在复杂地区近地表速度反演中的应用 [J]. *石油物探*, 2004, 43(1): 72-75
- LI M S, FANG W B, ZHOU T, et al. Inversion of near-surface velocity through first-arrival traveltimes in complex region [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2004, 43(1): 72-75
- [77] 冯泽元, 李培明, 唐海忠, 等. 利用层析反演技术解决山地复杂区静校正问题 [J]. *石油物探*, 2005, 44(3): 284-287
- FEN Z Y, LI P M, TANG H Z, et al. Solving the static correction problem in mountain complex block using tomographic inversion [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2005, 44(3): 284-287
- [78] 袁刚, 冯心远, 蒋波, 等. 约束层析反演及其在地震速度计算中的应用 [J]. *石油物探*, 2013, 52(1): 55-59
- YUAN G, FENG X Y, JIANG B, et al. Constrained tomography inversion and its application in seismic velocity computation [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2013, 52(1): 55-59
- [79] SQUIRES L J, BLAKESLEE S N, STOFFA P L. The effects of static on tomographic velocity reconstructions [J]. *Geophysics*, 1992, 57(2): 353-362
- [80] 李录明, 罗省贤. 复杂三维表层模型层析反演与静校正 [J]. *石油地球物理勘探*, 2003, 38(6): 636-641
- LI L M, LUO X X. Tomographic inversion for 3-D complex near-surface model and static correction [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2003, 38(6): 636-641
- [81] 陈云峰, 杨淑卿. 利用层析成像方法反演近地表速度模型 [J]. *海洋地质前沿*, 2014, 30(5): 47-51
- CHEN Y F, YANG S Q. Building of near surface velocity model using tomography inversion method [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2014, 30(5): 47-51
- [82] 李福中, 邢国栋, 白旭明, 等. 初至波层析反演静校正方法研究 [J]. *石油地球物理勘探*, 2000, 35(6): 710-718
- LI F Z, XING G D, BAI X M, et al. Study of first break tomographic inversion method for static corrections [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2000, 35(6): 710-718
- [83] WHITE D J. Two-dimensional seismic refraction tomography [J]. *Geophysical Journal International*, 1989, 97 (2): 223-245
- [84] WOODWARD M J. Wave-equation tomography [J]. *Geophysics*, 1992, 57(1): 15-25
- [85] ZHANG J, TOKSÖZ M N. Nonlinear refraction travel-time tomography [J]. *Geophysics*, 1998, 63(5): 1726-1737
- [86] 常旭, 卢孟夏, 刘伊克. 地震层析成像反演中 3 种广义解的误差分析与评价 [J]. *地球物理学报*, 1999, 42(5): 695-701
- CHANG X, LU M X, LIU Y K. Error analysis and appraisals for three general solution in seismic tomography [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1999, 42(5): 695-701
- [87] 陈国金, 曹辉, 吴永栓, 等. 速度差对井间走时层析成像质量的影响及其改进方法 [J]. *地球物理学报*, 2006, 49 (3): 915-922
- CHEN G J, CAO H, WU Y S, et al. Effects of velocity contrast on the quality of crosswell traveltimes tomography and an improved method [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(3): 915-922
- [88] 王淑玲. 约束层析静校正方法应用效果分析 [J]. *石油物探*, 2012, 51(4): 383-387
- WANG S L. Application analysis of constrained tomographic static correction technique [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2012, 51(4): 383-387
- [89] CLAPP R G, BIONDI B, CLAERBOUT J F. Incorporating geologic information into tomography [J]. *Geophysics*, 2004, 69(2): 533-546
- [90] 刘玉柱, 董良国, 夏建军. 初至波走时层析成像中的正则化方法 [J]. *石油地球物理勘探*, 2007, 42(6): 682-698
- LIU Y Z, DONG L G, XIA J J. Normalized approach in tomographic imaging of first breaks travel time [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2007, 42(6): 682-698
- [91] FOMEL S. Shaping regularization in geophysical estimation problems [J]. *Geophysics*, 2007, 72(2): R29-R36
- [92] 王薇, 韩波, 唐锦萍. 地震波形反演的稀疏约束正则化方法 [J]. *地球物理学报*, 2013, 56(1): 289-297
- WANG W, HAN B, TANG J P. Regularization method with sparsity constraints for seismic waveform inversion [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(1): 289-297
- [93] NOBLE M, THIERRY P, TAILLANDIER C, et al. High-performance 3D first-arrival traveltimes tomography [J]. *The Leading Edge*, 2010, 29(1): 86-93
- [94] OLSEN K B. A stable and flexible procedure for the inverse modeling of seismic first arrivals [J]. *Geophysics*

- cal Prospecting, 1989, 37(5):455-465
- [95] BAI C, STEWART C, ZHOU B. 3D ray tracing using a modified shortest-path method[J]. *Geophysics*, 2007, 72(4):T27-T36
- [96] FARRA V. First-order ray tracing for qS waves in inhomogeneous weakly anisotropic media[J]. *Geophysical Journal International*, 2005, 161(2):309-324
- [97] 李建国, 李彦鹏, 郭晓玲. VTI 介质试射射线追踪[J]. *石油地球物理勘探*, 2010, 45(4):491-496
- LI J G, LI Y P, GUO X L. VTI medium test-firing ray tracing[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2010, 45(4):491-496
- [98] VIDALE J. Finite-difference calculation of travel times[J]. *Bulletin of the Seismological Society of American*, 1988, 78(6):2062-2076
- [99] 刘清林. 程函方程差分法层析成像[J]. *石油物探*, 1995, 34(4):14-26
- LIU Q L. Crosshole seismic tomography based on a finite different solution of the eikonal[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 1995, 34(4):14-26
- [100] MOSER T. Shortest path calculation of seismic rays[J]. *Geophysics*, 1991, 56(1):59-67
- [101] 赵后越, 张美根. 起伏地表条件下各向异性地震波最短路径射线追踪[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(9):2910-2917
- ZHAO H Y, ZHANG M G. Tracing seismic shortest path rays in anisotropic medium with rolling surface[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(9):2910-2917
- [102] 黄联捷, 李幼铭, 吴如山. 用于图像重建的波前法射线追踪[J]. *地球物理学报*, 1992, 35(2):326-333
- HUANG L J, LI Y M, WU R S. The wave-front ray tracing method for image reconstruction[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1992, 35(2):326-333
- [103] CARDARELLI E, CERRETO A. Ray tracing in elliptical anisotropic media using the linear traveltime interpolation (LTI) method applied to traveltime seismic tomography[J]. *Geophysical Prospecting*, 2002, 50(1):55-72
- [104] 李永博, 李庆春, 吴琼, 等. 快速行进法射线追踪提高旅行时计算精度和效率的改进措施[J]. *石油地球物理勘探*, 2016, 51(3):467-473
- LI Y B, LI Q C, WU Q, et al. Improved fast marching method for higher calculation accuracy and efficiency of traveltime[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, 51(3):467-473
- [105] 成谷, 马在田, 张宝金, 等. 地震层析成像中存在的主要问题及应对策略[J]. *地球物理学进展*, 2003, 18(3):512-518
- CHENG G, MA Z T, ZHANG B J, et al. Primary problem and according strategies in seismic tomography[J]. *Progress in Geophysics*, 2003, 18(3):512-518
- [106] 李录明, 罗省贤, 赵波. 初至波表层模型层析反演[J]. *石油地球物理勘探*, 2000, 35(5):559-564
- LI L M, LUO X X, ZHAO B. Tomographic inversion of first break in surface model[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2000, 35(5):559-564
- [107] 张建中. 近地表介质地震初至波层析成像[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2004, 43(1):63-66
- ZHANG J Z. First break tomography for near-surface layers in seismic exploration[J]. *Journal of Xiamen University: Nature Science*, 2004, 43(1):63-66
- [108] 韩晓丽, 杨长春, 麻三怀, 等. 复杂山区初至波层析反演静校正[J]. *地球物理学进展*, 2008, 23(2):475-483
- HAN X L, YANG C C, MA S H, et al. Static of tomographic inversion by first break in complex areas[J]. *Progress in Geophysics*, 2008, 23(2):475-483
- [109] 卢回忆, 刘伊克, 常旭. 基于 MSFM 的复杂近地表模型走时计算[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(9):3100-3108
- LU H Y, LIU Y K, CHANG X. MSFM-based travel-times calculation in complex near-surface model[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(9):3100-3108
- [110] 李庆春, 叶佩. 初至波与反射波旅行时多尺度渐进联合层析成像[J]. *石油地球物理勘探*, 2013, 48(4):536-544
- LI Q C, YE P. Joint tomography of first break and reflection traveltimes with multi-scale netsize method[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2013, 48(4):536-544
- [111] ZHOU C, SCHUSTER G T. Waveform inversion of subwell velocity structure[J]. *Expanded Abstracts of 63rd Annual International SEG Mtg*, 1993:106-109
- [112] 赵连锋, 朱介寿, 曹俊兴. 并行化交错网格法地震层析成像[J]. *石油物探*, 2003, 42(1):6-8
- ZHAO L F, ZHU J S, CAO J X. Seismic tomography with parallel interlaced gridding[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2003, 42(1):6-8
- [113] 马德堂, 朱光明, 张文波. 双重网格井间地震层析成像技术[J]. *地球科学与环境学报*, 2004, 26(1):65-68
- MA D T, ZHU G M, ZHANG W B. Cross hole seismic tomography with double grid[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2004, 26(1):65-68
- [114] LIU H, ZHOU H, LIU W. Tomographic velocity model building of the near surface with velocity-inversion interfaces: A test using the Yilmaz model[J]. *Geophysics*, 2010, 75(6):39-47
- [115] 聂建新, 杨慧珠. 地震波旅行时二次/线性联合插值法[J]. *清华大学学报*, 2003, 43(11):1495-1498
- NIE J X, YANG H Z. Quadratic/linear travel time interpolation of seismic ray-tracing[J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2003, 43(11):1495-1498
- [116] 张赛民, 周竹生, 陈灵君, 等. 对旅行时进行抛物型插值的地震射线追踪方法[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(1):43-48
- ZHANG S M, ZHOU Z S, CHEN L J, et al. Seismic ray tracing method of applying parabolic interpolation to travel time[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(1):43-48
- [117] 张东, 谢宝莲, 杨艳, 等. 一种改进的线性走时插值射线追踪算法[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(1):200-205
- ZHANG D, XIE B L, YANG Y, et al. A ray tracing

- method based on improved linear travelttime interpolation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(1): 200-205
- [118] 王琦, 朱盼, 叶佩, 等. 起伏地表地震波旅行时混合网格线性插值射线追踪计算方法[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(1): 35-46
- WANG Q, ZHU P, YE P, et al. Traveltime calculation based on linear interpolation in hybrid meshes for rugged topographical condition[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(1): 35-46
- [119] 桑运云, 李振春, 张凯. 抛物旅行时插值的最短路径射线追踪[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(3): 403-409
- SANG Y Y, LI Z C, ZHANG K. Shortest path ray tracing based on parabolic travelttime interpolation[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(3): 403-409
- [120] VASCO D W, PETRERSON J E, MAJER E L. Beyond ray tomography: Wave paths and Fresnel volumes[J]. Geophysics, 1995, 60(6): 1790-1804
- [121] 杨雪霖, 李振春, 尹正, 等. 多频组合胖射线旅行时层析成像方法[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(5): 911-915
- YANG X L, LI Z C, YIN Z, et al. Fat ray travelttime tomographic imaging based on multiple frequencies combination[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(5): 911-915
- [122] CERVENY V, SOARES J. Fresnel volume ray tracing[J]. Geophysics, 1992, 57(7): 902-915
- [123] DAHLEN F A, HUNG S H, NOLET G. Fréchet kernels for finite-frequency travel-times-I: Theory[J]. Geophysical Journal International, 2000, 141(1): 157-174
- [124] LIU Y, YANG J, ZHOU Q. An efficient nonlinear Fresnel volume tomography using an improved scattering-integral algorithm[J]. Journal of Applied Geophysics, 2018, 159: 678-689
- [125] 王振宇, 杨勤勇, 李振春, 等. 近地表速度建模研究现状及发展趋势[J]. 地球科学进展, 2014, 29(10): 1138-1148
- WANG Z Y, YANG Q Y, LI Z C, et al. Research status and development trend of near-surface velocity modeling[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(10): 1138-1148
- [126] TARANTOLA A. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation[J]. Geophysics, 1984, 49(8): 1259-1266
- [127] SHENG J M, LEEDS A, BUDDENSIEK M, et al. Early arrival waveform tomography on near-surface refraction data[J]. Geophysics, 2006, 71(4): U47-U57
- [128] PRATT R, SHIN C, HICKS G. Gauss-Newton and full Newton methods in frequency-space seismic waveform inversion[J]. Geophysical Journal International, 1998, 133(2): 341-362
- [129] 王杰, 胡光辉, 刘定进, 等. 陆上地震资料全波形反演策略研究[J]. 石油物探, 2017, 56(1): 81-88
- WANG J, HU G H, LIU D J, et al. Strategy study on full waveform inversion for the land seismic data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(1): 81-88
- [130] 潘艳梅, 董良国, 刘玉柱, 等. 近地表速度结构层析反演方法综述[J]. 勘探地球物理进展, 2006, 29(4): 229-234
- PAN Y M, DONG L G, LIU Y Z, et al. Review of tomographic inversion for near-surface velocity structure[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2006, 29(4): 229-234
- [131] 周兵, 朱介寿, GREENHALGH S A, 等. 一种新的地震射线层析成像计算方法[J]. 石油物探, 1994, 33(1): 45-54
- ZHOU B, ZHU J S, GREENHALGH S A, et al. A new algorithm for seismic-ray tomography[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1994, 33(1): 45-54
- [132] KENNETT B, SAMBRIDGE M, WILLIAMAON P. Subspace methods for large inverse problem with multiple parameter classes[J]. Geophysical Journal International, 1988, 94(2): 237-347
- [133] HOBRO J W D, SATISH C S, MINSHULL T A. Three-dimensional tomographic inversion of combined reflection and refraction seismic travelttime data[J]. Geophysical Journal International, 2003, 152(1): 79-93
- [134] 周龙泉, 刘福田, 陈晓非. 三维介质中速度结构和界面的联合成像[J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1062-1067
- ZHOU L Q, LIU F T, CHEN X F. Simultaneous tomography of 3-D velocity structure and interface[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(4): 1062-1067
- [135] ZELT C A, ELLIS R M, ZELT B C. Three dimensional structure across the Tintina strike slip fault, northern Canadian Cordillera, from seismic refraction and reflection tomography[J]. Geophysical Journal International, 2006, 167(3): 1292-1308
- [136] RAJASEKARAN S, MCMECHAN G A. Prestack processing of land data with complex topography[J]. Geophysics, 1995, 60(6): 1875-1886
- [137] BOONYASIRIWAT C, VALASEK P, ROUTH P, et al. An efficient multiscale method for time-domain waveform tomography[J]. Geophysics, 2009, 74(6): WCC59-WCC68
- [138] 魏剑平. 高精度初至波和反射波联合速度反演[D]. 西安: 长安大学, 2012
- WEI J P. High-precision joint velocity inversion with seismic first-break and reflection travel-time [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012
- [139] WANG Y, RAO Y. Crosshole seismic waveform tomography I: Strategy for real data applaication[J]. Geophysical Journal International, 2006, 166(3): 1224-1236
- [140] ZHOU C, SCHUSTER G T, HASSANZADEH S, et al. Elastic wave equation travelttime and waveform inversion of crosswell[J]. Geophysics, 1997, 62(3): 853-868
- [141] 杨勤勇, 胡光辉, 王立歆. 全波形反演研究现状及发展

- 趋势[J].石油物探,2014,53(1):77-83
YANG Q Y, HU G H, WANG L X. Research status and development trend of full waveform inversion[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2014, 53(1): 77-83
- [142] TARANTOLA A. A strategy for nonlinear elastic inversion of seismic reflection data [J]. Geophysics, 1986, 51(10): 1893-1903
- [143] PRATT R. Seismic waveform inversion in the frequency domain, part I: theory and verification in a physical scale model[J]. Geophysics, 1999, 64(3): 888-901
- [144] SHIN C. Laplace-domain full-waveform inversion of seismic data lacking low-frequency information [J]. Geophysics, 2012, 77(5): 199-206
- [145] 何兵红, 方伍宝, 刘定进, 等. 基于波动方程转换的时间域多尺度全波形反演速度建模[J]. 石油物探, 2019, 58(2): 229-236
HE B H, FANG W B, LIU D J, et al. Velocity building by multi-scale full waveform inversion with time-domain wave equation transform[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(2): 229-236
- [146] 张宇. 从成像到反演: 叠前深度偏移的理论、实践与发展[J]. 石油物探, 2018, 57(1): 1-23
ZHANG Y. From imaging to inversion: Theory, practice, and technological evolution of prestack depth migration[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(1): 1-23
- [147] RATCLIFFE A, PRIVITERA A, COBROY G, et al. Enhanced imaging with high-resolution full-waveform inversion and reverse time migration: A North Sea OBC case study[J]. The Leading Edge, 2014, 33(9): 986-992
- [148] 胡光辉, 李熙盛, 郭丽, 等. 构造约束全波形反演及其海上资料应用[J]. 石油物探, 2018, 57(4): 592-596
HU G H, LI X S, GUO L, et al. Structure-constrained full waveform inversion and its application in marine seismic data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(4): 592-596
- [149] RAYLEIGH L. On waves propagated along the plane surface of an elastic solid[J]. Proceedings of the London Mathematic Society, 1887, 17: 4-11
- [150] HASKELL M A. The dispersion of surface waves on multilayered media[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1953, 43(1): 17-34
- [151] XIA J, MILLER R D, PARK C B. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves[J]. Geophysics, 1999, 64(3): 691-700
- [152] PARK C, MILLER R, XIA J. Multichannel analysis of surface waves[J]. Geophysics, 1999, 64(3): 800-808
- [153] SHEN H, CHEN C, YAN Y, et al. Multiple-transient surface wave phase velocity analysis in expanded f - k domain and its application[J]. Journal of Seismic Exploration, 2016, 25(4): 299-319
- [154] LEI Y, SHEN H, XIE S, et al. Rayleigh wave dispersion curve inversion combining with GA and DSL[J]. Journal of Seismic Exploration, 2018, 27(2): 151-165
- [155] MARI L. Estimation of static corrections for share-wave profiling using the dispersion properties of love waves[J]. Geophysics, 1984, 49(8): 1169-1179
- [156] 席拥军. 面波法静校正在新疆塔里木山地地震勘探中的应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 1998
XI Y J. Application research of surface wave method static correction in mountain seismic exploration of Tarim, Xinjiang[D]. Xuzhou: China University of Mining, 1998
- [157] 曾校丰, 钱荣毅, 邓新生, 等. 油气反射波地震勘探记录中面波信息的提取[J]. 物探与化探, 2001, 25(6): 443-446
ZENG X F, QIAN R Y, DENG X S, et al. The extraction of surface wave information form the record of oil-gas reflection wave seismic exploration[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2001, 25(6): 443-446
- [158] 周熙襄, 王振国. 利用瑞雷面波调查表层结构的可行性探讨[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(2): 181-186
ZHOU X X, WANG Z G. Discussing on feasibility of using Rayleigh wave to investigation near-surface structure[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 39(2): 181-186
- [159] 王振国, 周熙襄. 再论利用瑞雷面波调查表层结构的可行性[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(5): 505-508
WANG Z G, ZHOU X X. Discussing again about possible using Rayleigh wave for investigation of near-surface structure [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 39(5): 505-508
- [160] 颜俊华, 彭文, 周熙襄. 利用面波信息调查表层结构的方法[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(5): 635-639
YAN J H, PENG W, ZHOU X X. Investigation of surface layer texture using surface wave information[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(5): 635-639
- [161] LAAKE A, STROBBIA C, CUTTS A. Integrated approach to 3D near surface characterization in desert region[J]. First Break, 2008, 26(11): 109-112
- [162] STROBBIA C L, VERMEER P L, LAAKE A, et al. Surface waves: processing, inversion and removal[J]. First Break, 2010, 28(8): 85-91
- [163] STROBBIA C L, EMAN A E, AL-GENAI J, et al. Rayleigh wave inversion for the near-surface characterization of shallow targets in a heavy oil field in Kuwait[J]. First Break, 2010, 28(5): 103-109
- [164] STROBBIA C L, LAAKE A, VERMEER P L, et al. Surface-wave analysis, inversion and attenuation in land reflection seismic surveying[J]. Near Surface Geophysics, 2011, 9(6): 503-513
- [165] 李子伟. 利用瑞雷波频散信息调查油田近地表结构和潜水面深度[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013
LI Z W. Investigation of oilfield near-surface structure and water table depth by Rayleigh-wave dispersion information [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013