

doi: 10.11720/wtyht.2019.0040

岳航羽,张保卫,王凯,等.一种适用于沿海滩涂区的浅层高精度地震探测技术[J].物探与化探,2019,43(6):1225-1235.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0040

Yue H Y, Zhang B W, Wang K, et al. A technology applied to shallow high-precision seismic detection in coastal tidal flats[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(6): 1225-1235. http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0040

一种适用于沿海滩涂区的浅层高精度地震探测技术

岳航羽^{1,2}, 张保卫^{1,2}, 王凯^{1,2,3}, 李金丽^{1,2}, 王广科^{1,2}, 陈德元^{1,2}

(1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 国家现代地质勘查工程技术研究中心, 河北 廊坊 065000; 3. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026)

摘要: 受地质勘探设备和潮汐时间的制约,沿海滩涂区地质探测程度低,探测精度不足,无法满足沿海滩涂区高精度地质调查的需求。常规浅层地震勘探技术虽能有效地探测到沿海滩涂区浅层第四系底界面及内部层位,但其数据采集仪器设备复杂、采集效率低,直接制约着沿海滩涂区地震探测工作。为此,笔者提出一种适用于沿海滩涂区的高精度地震探测技术,充分利用沿海滩涂区地表地势平坦的特征,采用改造的拖曳式地震探测设备开展数据采集工作,能够有效解决上述困难,为受潮汐影响严重的沿海滩涂区地震探测提供一种新思路;同时,制定了一套针对沿海滩涂区的地震探测信号提取流程和方法组合,最大程度地保留有效地震反射信息,还原滩涂区地下地层结构;在沿海滩涂区实际应用中的效果表明,该技术完全能够为滩涂区地下地层精细划分提供真实可靠的数据支持。

关键词: 沿海滩涂区;拖曳式;高精度;浅层地震探测

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2019)06-1225-11



0 引言

沿海滩涂区,一般是指沿海大潮高潮线与低潮线之间的潮浸地带,在发育良好的沿海地区滩涂宽可达 10 km 以上,坡度极小,一般仅 0.2‰ 左右,主要以细粉砂—黏土级的细颗粒沉积物为主,广义的滩涂还包括部分未开发的潮上带及低潮时仍难以出露的水下浅滩。我国沿海省份中,江苏沿海滩涂数量众多,分布最广,面积占全国总滩涂面积的四分之一。沿海滩涂是我国未来发展的重要后备土地资源,具有巨大的经济、环境、生态、能源等价值,开发利用潜力很大^[1-4]。由于沿海滩涂区地表条件特殊,表层结构复杂且受潮汐影响大等因素限制,地质勘探数据采集难度大,有效数据采集时间短,并且单

纯的陆地地面探测技术或单纯的海上探测技术均不能解决沿海滩涂区的地质勘探问题,因此沿海滩涂区地质数据采集工作一直是一个世界性难题,致使沿海滩涂区地质调查工作不足,海陆地质调查统筹管理工作缺失。

国外在沿海滩涂区开展地质勘探研究工作较早,根据滩涂区地表差异选取不同震源、检波器以及仪器设备组合,在单个地震记录内采用匹配滤波法校正不同仪器采集到的数据^[5]。国内主要是石油单位在这类地区做了大量工作,但主要针对的是沿海滩涂区深层油气资源,将沿海滩涂区作为滩涂海地区的过渡带进行施工处理,通过联合陆地和浅海地震探测技术,组合采用多种激发震源、多种检波器接收装置、衔接海陆观测系统以及采用针对性的地震数据处理方法等手段,形成了一套针对滩涂海地

收稿日期: 2019-02-13; 修回日期: 2019-09-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFF01013500); 中国地质调查局地质调查项目(DD20160151、DD20160046); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(AS2016J01、AS2017J11、JYYWF20180302)

作者简介: 岳航羽(1989-),男,助理工程师,硕士,主要从事地震勘探方法技术的研究与应用工作。Email: yuehangyu@igge.cn

通讯作者: 张保卫(1965-),男,2007年毕业于长安大学,硕士,高级工程师,主要从事地震勘探方法技术的研究工作。Email: zhangbaowei@igge.cn

区油气资源的地震探测技术^[6-11]。上述探测方法技术虽然解决了油气资源勘探的需求,但是未将沿海滩涂区作为单一目标区域进行探测,致使该类地区探测精度不足,无法满足沿海滩涂区高精度地质调查、确定第四系地层结构以及圈定隐伏活动断裂分布等需求。

高精度浅层地震探测技术和地震有效反射信号提取技术的结合,能够精确查明浅层地下地质结构和活动断层位置等,广泛应用于城市地下空间探测、城市活动断层探测、陆域天然气水合物以及金属矿勘查等方面^[12-22]。而在沿海滩涂区开展浅层地震探测研究工作较少,中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所在江苏省如东县的沿海滩涂区开展浅层地震探测方法应用实验工作,在潮退时选用锤击震源和 60 Hz 检波器组合的滚动排列式地震探测方法,有效地探测到测区内第四系底界面位置,并划分了第四系内部层位,同时查明了测线敷设范围内的隐伏活动断裂及浅层气的存在及分布范围^[23]。但是该类技术方法的勘探仪器设备较复杂,工作中需要消耗大量人力、物力及时间成本布设仪器设备,同时受潮汐时间约束,每日数据采集效率较低,很难进行大规模生产,因此亟需研究一套能够在沿海滩涂区快速高效地采集野外地震数据的浅层地震探测技术。

针对上述难点及沿海滩涂区地表特点,笔者设计了一种适用于沿海滩涂区的浅层高精度地震探测技术。应用该方法不仅能够达到精细探测沿海滩涂研究区第四系地层结构的目的,同时能够大幅提高浅层地震探测技术的数据采集效率,节约地震数据采集施工时间。

1 研究区概况

研究区域处于我国沿海滩涂资源最发育的地区之一——江苏省南通市如东县,本区域濒临黄海,沿海滩涂区地表主要是以“铁板沙”为主,退潮后垂直海堤滩涂区自西向东可延伸 10 km 以上,整体地势平坦,高程落差不足 1 m。研究区内每日退潮涨潮时间间隔 5 h 左右,涨退潮之间人员、沿海滩涂区交通工具可在滩涂上行走和驾驶,有利于开展地震探测工作。同时,研究区内第四系地层发育齐全,厚度约在 300 m 左右。基岩埋深较大,约为 700~1 400 m。地表主要为滨—浅海相沉积物和三角洲前缘相—湖坪相沉积物,岩性主要以粉砂、砂黏土、细沙、粗砂、含砾粗砂为主。各岩层厚度薄至几米,厚达几十米。由于沿海滩涂区存在涨退潮,经常被海水淹没,因此地表及以下各地层处于饱水状态,有利于地震波的传播,且基本不存在表层低速带的影响。

2 拖曳式浅层高精度地震探测

沿海滩涂区每日涨潮退潮时间间隔短,每天不超过 5 h,所以在滩涂区开展地震勘探工作十分困难,如何能在每天有限时间内既能保证地震数据采集的质量,又能完成任务设计的工作量,即提高沿海滩涂区地震数据采集工作效率是关键因素。为此,笔者设计了一种适用于沿海滩涂区的浅层高精度地震探测技术,并在沿海滩涂研究区内布设一条近东西向的地震测线(图 1),并将从野外采集参数、数据采集效率、数据有效性 3 个方面论述该技术的优势。

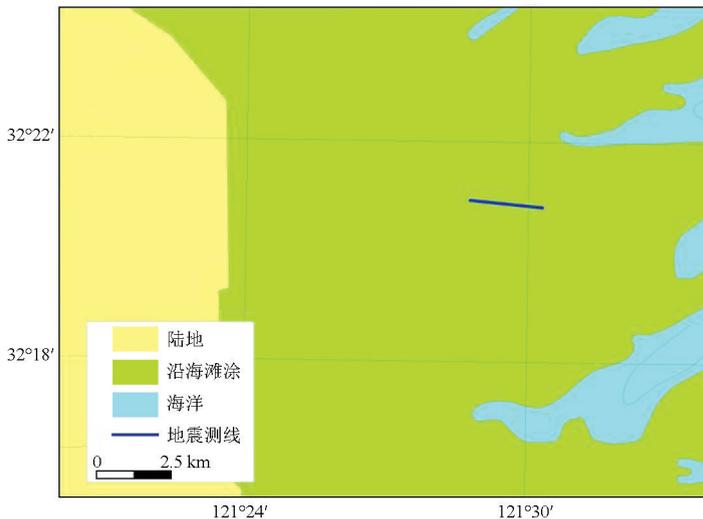


图 1 沿海滩涂研究区位置

Fig.1 Study area of coastal tidal flats

2.1 野外采集参数

对地震数据采集设备进行一定程度的改造,将 24 道常规检波器串固定于自制的“船型”金属装置内,组成 24 道可拖曳的“船型”检波器串,并用 1 条拖曳电缆以固定道间距形式将这 24 道可拖曳的检波器串连接到 1 台 Geode 采集站上,利用沿海滩涂

区拖曳车辆以拖曳形式在滩涂区开展地震数据采集工作,如图 2 所示。同时,采用 4 万焦耳的电火花震源激发、单边放炮的方式。此外,为适应沿海滩涂区地表环境,所有地震数据采集设备、仪器均做了防水改造处理。



图 2 沿海滩涂区拖曳式浅层高精度地震探测现场工作图

Fig.2 Field work map of towed shallow high-precision seismic detection in coastal tidal-flat area

为了达到探测到沿海滩涂区第四系内部地层的目的,经过反复试验确定了拖曳式浅层地震探测技术在沿海滩涂区进行野外地震数据采集时的参数如表 1 所列。

了 120 炮的工作量,单日平均可完成工作量高达 124.2 炮。能做到如此高效地采集地震数据,得益于本套技术的仪器设备简便。在沿海滩涂区浅层高精度地震探测的有限工作时间内,仪器设备布设、连接、拆卸消耗时间可忽略不计,仅仪器设备“搬家”时间占用总工作时的 10%,因而总工作时的 90%都可以用于地震数据激发、接收和记录,大大提高了沿海滩涂区地震数据采集的效率,在滩涂区有限的采集时间内单日平均可完成工作量得到大幅提升。

表 1 野外地震数据采集基本参数

Table 1 Basic parameters of field seismic acquisition

道间距/m	3
炮间距/m	6
最小偏移距/m	6
采样间隔/ms	0.25
接收道数/道	24
最大覆盖次数/次	6

2.2 数据采集效率

本技术方法在沿海滩涂区进行地震数据采集工作时,只需投入 24 道自制的可拖曳“船型”检波器串、1 条拖曳电缆以及 1 台 Geode 采集站即可完成沿海滩涂区野外地震数据采集工作任务,和常规滩涂区浅层地震探测需投入几百道检波器、数十条模拟电缆、数传电缆以及采集站相比,沿海滩涂区拖曳式浅层地震探测技术具有仪器设备投入数量少、数据采集方式简便的特点,可节约大量时间用作地震震源激发、地震数据接收和记录。

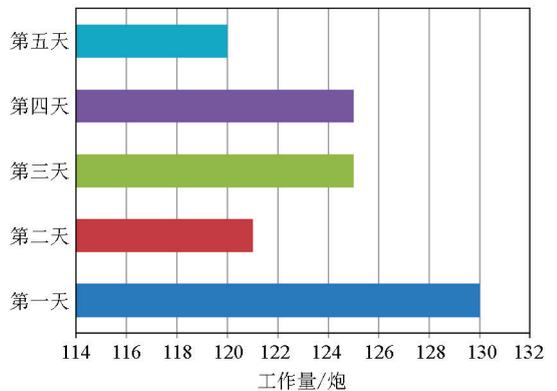


图 3 单日完成工作量统计

Fig.3 Daily workload statistics

图 3 统计了连续五天的单日可完成的工作量,单日最高完成了 130 炮的数据采集工作,最低完成

2.3 数据有效性分析

用于野外现场质控的连续单炮地震记录如图 4 所示,现场质控主要采用了带通滤波和增益补偿的方式,从图中不难发现本技术方法的地震

记录虽然干扰噪声明显,但是双曲线型的有效反射波同相轴连续性较好,能量较强,有效反射波双程旅行时可达 0.8 s,在沿海滩涂区有效探测深度可达 800 m 以上。

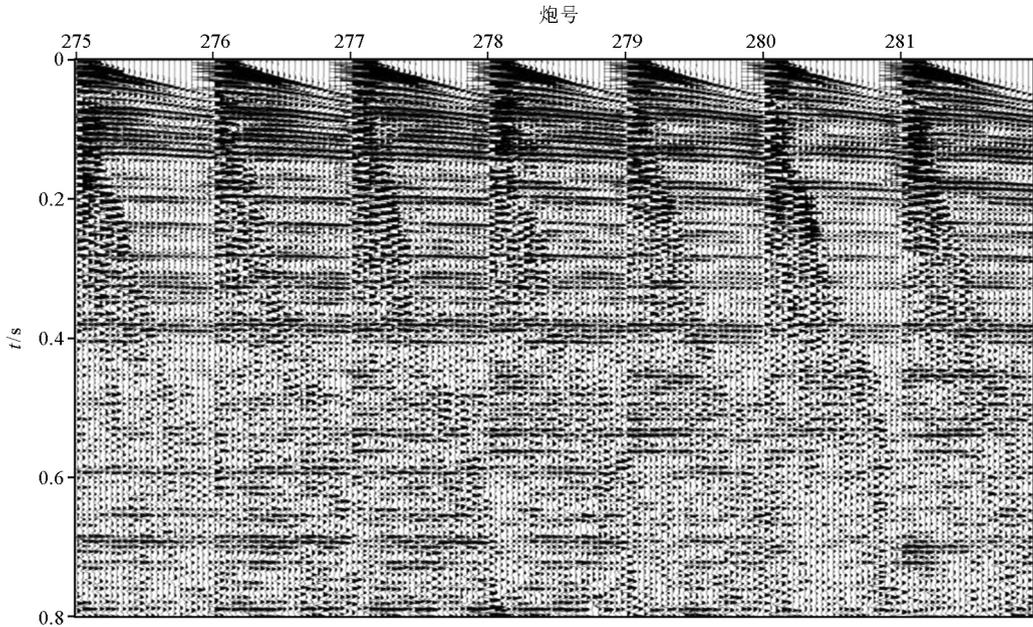


图 4 野外现场质控的连续单炮地震记录

Fig.4 Continuous single-shot seismic record of field quality control

图 5 所示为图 4 中的有效反射波的频谱图,通过观察发现有效反射波的主频约 130 Hz,有效频带主要分布在 80~240 Hz。因此,野外现场质控的连续单炮记录及有效波的频谱特征进一步验证了文中提出的沿海滩涂区拖曳式浅层地震探测技术的正确性及有效性,为后续沿海滩涂区地震探测信号提取工作的开展奠定了基础。

接影响滩涂区第四系地层的精细划分及第四系底界面位置的确定,因此在提高地震探测信号的信噪比和分辨率的同时,要尽可能减少对有效信号的损害,保留原始记录中有效信号的原貌。以文中所设计的沿海滩涂区浅层高精度地震探测技术采集的数据为例,首先确定和分析沿海滩涂区浅层地震探测各类噪声干扰的类型及特点,其次制定有针对性的信号提取方法组合压制各类噪声干扰,最大程度地保留浅层地震反射信息,最后精细速度分析叠加成地震剖面,为地震资料解释提供可靠数据支持。

3.1 原始数据分析

确定和分析原始数据资料的特点是地震探测信号提取的基础和关键环节,只有弄清楚干扰波和有效波的差异,了解原始记录的面貌、频谱、振幅、相位和信噪比,找出有效信号提取难点,才能合理地确定有效波信号提取流程及方法技术组合。

通过分析图 6 所示的沿海滩涂区地震测线上某三炮的原始记录发现,沿海滩涂区的有效反射波同相轴较连续,波组特征还较明显,干扰波主要表现为低频噪声、面波干扰、声波干扰和层间多次波,单炮记录整体的信噪比和分辨率不高,因此在开展沿海滩涂区地震有效探测信号提取工作之前,要对原始数据中的各类干扰噪声进行详细分析。

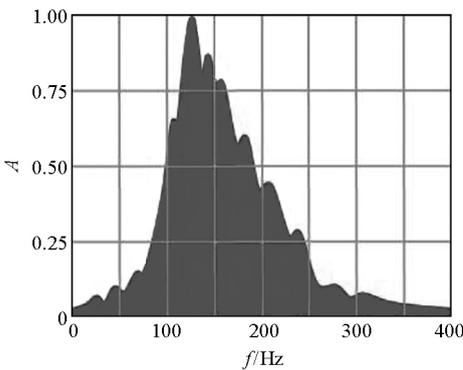


图 5 有效反射波频谱图

Fig.5 Spectrum of the effective reflections

3 滩涂区地震探测信号提取

由于沿海滩涂区地震探测信号提取的效果将直
方数据

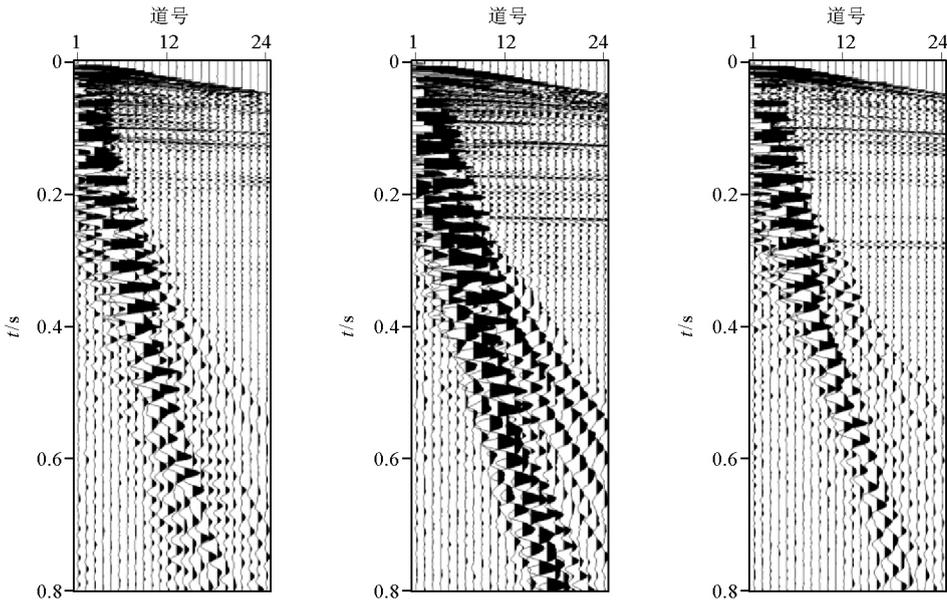


图 6 沿海滩涂区地震测线上某三炮原始记录

Fig.6 The original record of a certain three shots on the seismic survey in coastal tidal-flat area

低频干扰波频率范围为 0~10 Hz,幅值最强,影响区域无规律可循,不同的炮集影响范围差别较大。面波干扰频率范围为 5~25 Hz,幅值强,速度小于 200 m/s,从炮点出发呈扫帚状发散形态分布,主要影响近道信号,部分频带成分线性特征明显。声波干扰频率较高,幅值较强,速度固定,约为 340 m/s,其影响范围较小。当地下存在反射系数差别比较大的界面,会产生层间多次波,受地表及地下地震地质条件影响,沿海滩涂研究区易产生该类干扰波,主要表现为类似有效反射波、周期性,但其速度低于有效反射波。真正有效反射波幅值中等,速度为 1 500~1 900 m/s,主频较高,约为 130 Hz,频带较宽,约为

80~240 Hz,双曲线特征明显。此外,单炮地震记录从浅至深幅值能量差异大,不同地震单炮记录之间幅值也存在差异。

基于沿海滩涂区地震有效反射波与各类噪声干扰在视速度、频率、幅值以及干扰范围等存在差异,遵照“先易后难”、“先低后高”的原则,制定了有针对性的数据处理手段提取沿海滩涂区有效地震反射信号,如图 7 所示。其主要包括观测系统定义、叠前噪声衰减、真振幅恢复、反褶积、精细速度分析、动校切除、叠加等步骤,逐步剔除各类干扰噪声,最大程度地保留有效地震反射信息,提高地震数据的信噪比和分辨率。

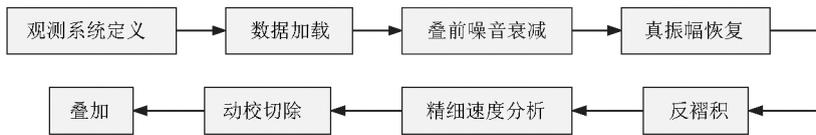


图 7 沿海滩涂区地震探测信号提取流程

Fig.7 Extraction flow chart of seismic detected signal in coastal tidal-flat area

3.2 叠前噪声衰减

沿海滩涂区的地震单炮记录上是多种噪声干扰叠合在一起的,要衰减单炮记录上的噪声,绝不是使用一种方法就能够解决问题的,而是需要使用多种方法组合的方式,采用 Omega 地震数据处理平台相应的多步噪声衰减模块进行噪声衰减处理。为了有效压制干扰波,提高单炮记录的信噪比,又不破坏振幅相对关系,采取从强到弱,从规则到不规则的顺序压制沿海滩涂区内的各类噪声干扰。

通过调试不同方法和参数的组合,确定了包括带通滤波、线性噪声压制、面波衰减、随机噪声压制等在内的方法组合,在不同频率、不同视速度、不同能量范围以及不同函数域逐步衰减噪声干扰。图 8 所示为沿海滩涂区噪声衰减前后的单炮记录效果对比,图 8a 中明显的低频噪声、面波干扰、声波干扰、随机噪声等得到了有效压制,被“淹没的”有效反射波在图 8b 上得到了清晰的显现,反射波同向轴的连续性更好,双曲线特征明显,信噪比得到有效提高。

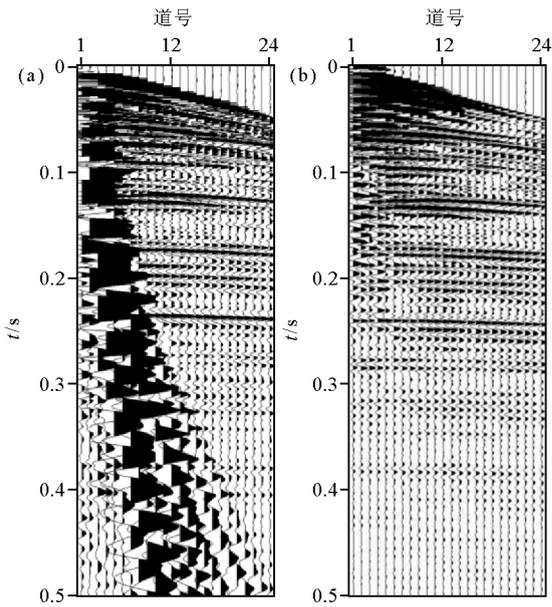


图8 噪声衰减前(a)后(b)的单炮记录的效果对比
Fig.8 Comparison of single-shot record before (a) and after (b) noise attenuation

3.3 真振幅恢复

在沿海滩涂研究区内地震数据采集过程中,单炮地震记录的振幅值会随着传播距离增大而衰减,从而导致原始单炮记录上近、中、远道以及浅、中、深层能量在时间、空间上的变化。而随着时间的推移,在沿海滩涂研究区内同一工作日采集的不同单炮记录、不同工作日采集的单炮记录受沿海滩涂地表含水度的多少在横向上地表激发接收条件同样存在差异,使地震资料各炮各道的横向能量不一致。

为消除上述因素影响,对沿海滩涂区地震单炮记录进行真振幅恢复,主要采用球面扩散振幅补偿和地表一致性振幅补偿的组合。球面扩散振幅补偿能够压制沿海滩涂区浅层强能量,补偿深层弱能量,还能保持上下振幅的相对大小关系,可以使沿海滩涂区地震数据浅、中、深层的能量趋于一致,能量关系更加均衡。地表一致性振幅补偿是根据地表一致性原理,在合理的时窗内,分别在共炮点域、共检波点域、共反射点域和共偏移距域四个域中,求出各道补偿因子进行补偿,消除由于沿海滩涂区地表因素造成的炮点之间、检波点之间能量的差异。

图9所示为利用 Omega 地震数据处理平台中对应的模块得到的地震单炮记录真振幅恢复前后的效果对比,主要从球面扩散补偿和地表一致性振幅补偿两个方面对地震道集进行处理。比较图9a和图9b不难发现,通过真振幅恢复前后整个单炮记录能量更加均衡,反射波同向轴的连续性更好,单炮记

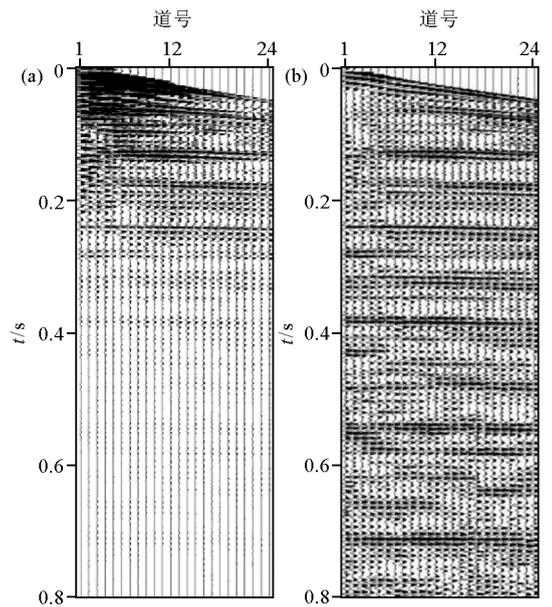


图9 真振幅恢复前(a)后(b)单炮记录的效果对比
Fig.9 Comparison of single-shot record before (a) and after (b) true-amplitude recovery

录上的中、深层能量得到有效恢复,部分有效反射信息清晰可见,即沿海滩涂研究区内地震单炮记录的纵向和横向上的能量在一定程度上都得到了合理地恢复。

3.4 反褶积

受沿海滩涂研究区地表地质条件差异的影响,地震子波形态(振幅谱和相位谱)在传播过程中往往发生变化,较硬地表条件或水饱和条件下激发得到的地震记录频率较高,松软地表条件激发得到的地震记录频率偏低,这种差异的存在会影响最终的叠加;另一方面,沿海滩涂研究区地层结构的特殊性造成了地震记录上多次波发育,给地震资料的解释带来不少困扰。为了解决上述难题,在保证资料信噪比的前提下,需要进行反褶积处理,反褶积质量的好坏直接关系到叠加剖面的质量和成像的效果。

考虑到研究区内地表条件造成的激发、接收条件的不一致性,地表一致性反褶积可以有效改善地震子波的一致性,使地震子波得到较好的整形和统一,提高地震资料横向一致性,同时压制部分多次波干扰;多道预测反褶积则通过选取合理的预测步长,进一步压缩子波,提高地震资料的主频,拓宽频带;利用多次波线性 τ - ρ 域近、远偏移距均有周期性的特点,通过线性 τ - ρ 域反褶积来压制多次波。因此,基于 Omega 地震数据处理平台,组合采用地表一致性反褶积、多道预测反褶积和线性 τ - ρ 域反褶积的方式,提高地震记录分辨率的同时压制多次波。

通过比较图 10a 和图 10b 所示的反褶积前后的单炮记录,发现经反褶积处理后单炮记录上反射波同相轴质量得到了改善,连续性变好,特别是 0.46 s 处的反射波同向轴连续性得到明显改善,整个单炮记录的纵向分辨率显著提升。

分析图 11 所示的反褶积前后单炮记录的频谱特征,发现反褶积后地震记录的主频得到了明显提高,主频从反褶积前的 130 Hz 提升到了反褶积后的 180 Hz,频带也得到了一定程度地拓宽,进一步验证了图 10 中的结论。

图 12a 和图 12b 分别为反褶积前和反褶积单炮记录的自相关对比,通过比较发现反褶积后的地震子波一致性得到显著改善,自相关函数上呈周期性的旁瓣得到明显压制,主瓣突出效果明显,单炮记录的分辨率得到了提高,同时说明了多次波在一定程度上得到了压制。

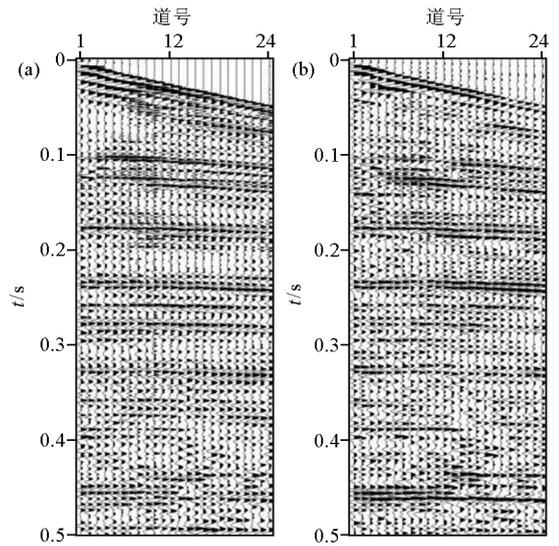


图 10 反褶积前 (a) 后 (b) 单炮记录的效果对比
Fig.10 Comparison of single-shot record before (a) and after (b) deconvolution

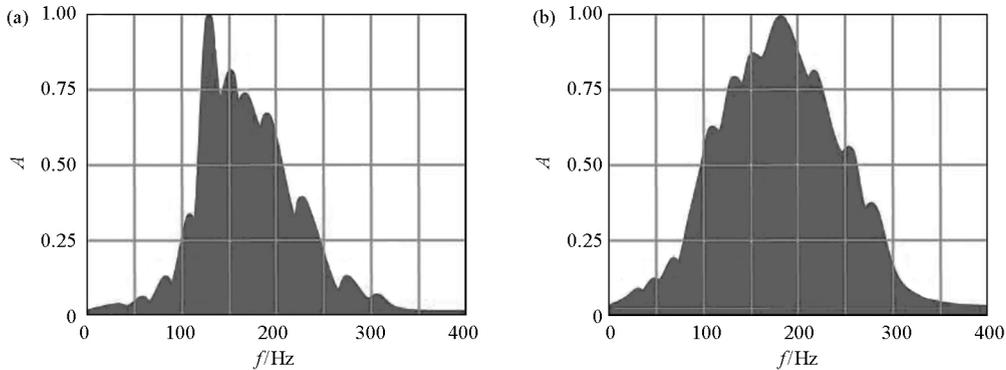


图 11 反褶积前 (a) 后 (b) 单炮记录的频谱对比
Fig.11 Spectrum comparison of single-shot record before (a) and after (b) deconvolution

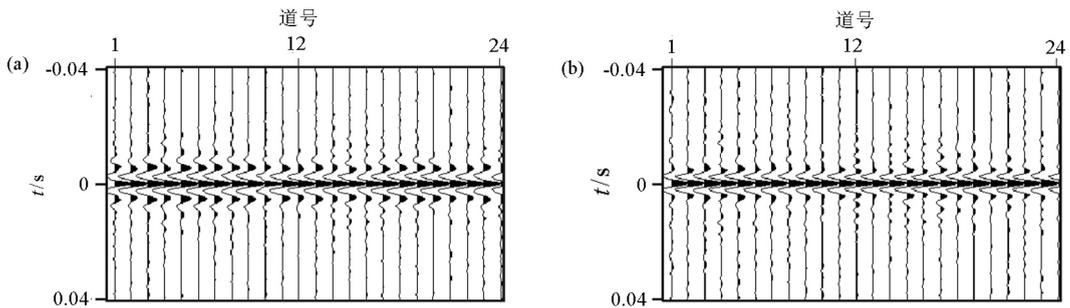


图 12 反褶积前 (a) 后 (b) 单炮记录的自相关对比
Fig.12 Autocorrelation of single-shot record before (a) and after (b) deconvolution

3.5 精细速度分析

速度分析的精度对资料的成像至关重要,为了达到精细速度分析的目的,要尽可能地增加速度控制点的个数,缩小相邻速度控制点之间的距离。由于沿海滩涂研究区内地下介质成层行较好,横向速度变化不大,因此反复、深入地研究,确定选取间隔

50 个 CMP 点选取一个速度控制点,在拾取速度时能够有效地控制主体地层构造的速度变化。拾取速度时要同时兼顾速度谱上的能量团位置、质控道集、叠加段效果等,精确拾取速度点位。

当地下存在反射系数差别比较大的界面,会产生层间多次波,该现象在沿海滩涂区精细速度拾取

时较常见。图 13 为利用反褶积后的 CMP 道集产生的速度谱,因为多次波的速度低于有效反射波,如图 13 中绿色箭头所示位置,所以在精细速度拾取时应刻意避开低速选择高速,才能最大程度地消除多次波的影响,这部分速度的调整是和叠前噪声衰减和反褶积不断迭代的过程。

3.6 动校切除

动校正的作用是消除炮检距对反射波传播时间的影响,将 CMP 道集中的反射波同相轴拉平。在浅层和大偏移距的情况下,往往发生拉伸畸变,波形拉长、频带向低频方向移动,将直接影响后续叠加剖面的质量,通常采用切除的方法克服动校拉伸畸变的问题。

对于以浅层第四系地质调查为目的的沿海滩涂区拖曳式浅层高精度地震探测而言,采用 24 道短排列采集地震数据较长排列相比动校拉伸畸变现象较小。如图 14a 和图 14b 所示,仅浅层 0~0.03s 的道

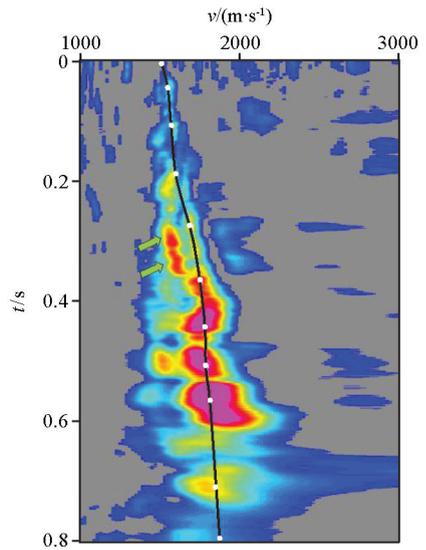
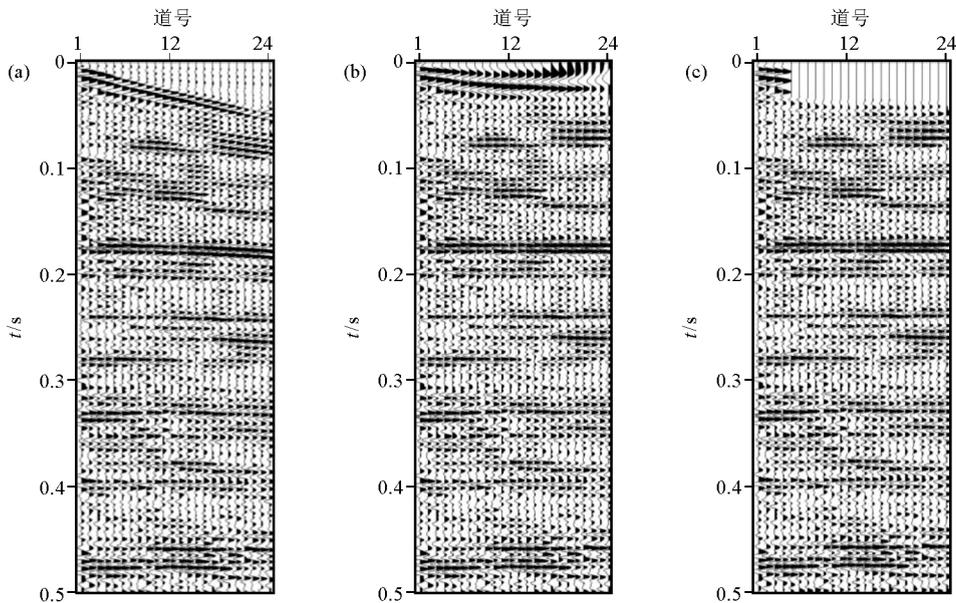


图 13 精细速度分析中某 CMP 控制点的速度谱
Fig.13 Velocity spectrum of a CMP control point in detailed velocity analysis



a—动校正前;b—动校正后;c—切除后
a—before NMO;b—after NMO;c—after cutting

图 14 动校切除前后单炮记录的效果对比

Fig.14 Comparison of single-shot record before and after NMO and cutting

集发生了动校拉伸畸变现象,因此在切除处理时也仅需要切掉这部分拉伸畸变部分的道集,如图 14c 所示,能够尽可能多地保留地震有效信息,同时较小的动校拉伸也是短排列的优势所在。

4 实际应用效果分析

为了进一步说明文中设计的一种适用于沿海滩涂区

涂区的浅层高精度地震探测技术的实际应用效果,对上述数据进行叠加处理。图 15 为沿海滩涂区拖曳式浅层高精度地震探测的叠加剖面,从叠加剖面的整体效果来看,0~0.8 s 的地震波组特征都很清晰,地层连续性好,同相轴可追踪性较强,构造形态也很明显,叠加剖面的分辨率和信噪比都较高。

从图 16 所示的叠加剖面频谱图上看,有效频带范围分布在 80~280 Hz,主频集中在 180 Hz。因此,

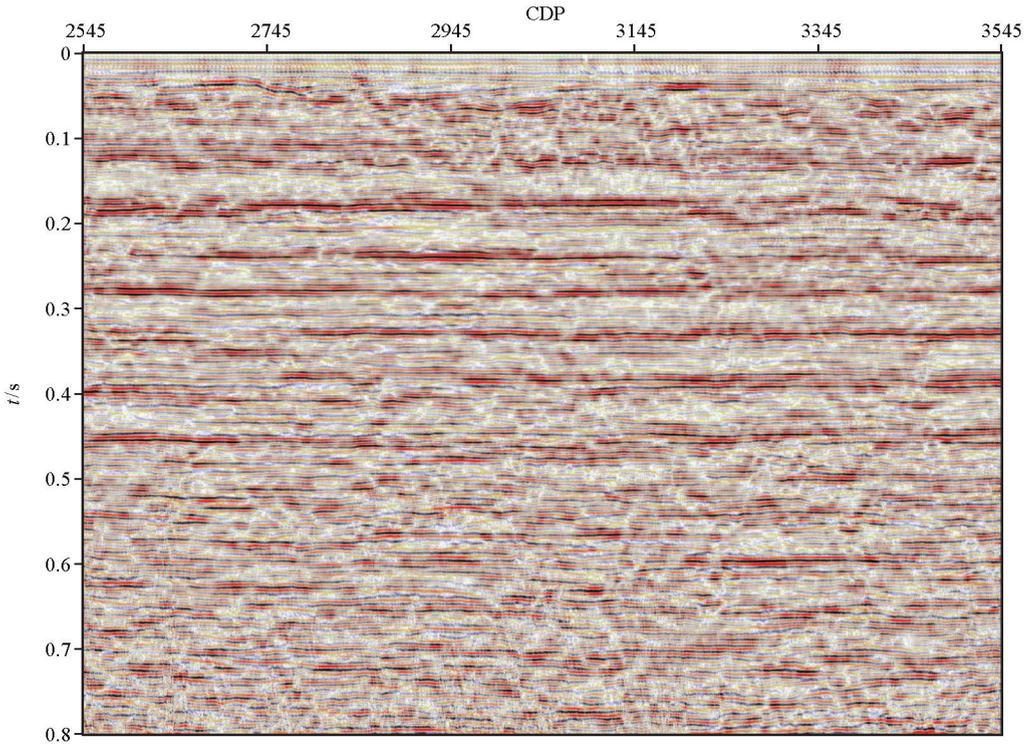


图 15 沿海滩涂区拖曳式浅层高精度地震探测的叠加剖面

Fig.15 Stack section of towed shallow high-precision seismic detection in coastal tidal-flat area

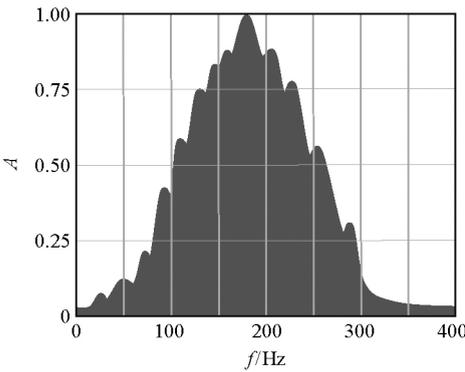


图 16 沿海滩涂区拖曳式浅层高精度地震探测的叠加剖面频谱

Fig.16 Stack section spectrum of towed shallow high-precision seismic detection in coastal tidal-flat area

通过沿海滩涂区拖曳式浅层高精度地震探测技术采集得到的地震数据可以有效地为后续地震解释工作提供支持,为沿海滩涂区第四系底界面位置的确定及第四系内部层位的精细划分提供真实可靠的数据支撑。

5 结论

1) 提出并设计了一种适用于沿海滩涂区的浅层高精度地震探测技术,依据沿海滩涂区地表地势

平坦的特点,采用拖曳式的方式采集地震探测数据,并从野外数据采集参数、数据采集效率、数据有效性 3 个方面分析该技术的优势,具有仪器设备简便、数据采集施工效率高、所采数据真实有效等特点,完全能够达到精细探测沿海滩涂区第四系内部地层结构和确定第四系底界面的目的。

2) 分析并总结了沿海滩涂区地震资料特点,制定了一套针对沿海滩涂区的地震探测信号提取流程和方法组合,并利用 Omega 地震数据处理平台实现,主要包括观测系统定义、叠前噪声衰减、真振幅恢复、反褶积、精细速度分析、动校切除以及叠加,逐步剔除各类干扰噪声,最大程度地保留有效地震反射信息,提高地震记录的信噪比和分辨率。

3) 叠加剖面 and 频谱特征进一步说明了文中所设计的拖曳式浅层高精度地震探测技术在沿海滩涂区实际应用中的效果,特别是在探测深度、精度、分辨率、信噪比等方面具有优势,完全能够为受潮汐影响严重的沿海滩涂区地质勘探提供真实可靠的数据支持。

参考文献 (References):

[1] 章志,宋晓村,邱宇,等.江苏沿海滩涂资源开发利用研究[J].海洋开发与管理,2015,3:45-49.
Zhang Z, Song X C, Qiu Y, et al. Study on development and utilization

- tion of coastal mudflat resources in Jiangsu[J]. Ocean Development and Management, 2015, 3: 45 - 49.
- [2] 张晓祥, 严长清, 徐盼, 等. 近代以来江苏沿海滩涂围垦历史演变研究[J]. 地理学报, 2013, 68(11): 1549 - 1558.
- Zhang X X, Yan C Q, Xu P, et al. Historical evolution of tidal flat reclamation in the Jiangsu coastal areas[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(11): 1549 - 1558.
- [3] 刘康, 陈伟, 吴群. 沿海滩涂耕地后备资源开发适宜性评价——以江苏省盐城市为例[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(4): 430 - 436.
- Liu K, Chen W, Wu Q. Suitability of reserved coastal mudflat for land development—a case study in Yancheng, Jiangsu Province [J]. Research of Agricultural Modernization, 2014, 35(4): 430 - 436.
- [4] 徐彩瑶, 濮励杰, 朱明. 沿海滩涂围垦对生态环境的影响研究进展[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 1148 - 1161.
- Xu C Y, Pu L J, Zhu M. Effect of reclamation activity on coastal ecological environment: progress and perspectives[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3): 1148 - 1161.
- [5] 崔汝国, 王彦春, 曹国滨, 等. 胜利油田滩浅海地区地震勘探技术[J]. 物探与化探, 2006, 30(5): 441 - 445.
- Cui R G, Wang Y C, Cao G B. The application of seismic exploration technique to the beach and shallow sea area of the Shengli Oilfield[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 30(5): 441 - 445.
- [6] LaFehr E D, Blume F, Weber W S, et al. Seismic acquisition and processing in the tidal zone, Cook Inlet, Alaska: an integrated approach[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1990: 899 - 902.
- [7] 崔汝国, 曹国滨. 垦东滩浅海地区地震勘探技术[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(s2): 21 - 24.
- Cui R G, Cao G B. Seismic exploration technique in Kendong beach and shallow-sea area [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2008, 43(s2): 21 - 24.
- [8] 朱健, 王瑞雪. 滩浅海地震勘探几种常见问题探讨[J]. 复杂油气藏, 2012, 5(2): 32 - 35.
- Zhu J, Wang R X. Discussion of several common problems encountered in seismic exploration of paralic zone [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2012, 5(2): 32 - 35.
- [9] 陈新荣, 李继光, 顾庆雷, 等. 胜利青东 5 探区滩浅海资料处理技术[J]. 物探与化探, 2011, 35(3): 393 - 397.
- Chen X R, Li J G, Gu Q L, et al. Research on processing techniques for seismic data from the tidal zone and shallow water area of Qingdong5 exploration zone in the Shengli Oilfield[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(3): 393 - 397.
- [10] 李丕龙, 宋玉龙, 王新红, 等. 滩浅海地区高精度地震勘探技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- Li P L, Song Y L, Wang X H, et al. High-precision seismic exploration technology in shoals and shallow seas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [11] 陈浩林, 张保庆, 叶苑权, 等. 滩浅海地震勘探关键技术及其应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2014.
- Chen H L, Zhang B Q, Ye Y Q, et al. Key techniques and applications of seismic exploration in shoals and shallow seas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014.
- [12] 徐明才, 高景华, 刘建勋, 等. 城市地震勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2011.
- Xu M C, Gao J H, Liu J X, et al. Urban seismic exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- [13] 赵锴, 姜杰, 王秀荣. 城市地下空间探测关键技术及发展趋势[J]. 中国煤炭地质, 2017, 29(9): 61 - 66.
- Zhao P, Jiang J, Wang X R, et al. Urban underground space exploration key technologies and development trend[J]. Coal Geology of China, 2017, 29(9): 61 - 66.
- [14] 李万伦, 田黔宁, 刘素芳, 等. 城市浅层地震勘探技术进展[J]. 物探与化探, 2018, 42(4): 653 - 661.
- Li W L, Tian Q N, Liu S F, et al. Progress in the study of shallow seismic exploration technology in urban areas[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(4): 653 - 661.
- [15] 聂碧波, 赵建明, 郇逸根, 等. 浅层地震勘探在城市活断层探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(1): 15 - 21.
- Nie B B, Zhao J M, Li Y G, et al. The comprehensive application of shallow seismic prospecting method to urban active fault detection [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2015, 12(1): 15 - 21.
- [16] Pujol J, Bartholomew M J, Mickelson A, et al. Shallow seismic detection of the fault zone associated with a high scarp in southwestern Montana[J]. Interpretation, 2015, 3(1): 25 - 41.
- [17] Li D H, Liao H, Ding Z F, et al. Detection of the Shuangshi-Dachuan fault using shallow seismic reflection in the southern section of the Longmenshan fault zone[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2016, 21(4): 161 - 172.
- [18] 刘建勋, 张保卫, 王小江, 等. 羌塘盆地浅层地震探测方法技术[J]. 物探与化探, 2015, 39(4): 678 - 685.
- Liu J X, Zhang B W, Wang X J, et al. The method for shallow seismic exploration in Qiangtang basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(4): 678 - 685.
- [19] 徐明才, 刘建勋, 柴铭涛, 等. 青海木里地区天然气水合物反射地震试验研究[J]. 地质与勘探, 2012, 48(6): 1180 - 1187.
- Xu M C, Liu J X, Chai M T, et al. An experimental study of natural gas hydrates in the Muli region, Qinghai Province by the seismic reflection method[J]. Geology and Exploration, 2012, 48(6): 1180 - 1187.
- [20] 王新全, 刘晖, 王林, 等. 南祁连盆地天然气水合物地震勘探技术[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(4): 644 - 650.
- Wang X Q, Liu H, Wang L, et al. Seismic exploration for natural gas hydrate in the South Qilian basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(4): 644 - 650.
- [21] 岳航羽, 张凯, 王小江, 等. 陆域冻土区地震探测信号提取技术——以青海哈拉湖地区为例[J]. 物探与化探, 2017, 41(6): 1183 - 1189.
- Yue H Y, Zhang K, Wang X J, et al. Extraction technology of seismic detection signal in land permafrost area: a case study of Halahu area in Qinghai [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(6): 1183 - 1189.
- [22] 徐明才, 高景华, 柴铭涛, 等. 金属矿地震勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2009.

Xu M C, Gao J H, Chai M T, et al. Seismic survey for mineral exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.

[23] 张保卫, 张凯, 岳航羽, 等. 江苏滩涂区浅层地震探测方法技术应用[J]. 物探与化探, 2018, 42(1): 144 - 153.

Zhang B W, Zhang K, Yue H Y, et al. Application of shallow seismic exploration method in tidal-flat region of Jiangsu Province[J].

Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(1): 144 - 153.

A technology applied to shallow high-precision seismic detection in coastal tidal flats

YUE Hang-Yu^{1,2}, ZHANG Bao-Wei^{1,2}, WANG Kai^{1,2,3}, LI Jin-Li^{1,2}, WANG Guang-Ke^{1,2}, CHEN De-Yuan^{1,2}

(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China; 2. National Center for Geological Exploration Technology, Langfang 065000, China; 3. College of GeoExploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: Due to the restriction of geological detection equipment and tidal time, the degree of geological exploration in coastal tidal-flat areas is low and the detection accuracy is insufficient, which cannot meet the demand of high-precision geological survey in this area. Conventional shallow seismic exploration technology can effectively detect Quaternary bottom interface and internal horizons in the coastal tidal flats, but it has a complex and inefficient data-acquisition equipment, which directly restricts the progress of seismic exploration in this area. Therefore, this paper proposes a high-precision shallow seismic detection technology which is suitable for coastal tidal-flat areas. It can effectively solve the above difficulties by making full use of the surface characteristics in coastal tidal flats and using modified towed seismic detection equipment to acquire field data, thus providing a new idea for seismic detection in this area. At the same time, a set of seismic signal extraction process and method combinations are made for coastal tidal-flat areas, which can retain effective seismic reflection information to the greatest extent and restore the underground geological structure. The results of the application show that the technology can provide reliable data support for the fine division of subsurface in the coastal tidal flats.

Key words: coastal tidal-flat area; towed; high-precision; shallow seismic detection

(本文编辑: 叶佩)