



海洋地球物理数据处理现状及展望

刘 鸿, 徐华宁, 刘欣欣, 陈江欣, 张菲菲, 王小杰, 颜中辉, 杨佳佳, 杨 睿

Data processing in Qingdao Institute of Marine Geology: today and tomorrow

LIU Hong, XU Huaning, LIU Xinxin, CHEN Jiangxin, ZHANG Feifei, WANG Xiaojie, YAN Zhonghui, YANG Jiajia, and YANG Rui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023112002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

浅水多次波衰减技术在多道地震数据处理中的应用

Application of attenuation technology to shallow water multiples in multi-channel seismic data processing

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 167-174

插值切割法在南海重力数据处理中的应用

Application of interpolation cut method to gravity data processing in South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(1): 175-183

水下考古地球物理技术进展、挑战及建议

Advance, challenge, and suggestion in geophysical technology for underwater archaeology survey

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(6): 191-201

地磁场模型在海洋磁测资料处理中的应用研究

Application of geomagnetic field model to marine magnetic data processing

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 214-221

基于同步单波束测深数据的单道地震涌浪静校正方法

Single-channel seismic swell static correction method based on synchronous single-beam echo sounder data

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(4): 181-188

基于改进的广义S变换的海洋地震资料随机噪音压制

Random noise suppression of marine seismic data based on improved generalized S transform

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(3): 184-193



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘鸿, 徐华宁, 刘欣欣, 等. 海洋地球物理数据处理现状及展望 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(3): 40-52.

LIU Hong, XU Huaning, LIU Xinxin, et al. Data processing in Qingdao Institute of Marine Geology: today and tomorrow[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(3): 40-52.

海洋地球物理数据处理现状及展望

刘鸿^{1,2}, 徐华宁^{1,2}, 刘欣欣^{1,2}, 陈江欣^{1,2}, 张菲菲^{1,2}, 王小杰^{1,2}, 颜中辉^{1,2}, 杨佳佳^{1,2}, 杨睿^{1,2}

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

2. 青岛海洋科技中心海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

摘要: 本文详细介绍了青岛海洋地质研究所地球物理数据处理技术的发展历程、技术现状和展望。介绍了目前主流的多波束高精度成像及声学信息提取技术、重磁数据处理及解释技术、浅水高分辨率浅地层剖面/单道地震数据处理技术、低信噪比小道距多道地震成像技术、长排列多道地震数据处理技术、水合物三维地震数据处理技术和地球物理反演与目标体识别技术等关键处理技术的现状, 并对今后数据处理技术发展方向进行了展望。这些技术已成功运用于多项海洋基础地质调查、海岸带调查、深海地质调查、油气和水合物资源调查项目中, 为海洋地质调查和研究提供了良好的支撑。

关键词: 地球物理数据处理; 三维地震数据处理; 数据融合; 目标识别

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023112002

Data processing in Qingdao Institute of Marine Geology: today and tomorrow

LIU Hong^{1,2}, XU Huaning^{1,2}, LIU Xinxin^{1,2}, CHEN Jiangxin^{1,2}, ZHANG Feifei^{1,2}, WANG Xiaojie^{1,2}, YAN Zhonghui^{1,2}, YANG Jiajia^{1,2}, YANG Rui^{1,2}

1. The Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266237, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China

Abstract: This paper introduces in detail the development process, current situation, and outlook of geophysical data processing technologies used in Qingdao Institute of Marine Geology. The key geophysical processing technologies, such as multi-beam high-precision imaging and acoustic information extraction, gravity and magnetic data processing and interpretation, shallow water high-resolution sub-bottom profiling / single-channel seismic processing, low signal-to-noise ratio small-interval multi-channel seismic imaging, long-spread and multi-channel seismic data processing, three dimensional hydrate seismic processing, and geophysical inversion and target recognition, are summarized and the future development prospect of these data processing technologies are envisaged. These technologies have been successfully applied to marine basic geological survey, coastal zone survey, deep-sea geological survey, and oil- gas and hydrate resource exploration projects, providing good supports to marine geological survey and research.

Key words: geophysical data processing; 3D seismic processing; data fusion; target recognition

海洋地球物理是开展海洋地质和矿产资源调查研究的一个非常重要手段, 在海洋基础地质、海岸带综合地质、天然气水合物地质、海洋油气地质、深海地质与矿产、数字海洋地质等调查工作中发挥了重要作用。海洋地球物理是有效查明地下岩石物理性质、揭示地层结构的探测方法, 一般包

括数据采集、数据处理和地质解释 3 个主要环节。其中, 数据处理是对野外采集的地球物理数据利用数字工作站或集群进行处理, 把观测误差或噪声产生的影响降到最低限度, 从数据中提取尽可能多的有效信息, 以准确揭示地下构造和地层物理性质信息。数据处理作为野外采集和地质解释间的桥梁

资助项目: 国家自然科学基金项目“南海北部大陆边缘高磁异常带的构造形态及其对中生代古俯冲体系的指示”(42006068), “基于多分辨 HHT 时频分析的南黄海中深层弱地震反射补偿研究”(42106208), “东海陆架盆地长排列地震数据高精度叠前逆时深度偏移成像”(42106207); 山东省自然科学基金面上项目“天然气水合物频变衰减特征定量研究”(ZR2022MD029); 崂山实验室科技创新项目“基于数字孪生的全球深时地貌重塑与资源环境预测”(LSKJ202204400)

作者简介: 刘鸿(1987—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事地球物理数据处理及应用研究, E-mail: hliu529@163.com

通讯作者: 徐华宁(1973—), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事海洋地球物理调查研究, E-mail: xuhuaning1973@163.com

收稿日期: 2023-11-20; **改回日期:** 2024-03-11. 周立君编辑

和纽带,其结果直接影响地质解释的正确性和精确度,从而影响最终的地质科学认识。因此,发展数据处理技术,不断提升野外采集数据的信噪比,去伪存真,以挖掘更丰富的地质信息,为海洋地质调查研究提供更高质量的基础资料,对于推进海洋地质调查业务发展和提升海洋地球科学系统认识水平具有重要意义。

1 数据处理技术发展历程

2011年以前,青岛海洋地质研究所自主承担的数据处理业务主要为重力、磁力和多波束测深数据处理,基本不涉及地震数据处理。数据处理工作主要由基础地质调查、油气地质调查等项目组研究人员兼职完成,基本没有专门的地球物理数据处理团队。

2011年8月,为满足国家建设海洋强国战略及单位公益性海洋地质调查研究工作的需要,青岛海洋地质研究所正式开始了地球物理数据处理专业团队的建设历程。考虑到地震数据处理的专业性和复杂性,青岛海洋地质研究所在海洋油气与水合物资源地质室筹建了地震资料处理中心,引进了一批具有地震数据处理能力的科技人员,初步配齐了地震数据处理所需的基础设施和软硬件。基础设施主要有主机房、配电室、终端室、监控室等,硬件包括集群、服务器、工作站、交换机、磁带机和绘图仪等设备,软件则配备了Omega 2010和CGG GeoCluster 5000等国际主流商业地震数据处理软件。在此基础上,地震资料处理中心成功完成了对“某海域油气资源普查”项目地震资料的试验处理,得到了相关专家的认可^[1]。后又陆续承担了东海油气资源调查等多个国家专项的单道和多道地震数据的处理任务,对海洋地质调查工作起到了一定支撑作用^[2]。

海洋地质调查业务的发展对地球物理数据处理的规范化、标准化和成果质量均提出了更高要求。在此背景下,为适应新时代地质工作要求,青岛海洋地质研究所对业务处室设置进行重新规划,于2016年8月在原地震资料处理中心的基础上成立数据处理室,将地球物理数据处理建成为一个提供技术支撑的公共服务平台,专门承担重力、磁力、多波束和地震等地球物理数据的处理工作,这也标志着数据处理业务发展由此进入了快车道。在这一阶段,数据处理所需软硬件设备配置进一步增强,基本配齐了主流的重磁、多波束和地震数据

处理软件,同时,节点计算能力、数据传输速率和存储容量都有了大幅提升。在数据处理过程中,严格按照《GB/T12763.8-2007 海洋调查规范·海洋地质地球物理调查》、《GB/T 33685-2023 地震勘探数据处理技术规程》、《GB 12327-2022 海道测量规范》等行业规范和ISO9001质量管理体系进行质量控制,通过三级质量控制体系加强了对处理过程和成果数据的质量控制,业务规范化和标准化进一步加强,使成果质量明显提升,受到服务用户的一致好评,为各类地质调查项目的生产和科研提供高质量的基础资料,显著提升对海洋地质调查业务的支撑能力。

经过近几年的快速发展,目前已基本建成了专业化、标准化的地球物理数据处理团队,数据处理业务领域也陆续拓展,目前主要包括:多道地震数据处理、高分辨率地震数据处理、三维地震数据处理、多波束数据处理、重磁数据处理和OBS数据处理等,基本覆盖了海洋地质调查的主要地球物理技术领域^[3-12],形成了一系列具有行业优势的重磁、多波束和地震数据处理技术,尤其是浅剖、单道地震数据处理和短排列小道距多道地震数据处理达到了国内一流水平。目前基本实现地球物理数据的自主处理,数据处理业务的对外依赖度显著降低,近年来,数据处理技术也实现了成果转化,为相关单位提供了10余项处理服务。

本文基于青岛海洋地质研究所数据处理现有业务领域,对目前主流的多波束高精度成像及声学信息提取技术、重磁数据处理及解释技术、浅水高分辨率浅地层剖面及单道地震数据处理技术、低信噪比小道距多道地震成像技术、长排列多道地震数据处理技术、水合物三维地震数据处理技术和地球物理反演与目标体识别技术等进行介绍,并展望了后期数据处理技术发展方向,为数据处理技术的进一步完善提供参考。

2 多波束高精度成像及声学信息提取技术

(1)海底地形地貌精细成像技术

多波束数据精细处理包括船只姿态及导航数据的处理和改正、声速及潮位变化的改正、边缘波束的处理与拼接和声线折射改正等,其中关键是水深数据噪点剔除、数据滤清以及利用3D显示工具进行微地貌精细处理。精细成像技术可以有效消除测线间的拼接痕迹,获得归算到统一高程基准面的海底3D高精度地形地貌数据(图1)。

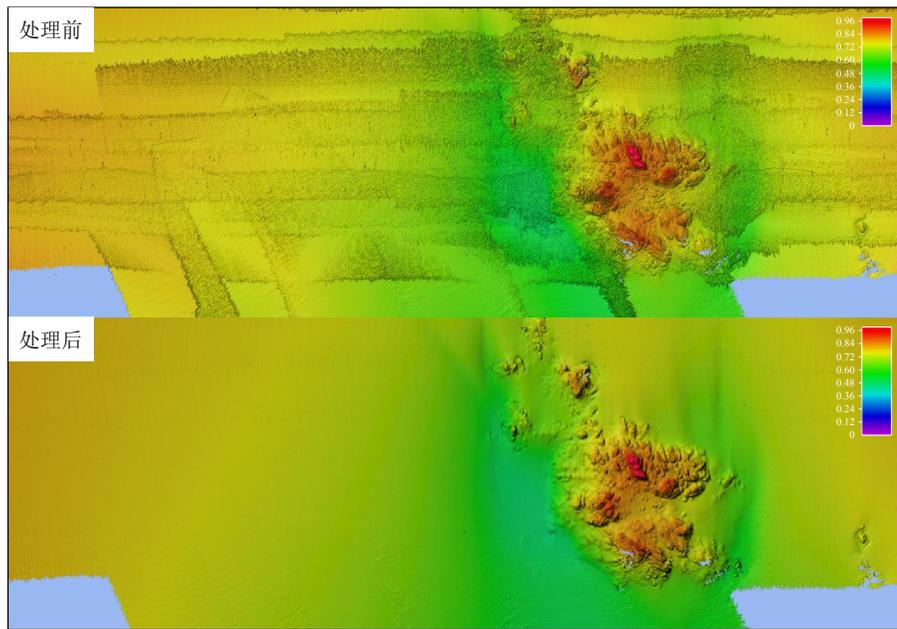


图1 某海域多波束数据精细处理前后地形地貌对比

Fig.1 Comparison in topography and geomorphology before and after fine processing of multi-beam data in a sea area

(2) 多波束海底后向散射信息处理技术

多波束测量同时采集了海底回波强度信息。原始回波强度数据由于受声波入射角、海底粗糙程度、沉积物声学参数等因素影响,不能直接反映真实海底底质特征,必须对其进行解编、系统校正、增益补偿、斜距改正、去斑点和抗锯齿等抗噪处理、均衡改正和镶嵌处理后,经过网格化和图像增强形成适用于海底表层纹理特征分析及底质分类识别研究的海底声呐影像图,应用于海底底质类型划分以及地貌解译。

(3) 多波束海洋水体声学信息提取技术

采用多波束水体声学信息提取技术对多波束水体回声数据进行解编与转换,扇面、叠加和波束等视角分析以及背景噪声滤波等处理之后,可在多维空间展示和分析水体影像结果,并与地形地貌数据无缝衔接。该技术可应用于海底探测、航道疏浚、港口规划建设、海事搜救和渔业捕捞等^[13-16]。

3 重磁数据处理及解释技术

(1) 重磁原始数据解编

野外采集的海洋重磁原始资料包括重力数据、磁力数据、导航数据和水深数据,这些数据由不同仪器采集,数据格式并不一致。因此,在详细分析不同类型原始数据特点的基础上,对重磁原始数据进行解编,实现了海洋重磁原始资料的快速规范化整理。

(2) 深海磁日变数据处理技术

深海地磁测量中磁日变测量一般采用浮标式测量,实测日变数据可能会存在记录错误、数据缺失以及数据抖动等问题。处理中利用工作区附近地磁台站数据,采用线性回归方法进行回归计算,降低地磁台站数据与实测日变数据的系统差,可以实现对实测日变数据的重构和补充(图2)。

(3) 多源多维多尺度重磁数据融合技术

同一区域的重磁数据可能存在多源多维多尺度采集的情况,多源是指重磁数据的来源和采集方式不同,例如船测重力异常、航空重力异常、卫星测高重力异常、船载磁力异常以及航空磁力异常等;多维是指数据采集高度和采集范围不同;多尺度是指数据比例尺及分辨率不同。采用多源多维多尺度数据融合技术后,可以解决由于观测精度、观测位置和数据基准不同,造成同一研究区重磁位场数据存在精度、高度及数据基准差异等问题,为开展相关研究提供统一的基础数据。

(4) 重磁综合解释和重磁震联合反演技术

重磁综合解释技术包括磁力数据低纬度化极、位场分离、边缘识别处理、界面反演、综合解释等,可为断裂划分、油气构造、深部构造研究等提供丰富基础资料^[17-19]。重磁震联合反演技术利用同测线地震、重力、磁力实测数据,充分结合不同地球物理手段的优势,综合考虑地质约束等情况,完成地质-地球物理综合解释,建立更加优化可靠的地质-地球物理模型。基于该技术,结合已有的地质资

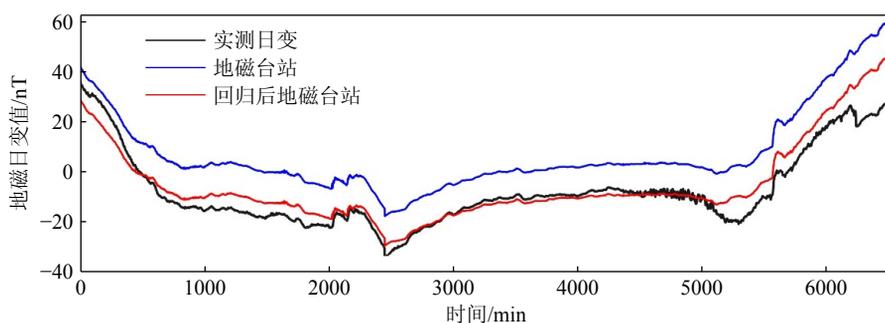


图 2 日变数据回归分析计算结果

Fig.2 The calculation results of regression analysis of daily variation of geomagnetic data

料,对地层结构、地下构造、地质体性质进行推断解释^[20-22],可用于区域构造和矿产资源勘探等研究(图 3)。

4 海洋地震数据处理技术

4.1 浅水高分辨率单道地震数据处理

(1)原始数据编辑技术

部分浅地层剖面或单道地震原始数据存在记录异常,使数据呈现类似方波特征,无法正常处理和解释。原始数据编辑技术通过对原始数据的分

析和振幅校正,消除数据的方波特征,将数据波形校正为正常形态(图 4)。

(2)异常振幅噪声压制技术

采集设备和海洋环境引起的低频干扰和随机噪声会严重影响原始地震数据的面貌,此类噪声基本呈条带状展布,频率相对较低。采用分频分时异常振幅噪声压制技术将地震数据从时间域转换到频率域,应用中值滤波来压制异常振幅,可以在不伤害有效信号的前提下,消除该类噪声对地震数据的影响^[23]。

(3)多次波压制技术

海底相关多次波是海洋地震数据中最常见的

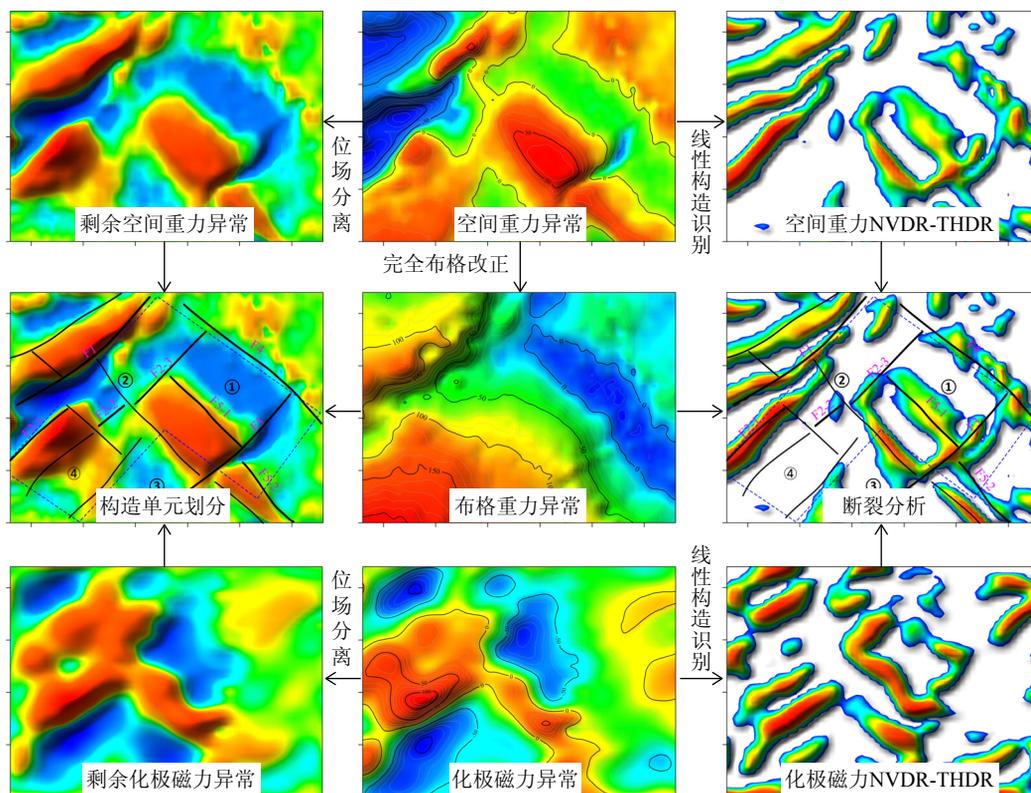


图 3 基于重磁综合解释技术的构造单元划分和断裂分析流程

Fig.3 Flowchart of comprehensive interpretation on gravity and magnetic data

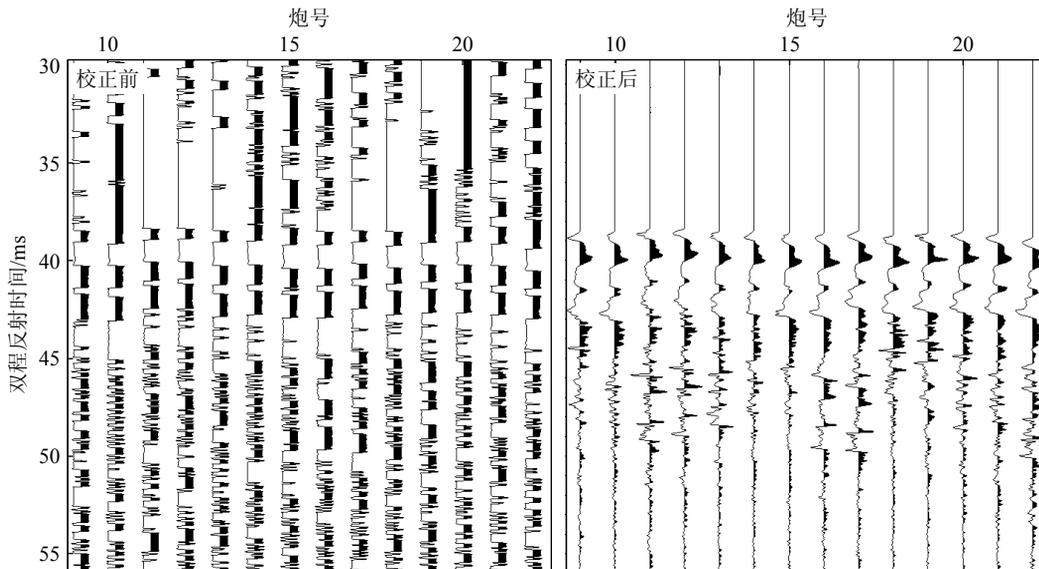


图4 原始数据编辑前后的地震数据波形

Fig.4 The waveform of the raw data before and after data editing

干扰波之一,其能量强,频带范围宽,尤其浅水区域,多次波与地层有效反射波同相轴混叠在一起,不易识别,常规的多次波压制方法通常难以彻底去除。多次波压制技术是通过海底反射时间的准确拾取,确定海底相关多次波的周期,然后进行多次波频谱分析,确定频率范围后,采用二维自适应相减法去除多次波,可以将多次波基本压制干净。

(4) 潮汐校正和剩余静校正技术

常规的潮汐校正主要按潮汐表来计算校正量,但潮汐表一般为预测的潮汐变化规律,与真实的潮汐变化周期存在一定时差。随着GPS精度的提高,高程测量精度也逐渐符合地震数据处理的要求,因此处理中采用GPS高程数据计算震源和电缆检波器的校正量,然后按静校正的方式进行潮汐校正。海上采集设备和采集环境可能会使炮点与检波点的距离产生动态变化,记录的海底反射波旅行时随之发生变化,造成海底反射不能反映真实的海底形态,剩余静校正技术可以校正炮检距变化引起的海底反射时差,恢复地层同相轴的连续性^[24](图5)。

(5) 振幅补偿和信号增强技术

在浅水高分辨率单道地震采集过程中,采集设备、环境等因素可能会引起振幅能量出现空间上的差异,处理中需要对其进行空间振幅补偿^[25-26]。该技术在保持相对振幅不变的前提下,通过统计学的方式校正各种因素对振幅的影响,使整个剖面上的能量达到均衡。采用分频信号增强技术对地震数据增强处理,压制随机噪声,使地震波组特征更加清楚,同相轴的连续性增强^[27-28]。

4.2 低信噪比小道距多道地震成像

(1) 叠前多域噪声压制技术

小道距多道地震数据中常见的线性干扰波可利用频率空间域相干噪声压制方法进行压制。该方法利用最小平方方法在频率-空间域估算出指定速度和频率范围内的相干噪声,然后从地震记录中减去。被压制的部分主要集中在干扰波覆盖的区域,其他则不受影响,可保持振幅和波形稳定。

针对小道距资料中常见的双曲形噪声,可以基于其与有效波不同的速度和频率特征进行衰减。通过分频处理,提取噪声的主要频带,进行动校正,在频率波数域内选取适合的切除角度进行均值滤波,可以达到压制双曲形噪声的目的。图6为处理前后的叠加剖面对比,处理后基本去除了双曲形噪声,同相轴连续性增强,信噪比提高^[29]。

(2) 电缆等浮校正技术

部分小道距多道地震在采集时没有采用水鸟控制电缆,电缆受重力和海况影响,会导致地震记录中海底和地层反射存在明显的同相轴错动,动校正后的共中心点道集(CMP道集)存在较大时差,从而影响剖面的叠加效果^[30]。本技术综合利用虚反射走时方法和道集互相关方法,实现非常规电缆的等浮时差校正,校正后的地震数据同相轴拉平,连续性增强。

(3) 加权相干加强技术

部分小道距地震数据中可能存在检波器响应差异导致不同偏移距能量不一致的情况,常规叠加

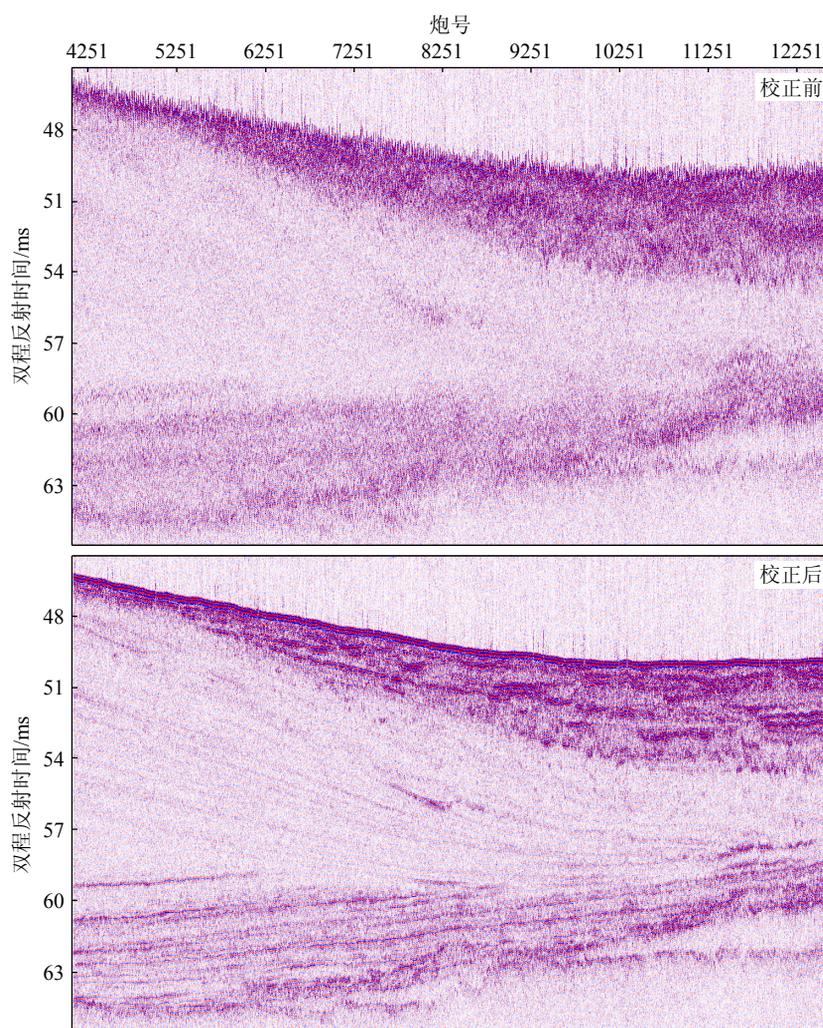


图 5 剩余静校正前后浅地层剖面对比

Fig.5 Comparison of sub-bottom profile before and after topographic correction

后效果欠佳。加权相干加强技术通过对 CMP 道集按振幅大小进行道重排, 然后与径向滤波后的叠加剖面进行相干分析, 计算加权系数进行加权叠加, 从而增强有效反射信号。图 7 是相干加强前后叠加剖面的对比, 可以看出剖面整体信噪比提升, 地层构造成像更加清晰, 且没有影响反射能量相对强弱关系。

4.3 长排列多道地震数据处理

(1) 虚反射压制技术

海上地震采集时, 震源和检波器沉放在海面以下, 而海面是一个很强的反射面, 检波器在接收到一次反射波的同时还会接收到一次波从海面反射回的波, 通常称为虚反射(鬼波)。虚反射和一次反射波的波形是一样的, 这两种波混叠在一起, 造成陷波, 降低了地震记录的有效频带。虚反射压制技术的应用能够消除陷波影响, 从而补偿陷波处的能

量, 改善原始信号的频谱。

(2) 确定性水层多次波压制技术

确定性水层多次波压制技术(DWD)通常用于压制浅水的水层多次波。将地震数据通过线性 Radon 变换从时空域转换到 τ - p 域, 在不同的 Radon 时差处, 多次波均表现出周期性。该技术利用在 τ - p 域中多次波的周期性特征可以实现浅水多次波的准确预测, 使用 DWD 后有效反射下跟随的“多轴”现象被消除, 突出了有效反射信号^[31]。

(3) 自由表面多次波压制技术

自由表面多次波压制技术利用地震数据自身进行时空褶积来预测多次波。使用自由表面多次波压制技术, 可以有效地去除长周期的自由表面多次波^[32-34]。

(4) 扩展层间多次波压制技术

与表面多次波不同, 层间多次波的反射点不在自由表面, 需要地下反射层信息来预测多次波。当

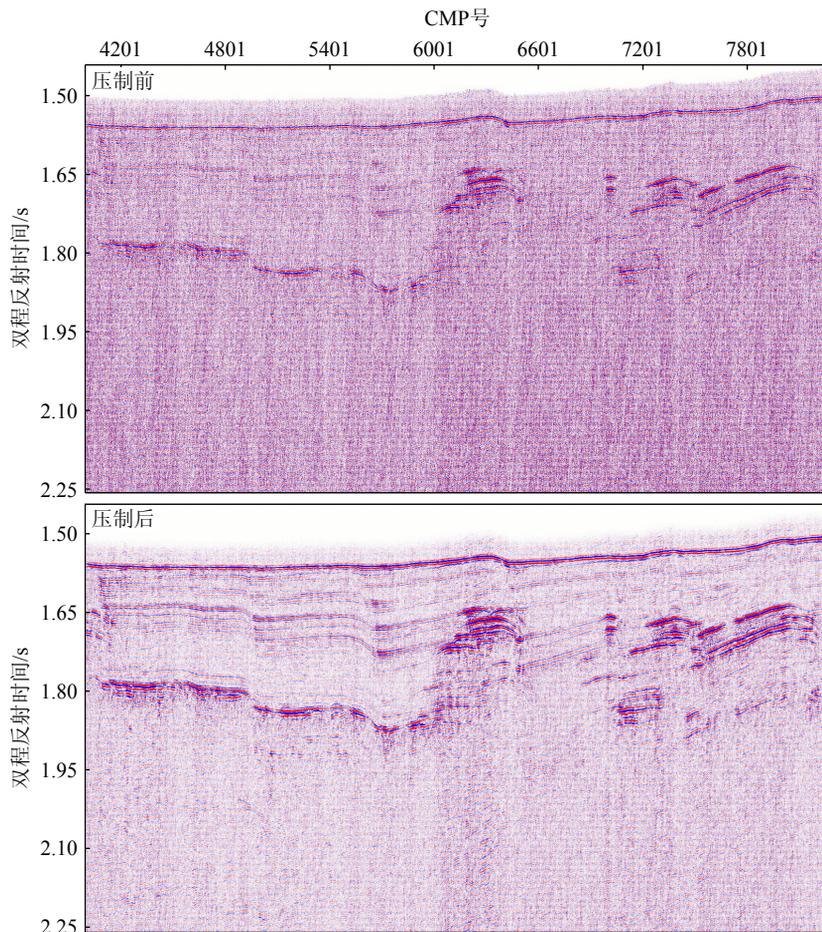


图6 双曲噪声压制前后的叠加剖面

Fig.6 Stack sections before and after hyperbolic noise suppression

浅层存在较多的强振幅反射界面时,在这些反射界面的下部容易形成串珠状的层间多次波,与有效波相混叠,影响后续的地震解释。应用扩展层间多次波压制技术,可对层间多次波进行有效压制,使地震剖面上地层间的反射波组关系更清晰。

(5)高精度 Radon 变换技术

地震数据中部分多次波的最后一次下行反射未发生在自由表面,这种情况下表面多次波相关的压制方法不适用,这类长周期多次波的旅行时相对于一次反射波长,速度相对一次波偏低,时距曲线表现为不同的动校时差。采用高精度抛物线 Radon 变换可以有效压制中-远偏移距多次波,突出一次反射波的能量^[35-36]。

(6)剩余多次波压制技术

一般情况下,采用 Radon 变换等基于多次波与有效波速度差异的多次波压制技术会在近偏移距处残余部分多次波。地震数据中的折射多次波和绕射多次波与近道的剩余多次波的特征相似,能量相对强,在地震单炮记录上比较集中。采用道序重

排多域振幅压制技术可以压制近偏移距的残留多次波、折射多次波和绕射多次波,提高地震数据的信噪比。

通过多种多次波压制方法的组合,可以达到较理想的多次波压制效果。从速度谱对比(图8)可以看出,压制前中深部地层的反射信号淹没在多次波中无法识别,进行组合压制后,多次波相关的速度能量团被衰减,有效反射波速度能量团增强,为精确的速度拾取和偏移成像奠定基础。

(7)叠前时间和深度偏移技术

多道地震数据处理中需要进行叠前时间偏移或叠前深度偏移实现复杂构造的精确归位。叠前偏移前需要对共偏移距域的振幅异常进行调整,以减少振幅异常引起的偏移画弧。同时,对高精度拾取的速度场进行时间和空间平滑处理,以符合叠前偏移要求。在速度横向变化不剧烈,构造倾角不大的工区可采用弯曲射线叠前时间偏移技术。当地层横向速度变化剧烈时,需要采用叠前深度偏移技术实现反射界面准确归位及成像^[37-38]。图9为叠前

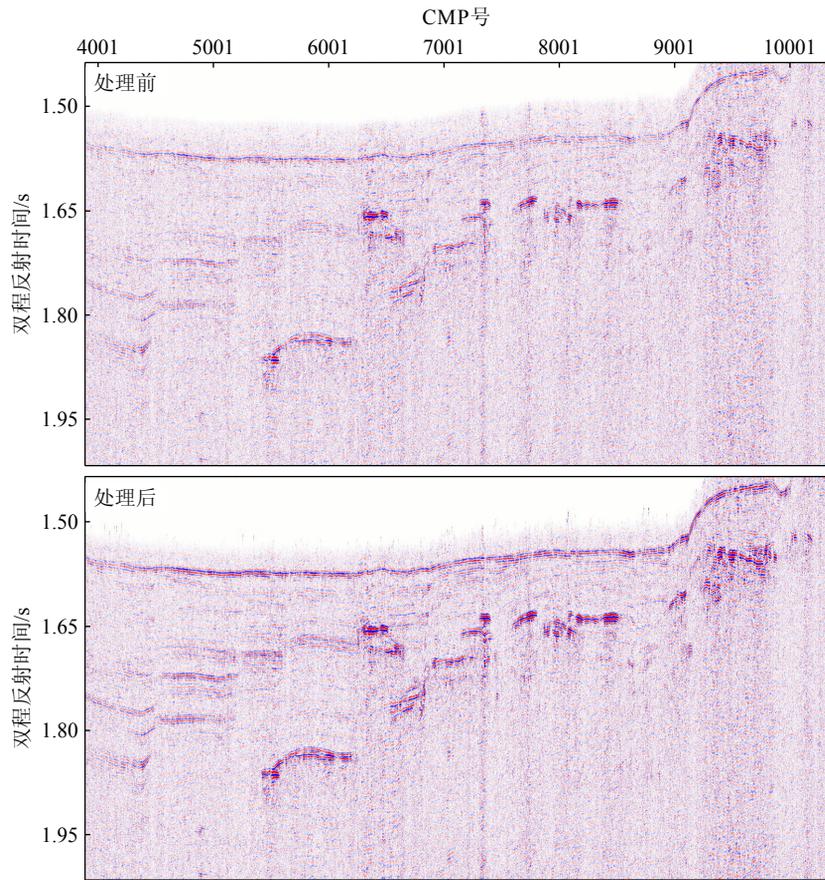


图 7 加权相干加强前后叠加剖面对比

Fig.7 Stack sections before and after weighted coherent enhancement processing

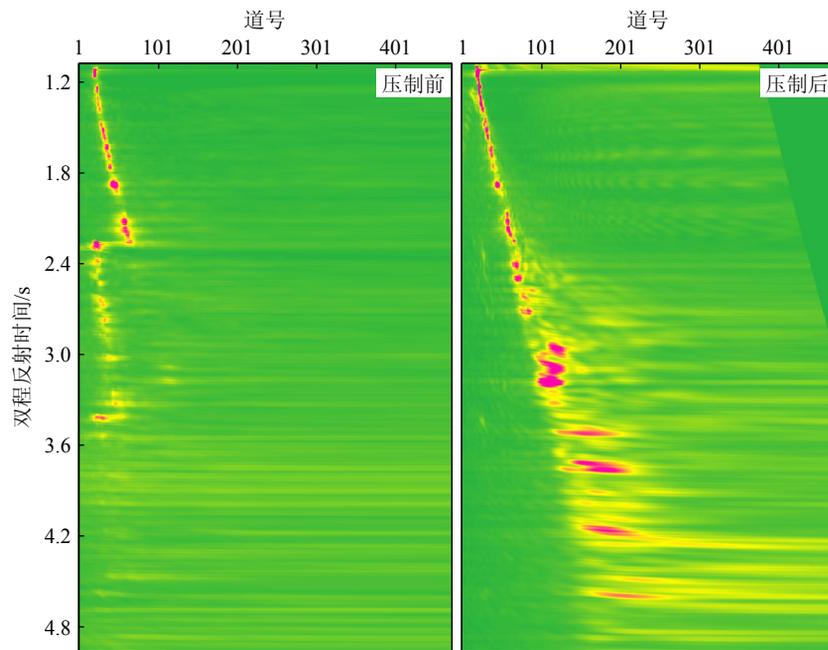


图 8 压制多次波前后速度谱对比

Fig.8 Comparison of a velocity spectrum before and after multiple suppression

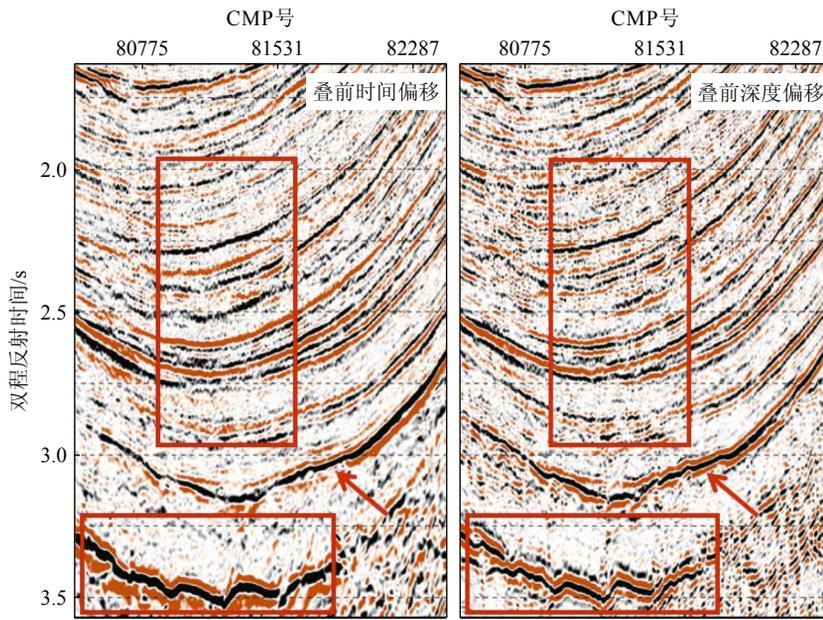


图9 叠前时间偏移剖面（左）和时间域显示叠前深度偏移剖面（右）

Fig.9 Comparison of pre-stack time migration profile (left) and pre-stack depth migration profile (right)

时间偏移与叠前深度偏移对比,可见叠前深度偏移对倾斜地层的刻画更加准确。

4.4 水合物三维地震数据处理

(1)子波整形技术

海洋地震勘探空气枪震源激发时,高压空气在瞬间注入水中,所形成的气泡在水中发生膨胀与收缩,会产生气泡效应。气泡效应会影响地震数据的分辨率和信噪比。子波整形技术基于统计学原理,提取平坦海底位置的地震子波,然后将其应用于整个工区进行去气泡效应和零相位化处理^[39]。

(2)高精度速度分析与建模技术

速度在地震资料处理中至关重要,准确的速度场是获得高质量处理成果资料的前提。高精度速度分析与建模技术采用了多种方法提高速度拾取的精度。首先利用互相关速度谱、小叠加段、动校正 CMP 道集、叠加及偏移剖面等多种数据进行质控,提高速度分析结果的可靠性。然后逐步加密速度拾取样点,在重点构造区域进行空间方向和时间方向的局部加密。最后进行常速扫描与速度比例扫描,根据速度扫描的结果调整速度场,保证叠加成像及叠前偏移成像的效果。如图 10 所示,通过该技术获得的均方根速度场,与地震剖面的构造具有较好的对应关系。

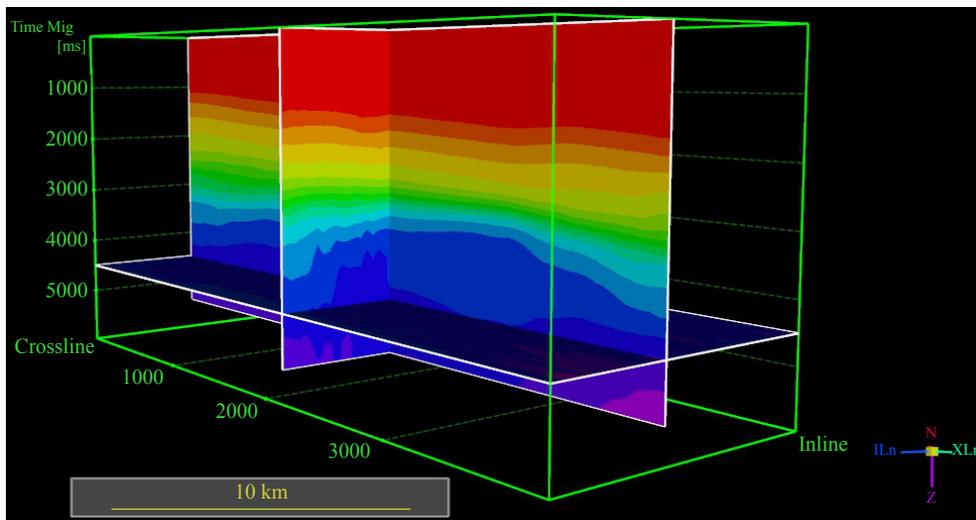


图 10 最终速度场 3D 显示

Fig.10 The three-dimensional display of the final velocity field

(3) 数据规则化技术

野外实际采集资料通常会存在面元覆盖不均的现象, 局部地区还会有面元缺失, 处理过程中需要对地震数据进行规则化处理。相比于传统面元均化处理主要采用的静态和动态面元均化等技术, 三维地震数据规则化技术是利用新的叠前插值法进行缺失道的重构, 实现覆盖次数均匀化和数据面元中心化, 它解决了动态面元均化地震道直接“搬家”的误差以及 CMP 点没有位于面元中心等问题, 满足了叠前时间偏移的要求, 提高了偏移成像效果^[40-41]。如图 11 所示, 数据规则化之前, 资料面元覆盖不均, 局部地区面元覆盖次数较低, 数据规则化之后, 覆盖次数变得均匀。

(4) 三维 Kirchhoff 弯曲射线叠前时间偏移技术

获得高质量的数据和准确的速度场后, 叠前时间偏移成像处理主要取决于偏移参数的选取和偏移方法的选择。为了实现水合物地震数据高精度叠前偏移成像, 采用全频带、小偏移孔径为基本偏

移成像原则, 通过对偏移孔径、偏移倾角的测试, 选择合适参数进行叠前时间偏移。偏移后绕射波准确归位, 地下构造的真实形态被恢复。

5 地球物理反演与目标体识别技术

(1) 地球物理反演技术

地球物理反演可根据各种地球物理观测数据推测地球不同深度的结构、形态及物质成分, 定量计算各种相关的地球物理参数^[42-44]。应用反演技术通过对双相介质的天然气水合物地震反射特征及量化方法研究, 建立了天然气水合物、游离气地震反射特征与储层物性参数之间的定量关系, 揭示了天然气水合物地震反射特征的形成机理。利用地震反射特征定量反演水合物储层物性参数, 在一定程度上为我国水合物矿产资源开发利用提供了理论和技术支持^[45-46]。

(2) 基于属性提取的目标识别技术

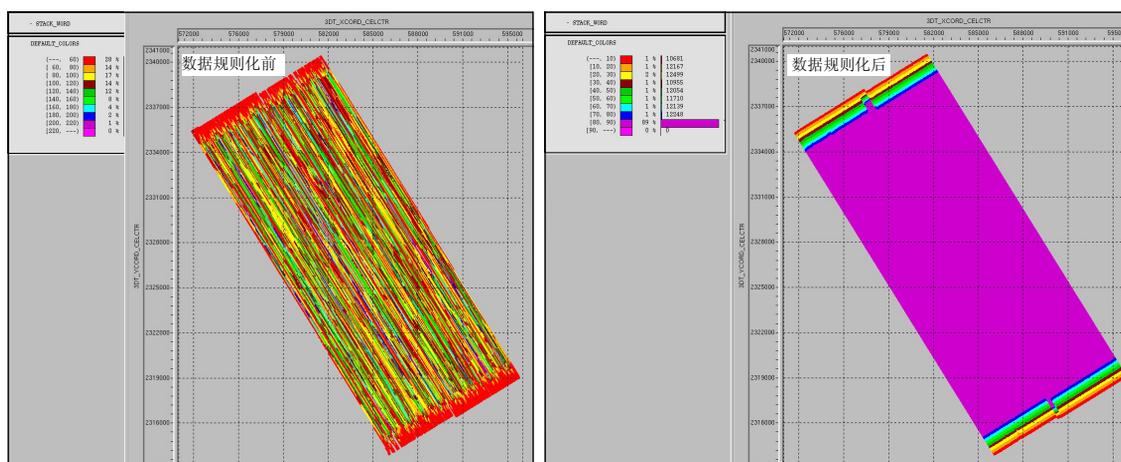


图 11 数据规则化前后覆盖次数对比

Fig.11 Comparison of the seismic folding before and after data regularization

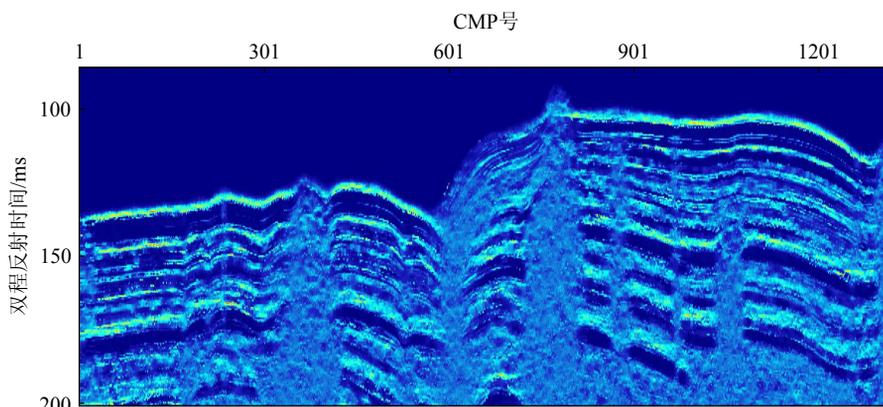


图 12 浅地层剖面上浅层气逃逸通道的刻画 (据文献 [47])

Fig.12 The escape channel of shallow gas deciphered from a shallow stratigraphic profile (from reference [47])

地震属性提取技术被广泛应用于目标识别及储层参数预测中。利用数学计算将三维地震数据体转化为属性数据体,通过对属性体切片剖面进行分析,可以清晰识别异常点和异常区,如海底管线和热液喷口、浅层特殊埋藏体和沉积体、纵横向流体运移通道以及水合物赋存带等(图12),为工程地质、海洋装备维护、海底矿产资源开发及环境风险评估等工作提供支撑^[47]。

6 数据处理技术发展展望

随着海洋调查新装备的推广应用和调查能力的日益提升,海洋地球物理工作不断向新的深度和广度进军,对数据精度和准确度的要求愈发提高,因此数据处理工作领域也日益拓展,处理难度也越来越大,对处理新技术的发展也提出了更高要求。面对新形势下对海洋地球物理数据处理技术的新需求,“十四五”期间,青岛海洋地质研究所将数据处理业务发展与地质调查需求相结合,确定了6项关键技术创新计划:多波多分量地震数据处理与成像技术、垂直缆采集地震数据处理技术、重磁多波束多源数据融合技术、基于海底声学数据的非地质因素目标识别技术、重磁震联合反演技术以及三维地震数据处理成像技术。经过3年多的发展,三维地震数据处理成像技术、重磁震联合反演技术以及多波多分量地震数据处理与成像技术等陆续取得突破。今后,随着数据处理逐渐向高分辨率、高信噪比、高效率和智能化方向发展,还应重点持续加强关键技术前瞻研究,突破一批关键核心技术,紧跟数据处理领域行业发展方向。今后重点发展的方向主要有:

(1)重点业务领域持续发展优势技术:继续发展海域多次波、虚反射压制技术、复杂构造成像技术和高分辨率地震数据处理技术;突破垂直缆数据处理技术,完善针对OBS、OBC、OBN数据的多波多分量处理技术体系。

(2)前沿热点领域突破核心技术:研发重磁梯度张量数据处理技术;研发三维叠前深度偏移技术,突破逆时偏移等高精度地震成像技术,助力海洋资源调查。

(3)发展正反演模拟和分析技术:开发全波形反演技术,与深度偏移成像联合,持续改善成像质量;进一步完善重磁震联合反演技术;开发基于浅剖、多波束和重磁数据的信息提取和反演技术,完善目标识别技术体系。

(4)探索人工智能、大数据等相关技术的处理应用:探索地震智能处理技术;开发基于大数据的重磁快速反演技术;开发基于多种地球物理手段的目标快速自动识别技术。

(5)推动自主知识产权软件开发:加强对优势技术的推广应用,并进行相应的软件开发;力争形成一批自主知识产权软件,打造地球物理数据处理集成平台。

(6)持续加强处理装备建设:持续更新软件,及时引入前沿技术;分步加强硬件,提升大数据量、大计算量处理能力,满足海洋地质调查发展所需;积极沟通协调相关单位,通过多种形式的合作提升数据处理装备建设水平。

参考文献 (References)

- [1] 陈建文. 南黄海崂山隆起海相中-古生界发现多个大型圈闭构造[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(4): 69-70. [CHEN Jianwen. Many large trap structures were found in the marine Mesozoic-Paleozoic of Laoshan Uplift in the South Yellow Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(4): 69-70.]
- [2] 杨传胜, 杨长清, 杨艳秋, 等. 东海陆架盆地中生界残留分布特征及其大地构造意义[J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(11): 86-95. [YANG Chuansheng, YANG Changqing, YANG Yanqiu, et al. Characteristics of Mesozoic strata in the East China Sea shelf basin and their geotectonic implications[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(11): 86-95.]
- [3] 刘俊, 吴淑玉, 陈建文, 等. 南黄海崂山隆起浅水多次波压制及成像分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(3): 111-119. [LIU Jun, WU Shuyu, CHEN Jianwen, et al. Shallow water multiples depression and imaging analysis on the Laoshan uplift of the South Yellow Sea Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(3): 111-119.]
- [4] 颜中辉, 栾锡武, 王赞, 等. 基于经验模态分解的分数维地震随机噪声衰减方法[J]. 地球物理学报, 2017, 60(7): 2845-2857. [YAN Zhonghui, LUAN Xiwu, WANG Yun, et al. Seismic random noise attenuation based on empirical mode decomposition of fractal dimension[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(7): 2845-2857.]
- [5] Yang J J, Luan X W, Fang G, et al. Elastic reverse-time migration based on amplitude-preserving P- and S-wave separation[J]. Applied Geophysics, 2016, 13(3): 500-510.
- [6] 陈江欣, 宋海斌, 关永贤, 等. 海底冷泉的地震海洋学初探[J]. 地球物理学报, 2017, 60(2): 604-616. [CHEN Jiangxin, SONG Haibin, GUAN Yongxian, et al. A preliminary study of submarine cold seeps applying Seismic Oceanography techniques[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(2): 604-616.]
- [7] 宋海斌, 陈江欣, 赵庆献, 等. 南海东北部地震海洋学联合调查与反演[J]. 地球物理学报, 2018, 61(9): 3760-3769. [SONG Haibin, CHEN Jiangxin, ZHAO Qingxian, et al. Investigation and inversion of

- seismic oceanography dataset in the NE South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(9): 3760-3769.]
- [8] Chen J X, Song H B, Guan Y X, et al. Geological and oceanographic controls on seabed fluid escape structures in the northern Zhongjianshan Basin, South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 168: 38-47.
- [9] Chen J X, Tong S Y, Han T G, et al. Modelling and detection of submarine bubble plumes using seismic Oceanography[J]. *Journal of Marine Systems*, 2020, 209: 103375.
- [10] Liu B, Yang L, Chen J X, et al. Seismic diffraction analysis of a fluid escape pipe beneath the submarine gas bubble plume in the Haima cold seep area[J]. *Geofluids*, 2021, 2021: 9945548.
- [11] Liu H, Luan X W, Guo L L, et al. Fault distribution and formation mechanism of a magnetic quiet zone in the northern South China Sea[J]. *Geological Journal*, 2016, 51(S1): 331-345.
- [12] 张菲菲, 王万银, 李倩, 等. DEM 网格间距及校正半径对重力地形校正的影响[J]. *物探与化探*, 2023, 47(3): 597-607. [ZHANG Feifei, WANG Wanyin, LI Qian, et al. Influence of DEM grid spacing and correction radius on terrain correction in gravity exploration[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2023, 47(3): 597-607.]
- [13] 韩同刚, 童思友, 陈江欣, 等. 海底羽状流探测方法分析[J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(5): 2113-2125. [HAN Tonggang, TONG Siyou, CHEN Jiangxin, et al. Analysis of detection methods for submarine plume[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(5): 2113-2125.]
- [14] Liu B, Chen J X, Pinheiro L M, et al. An insight into shallow gas hydrates in the Dongsha area, South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, 40(2): 136-146.
- [15] 赵文字, 童思友, 陈江欣, 等. 海底冷泉羽状流及其资源效应探讨[J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(5): 2251-2263. [ZHAO Wenyu, TONG Siyou, CHEN Jiangxin, et al. Discussion on the submarine bubble plume and its effect on hydrocarbon resources[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(5): 2251-2263.]
- [16] Zhu C Q, Li Q P, Li Z H, et al. Seabed fluid flow in the China Seas[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1158685.
- [17] 张菲菲, 王万银, 杨金玉, 等. 根据重力数据研究南海北部陆缘断裂带的延伸问题[J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(5): 2113-2119. [ZHANG Feifei, WANG Wanyin, YANG Jinyu, et al. Research on the extension of faults zones in northern margin of the South China Sea based on the gravity data[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(5): 2113-2119.]
- [18] 韩波, 张菲菲, 张训华, 等. 利用重磁震资料研究山东半岛及南黄海北部地区火成岩分布[J]. *中国海洋大学学报*, 2016, 46(5): 78-82. [HAN Bo, ZHANG Feifei, ZHANG Xunhua, et al. The distribution data of igneous rocks of the South Yellow Sea and Shandong Peninsula by gravity and magnetic anomalies and seismic data[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(5): 78-82.]
- [19] 张菲菲, 孟祥君, 韩波, 等. 辽东湾地区重、磁异常特征及其区域构造分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(3): 104-112. [ZHANG Feifei, MENG Xiangjun, HAN Bo, et al. Gravity-magnetic anomalies of Liaodong Bay and their tectonic implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(3): 104-112.]
- [20] 刘鸿, 栾锡武, 岳保静, 等. 南海北部磁静区重磁特征及成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(4): 65-78. [LIU Hong, LUAN Xiwu, YUE Baojing, et al. Research on genesis and characteristics of magnetic quiet zone in the north South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(4): 65-78.]
- [21] 李海龙, 吴招才, 纪飞, 等. 南海北部地壳密度结构: 基于约束三维重力反演[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(5): 1894-1912. [LI Hailong, WU Zhaocai, JI Fei, et al. Crustal density structure of the northern South China Sea from constrained 3-D gravity inversion[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(5): 1894-1912.]
- [22] 韩波, 张菲菲, 田振兴. 利用 PARKER 变密度多层界面快速反演技术反演渤海地区密度界面[J]. *高技术通讯*, 2020, 30(6): 637-643. [HAN Bo, ZHANG Feifei, TIAN Zhenxing. Inversion of density interface with PARKER variable technology in Bohai region by gravity data[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2020, 30(6): 637-643.]
- [23] 潘军, 栾锡武, 刘鸿, 等. 异常振幅衰减技术在多道地震数据处理中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(4): 1639-1645. [PAN Jun, LUAN Xiwu, LIU Hong, et al. Application of anomalous amplitude noise attenuation in seismic data processing of multichannel survey line[J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(4): 1639-1645.]
- [24] 王小杰, 徐华宁, 刘俊. 南黄海中部浅地层剖面数据处理新进展[J]. *海洋地质前沿*, 2019, 35(6): 69-72. [WANG Xiaojie, XU Huaning, LIU Jun. New progress in data processing of shallow profile on the central uplift of South Yellow Sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2019, 35(6): 69-72.]
- [25] 王小杰, 栾锡武. 基于小波分频技术的地层 Q 值补偿方法研究[J]. *石油物探*, 2017, 56(2): 203-209. [WANG Xiaojie, LUAN Xiwu. The study of formation Q value compensation method based on wavelet frequency division technology[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2017, 56(2): 203-209.]
- [26] 颜中辉, 徐华宁, 李攀峰, 等. 基于 HHT 方法的地层 Q 值补偿方法研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(1): 175-183. [YAN Zhonghui, XU Huaning, LI Panfeng, et al. Research of compensation method for formation Q value based on HHT method[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(1): 175-183.]
- [27] 刘财, 张海江, 杨宝俊, 等. 小波变换在高分辨率地震勘探数据处理中的应用[J]. *长春地质学院学报*, 1996, 26(1): 78-82. [LIU Cai, ZHANG Haijiang, YANG Baojun, et al. Application of wavelet transform to digital processing in high resolution seismic prospecting[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 1996, 26(1): 78-82.]
- [28] 李丽青, 陈泓君, 彭学超, 等. 海洋区域地质调查中的高分辨率单道地震资料关键处理技术[J]. *物探与化探*, 2011, 35(1): 86-92, 102. [LI Liqing, CHEN Hongjun, PENG Xuechao, et al. The main processing methods of high-resolution single-channel seismic data in marine regional geological survey[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2011, 35(1): 86-92, 102.]
- [29] 颜中辉, 方刚, 徐华宁, 等. 希尔伯特谱白化方法在海洋地震资料高分辨率处理中的应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(4): 212-220. [YAN Zhonghui, FANG Gang, XU Huaning, et al. The application of Hilbert spectral whitening method to high resolution processing of marine seismic data[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(4): 212-220.]

- [30] 施剑, 吴志强, 刘江平, 等. 动校正拉伸分析及处理方法 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(4): 187-194. [SHI Jian, WU Zhiqiang, LIU Jiangping, et al. Normal moveout stretch correction and its processing method[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(4): 187-194.]
- [31] 杨佳佳, 潘军, 栾锡武, 等. 浅水多次波衰减技术在多道地震数据处理中的应用 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(1): 167-174. [YANG Jiajia, PAN Jun, LUAN Xiwu, et al. Application of attenuation technology to shallow water multiples in multi-channel seismic data processing[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2020, 40(1): 167-174.]
- [32] 牛滨华, 沈操, 黄新武. 波动方程多次波压制技术的进展 [J]. 地球物理学进展, 2002, 17(3): 480-485. [NIU Binhua, SHEN Cao, HUANG Xinwu. Progress in multiple attenuation techniques based on wave equation[J]. Progress in Geophysics, 2002, 17(3): 480-485.]
- [33] 肖二莲, 陈瑜, 万欢, 等. SRME 多次波衰减方法在海洋地震资料中的应用 [J]. 地球物理学进展, 2010, 25(3): 1057-1064. [XIAO Erlin, CHEN Yu, WAN Huan, et al. Surface-related multiple elimination on marine seismic data[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(3): 1057-1064.]
- [34] 王小杰, 颜中辉, 刘俊, 等. 基于模型优化的广义自由表面多次波压制技术在印度洋深水海域的应用 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(5): 221-230. [WANG Xiaojie, YAN Zhonghui, LIU Jun, et al. Generalized free surface multiple suppression technique based on model optimization and its application to the deep water of the Indian Ocean[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2021, 41(5): 221-230.]
- [35] 颜中辉, 王小杰, 刘媛媛, 等. 东海多次波压制的关键技术 [J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(7): 64-72. [YAN Zhonghui, WANG Xiaojie, LIU Yuanyuan, et al. Key techniques for multiple wave suppression in the East China Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(7): 64-72.]
- [36] 张兴岩, 朱江梅, 杨薇, 等. 海洋资料多次波组合衰减技术及应用 [J]. 物探与化探, 2011, 35(4): 511-515. [ZHANG Xingyan, ZHU Jiangmei, YANG Wei, et al. Group technology of antimultiple in marine seismic data processing and its application[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2011, 35(4): 511-515.]
- [37] 王小杰, 颜中辉, 刘欣欣, 等. 基于小波分频的 Q 值补偿技术在东海中深层油气勘探中的应用 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(6): 200-206. [WANG Xiaojie, YAN Zhonghui, LIU Xinxin, et al. The application of formation Q value compensation method based on wavelet frequency division to the exploration of middle-deep hydrocarbon in the East China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019, 39(6): 200-206.]
- [38] Yang J J, He B S, Xu H N, et al. Stretching correction for amplitude-preserving vector wavefield reverse-time migration[J]. *China Geology*, 2019, 2(2): 179-188.
- [39] 高静怀, 汪文秉, 朱光明, 等. 地震资料处理中小波函数的选取研究 [J]. 地球物理学报, 1996, 39(3): 392-400. [GAO Jinghuai, WANG Wenbing, ZHU Guangming, et al. On the choice of wavelet functions for seismic data processing[J]. Acta Geophysica Sinica, 1996, 39(3): 392-400.]
- [40] 徐华宁, 舒虎, 李丽青, 等. 单源单缆方式采集的天然水合物三维地震数据处理技术 [J]. 地球物理学进展, 2009, 24(5): 1801-1806. [XU Huaning, SHU Hu, LI Liqing, et al. 3-D seismic data processing techniques for gas hydrate by the single-source and single-cable acquisition method[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(5): 1801-1806.]
- [41] 杨鹏程, 李斌, 邵文潮, 等. 海域天然气水合物三维地震处理关键技术应用 [J]. 海洋石油, 2021, 41(3): 1-7. [YANG Pengcheng, LI Bin, SHAO Wenchao, et al. The key techniques of 3D seismic data processing for gas hydrate[J]. Offshore Oil, 2021, 41(3): 1-7.]
- [42] 王小杰, 栾锡武, 王延光, 等. 黏弹性介质叠前地震反演方法 [J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(3): 544-555. [WANG Xiaojie, LUAN Xiwu, WANG Yanguang, et al. Prestack seismic inversion of viscoelastic medium[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(3): 544-555.]
- [43] 刘欣欣, 尹燕欣, 栾锡武, 等. 基于孔隙介质理论的地震反射特征分析 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(14): 8-19. [LIU Xinxin, YIN Yanxin, LUAN Xiwu, et al. Analyses of seismic reflection characteristic based on porous medium theory[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(14): 8-19.]
- [44] Liu X X, Yin X Y, Luan X W, et al. Seismic rock physical modelling for gas hydrate-bearing sediments[J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(9): 1261-1278.
- [45] 杨睿, 刘丽华, 郭攀, 等. 琼东南海域海底浅层水合物层识别研究 [J]. 地质论评, 2017, 63(S1): 185-186. [YANG Rui, LIU Lihua, GUO Pan, et al. Research on gas hydrate identification in shallow sediments of Qiongdongnan area[J]. Geological Review, 2017, 63(S1): 185-186.]
- [46] 霍元媛, 杨睿, 潘纪顺, 等. 波形反演在天然气水合物中的应用研究进展 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(4): 207-221. [HUO Yuanyuan, YANG Rui, PAN Jishun, et al. Application of full waveform inversion to gas hydrate research[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(4): 207-221.]
- [47] 陈珊珊, 杨睿, 刘欣欣, 等. 参量阵浅地层剖面的处理方法及在识别浅层天然气水合物中的应用 [J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(10): 77-84. [CHEN Shanshan, YANG Rui, LIU Xinxin, et al. Processing of parametric array sub-bottom profiles and the application in identifying shallow gas hydrates[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(10): 77-84.]