

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

李丽青, 陈泓君, 彭学超, 温明明, 李文成
(国土资源部广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760)

摘要: 在海洋区域地质调查中, 为了揭示浅地层结构、断裂、岩浆活动以及各种潜在地质灾害, 高分辨率单道地震勘探是不可缺少的重要手段之一, 但由于受到各种噪声干扰, 原始地震资料质量不佳, 信噪比较低, 影响了后续的解释工作。笔者阐述了采用关键单道地震处理技术, 极大地提高了资料的信噪比和分辨率, 为海洋区域地质研究提供了良好的基础资料。

关键词: 海洋区域地质调查; 高分辨率; 单道地震; 数据处理

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2011)01-0086-07

海洋区域地质调查是一项区域性、基础性、公益性的海洋国土资源调查^[1], 是海域其他地质工作和矿产资源评价的基础。其主要利用各种地质—地球物理综合调查技术对海底地形地貌特征、沉积物类型、沉积层结构、地球化学特征、海洋地球物理场、断裂、岩浆活动、矿产分布规律等进行调查, 为国民经济可持续发展、海域划界和国防建设提供基础地质资料。

在海洋区域地质调查中, 为了揭示海底浅地层结构、活动断裂、岩浆活动以及潜在灾害地质等特征, 高分辨率数字单道地震是必不可少的调查手段之一^[2-3]。近几年来, 广州海洋地质调查局在南海北部开展了多个图幅的1:100万海洋区域地质调查, 利用单道地震调查技术获得了上万公里的震害资料。

南海北部地形变化大, 地貌形态复杂^[4-5], 跨越了陆架、陆坡和深海平原三种地貌单元, 加之南海北部受季节性气候影响, 风浪较大, 海流及潮流变化比较复杂^[6-7], 海上作业过程中受到各种因素干扰, 部分地震资料中存在严重噪声, 虽主频较高, 但信噪比较低, 以至于原始剖面无法识别有效地层。各种地质信息被噪声所干扰, 直接对原始资料解释非常困难, 必须对资料进行有效处理才能获得高质量地震剖面。

对于海上单道地震资料处理技术已有相关的研究, 如信噪比和分辨率的提高方法^[8-9], 多次波的衰

减问题^[3,10], 静校正处理^[11-12]等等, 但这些只是针对单道地震处理的某一环节进行论述, 缺少综合性。笔者主要讨论单道地震资料关键处理技术, 并进行质量评述和总结。

1 关键处理技术

单道地震资料中存在的主要问题是噪声严重。单道地震资料噪声分为有源噪声和环境噪声, 有源噪声是由震源或次生震源形成的干扰背景, 包括直达波、多次波、绕射波和气泡效应等。其中多次波是海上地震最主要的有源噪声之一^[13], 对地震资料的质量影响最严重。环境噪声主要是洋流波浪、机械振动以及船动力干扰等引起的, 其随机产生, 分布较均匀, 在时间剖面上呈不规则形态, 构成地震记录的主要背景^[14]。涌浪噪声、各种线性或随机噪声则为环境噪声。

此外, 受风浪影响, 地震反射同相轴产生时移而抖动, 呈波浪起伏状, 一些精细构造的成像畸变而难以识别, 剖面的信噪比和分辨率明显降低。另外, 原始单道地震剖面是按照水平层状地层模式来反射成像的, 当地层倾斜时则成像位置失真。由于震源子波以及噪声的影响, 单道地震资料的分辨率也受到影响而有所下降。

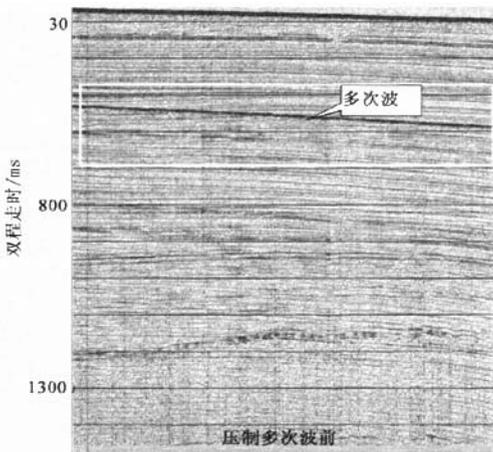
针对上述问题, 资料处理的关键是信噪分离, 压制噪音, 提高资料信噪比, 使得剖面能够清楚反映目标地层特征。具体处理目标如下: ①压制多次波, 恢

复被覆盖地层的成像;②通过涌浪静校正消除同相轴抖动现象,改善微幅构造的成像质量;③压制气泡效应,提高浅层资料的信噪比;④压制随机噪声,提高资料的整体信噪比;⑤通过反褶积、静校正等处理方法,提高资料分辨率;⑥进行偏移处理,恢复倾斜地层的成像到真实的位置。

1.1 多次波压制

多次波有短周期波和长周期波两种。短周期多次波往往与一次反射波相干涉,难以被识别,而长周期多次波的传播路径通常比相同深度界面一次反射波的路径更长,在记录上常常独立出现,较易识别。不管短周期还是长周期多次波,其极性通常是负次、正次相间出现,可以利用这个特性识别多次波和计算多次波的周期长度。

单道地震资料中多次波压制方法主要有:预测反褶积、模式识别和波动方程预测减去法^[15-17]。



(1) 预测反褶积法利用多次波的周期性,通过相关函数从初始到达的有效反射预测出多次波,然后减去多次波,得到一次反射剖面。对于海洋勘探,多次反射常常在海面、海底之间进行,因此,多次波预测距离为海底时间。实际应用中,只有垂直入射即零炮检距记录才能较好地保持多次波的周期性,当地层倾斜或在深水区,波的传播路径比较复杂,多次波的周期性也变差,此方法的效果明显降低。海洋区域地质调查中,单道地震采用的炮检距一般在 5~7 m,水深一般在百米以上,这种情况下的水平层状或倾角不大的地层可以视为垂直入射。一般而言,预测反褶积比较适合压制水深较浅,平坦海底的短周期多次波(海底双程反射时间小于 500 ms)(图 1),而对于陡倾海底或深水区,预测反褶积的效果不甚理想。

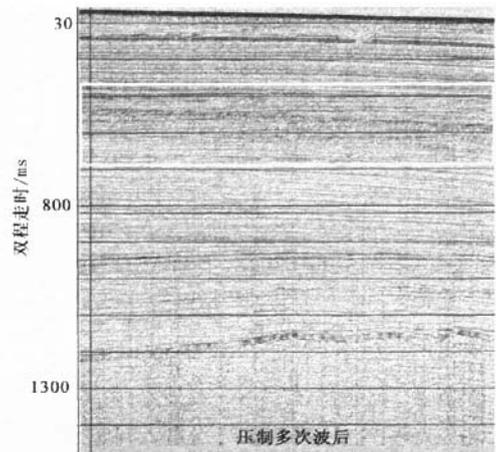


图 1 预测反褶积压制多次波效果对比

(2) 模式识别方法通过建立特定地层的多次波时空模型,在 F-X 域使用时空滤波方法来识别和压制多次波。该方法假设地层多次波与同个时段上的一次反射波倾角不一致,从而分离出多次波来进行压制。对于来自不整合面的多次波应用模式识别方法压制效果较好,其优点是衰减多次波,但不会影响多次波之前的浅层反射数据。缺点是目标层的厚度有限,目标层的下界反射时间必须小于多次波的最早时间,否则,目标层下界反射时间之上的浅层多次波无法得到压制。这种限制造成它只压制有限厚度层的多次波,之下的多次波仍然残留(图 2),故该方法不适合水深变化大的情况。

(3) 波动方程预测减去法根据实际介质和地层界面,借助模型或反演通过波场外推来模拟并减去

多次波。此方法不依赖于地下情况,所以无论是短周期浅层平海底多次波还是长周期陡倾海底的多次波都有效果。波动方程预测减去法的优点在于适应能力强,无论多次波周期长短,不管海底是否平坦,都可以有效地压制多次波。但其缺点为计算时间较长,一般为预测反褶积法的 6~8 倍,对于数据量大的地震剖面不建议使用。在 1300 ms 以下,超过了预测反褶积的最佳使用范围,使用波动方程预测减去法却能够很好地压制强能量的多次波,使得被覆盖的弱有效反射得以突出显示(图 3)。

总之,短周期多次波建议使用预测反褶积,长周期多次波建议使用波动方程预测减去法,多次波与一次反射同向轴有明显差异时,可以使用模式识别方法。对于预测反褶积、波动方程预测减去法,活动

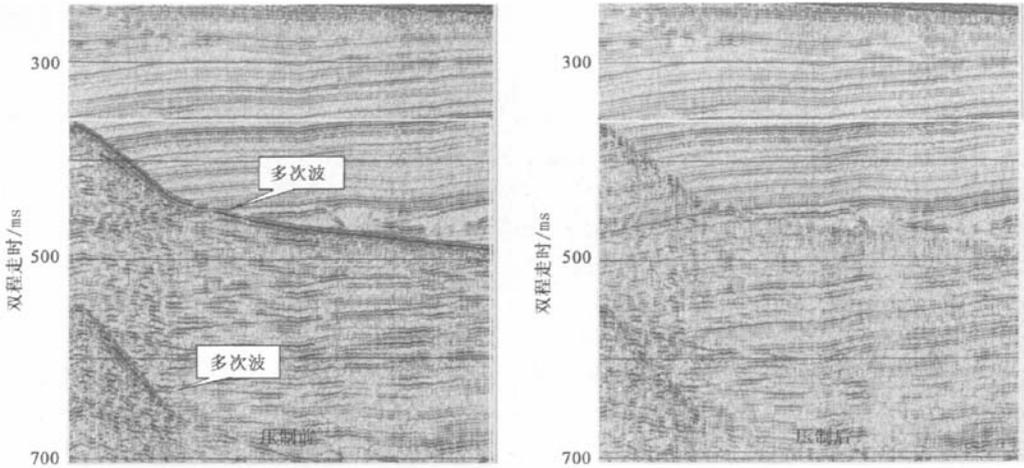


图2 模式识别方法压制多次波效果

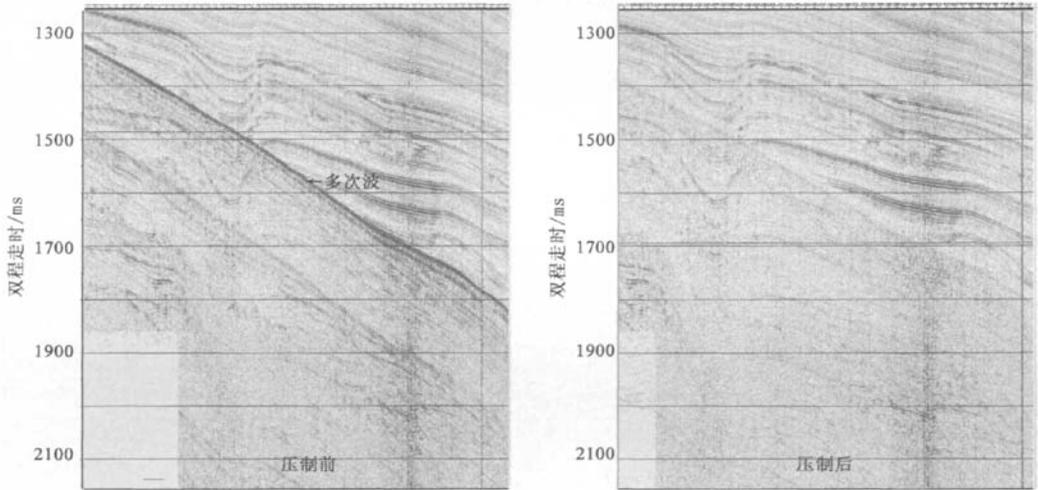


图3 波动方程预测减去方法压制多次波效果对比

算子长度的选取是关键。参数值太小压制效果差, 值太大则容易伤害有效波, 需通过试验来确定其长度。南海北部陆架到陆坡地形变化较大, 从陆架区的几十米变化到陆坡区的上千米^[4], 需根据每次采集数据的特征通过试验效果来确定选用哪种处理方法及相关参数。

1.2 涌浪静校正

海上作业过程中, 受涌浪影响, 地震反射同相轴不平滑, 出现上下抖动, 给地震道反射时间增加了一个时移。由于涌浪的动态性, 这个时移量在不同地震道上的值是不同的, 但在同一道的不同时段则基本相同, 因此采用涌浪静校正技术来消除这种同相轴抖动现象。基本步骤是先利用互相关技术计算时移量, 然后使用静校正技术消除同相轴抖动现象。具体涌浪静校正方法参考相关文献^[11]。

涌浪静校正技术计算时移量是否准确关键在于计算时窗的选择, 选取时窗数据要具有代表性, 并且时窗长度要足够长, 尤其要避开断层以及构造起伏较大的位置, 否则计算的时移量受局部构造影响而不准确, 静校正后出现虚假构造。在海底地形平坦或起伏不大地区, 计算时窗一般选择海底附近, 使用一个时窗即可。对于海底起伏较大地段, 建议采用分层静校正方法^[11,18], 即在海底平缓地段采用海底时窗, 在海底崎岖地段, 选择其下横向连续性较好的时段计算。试验发现涌浪校正量一般在 1 ms 左右, 故在计算时最大校正量采用 1.5 ms, 计算道数一般在 8~10 道。

涌浪静校正后从局部效果看, 校正前剖面上普遍存在同相轴锯齿样抖动, 而校正后基本消除了抖动现象, 同相轴变得平滑、清晰(图4)。

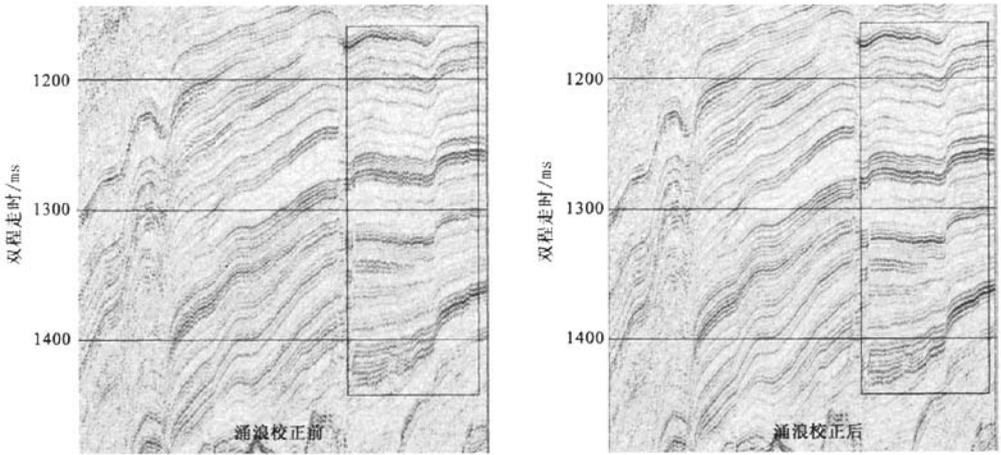


图4 涌浪校正效果对比

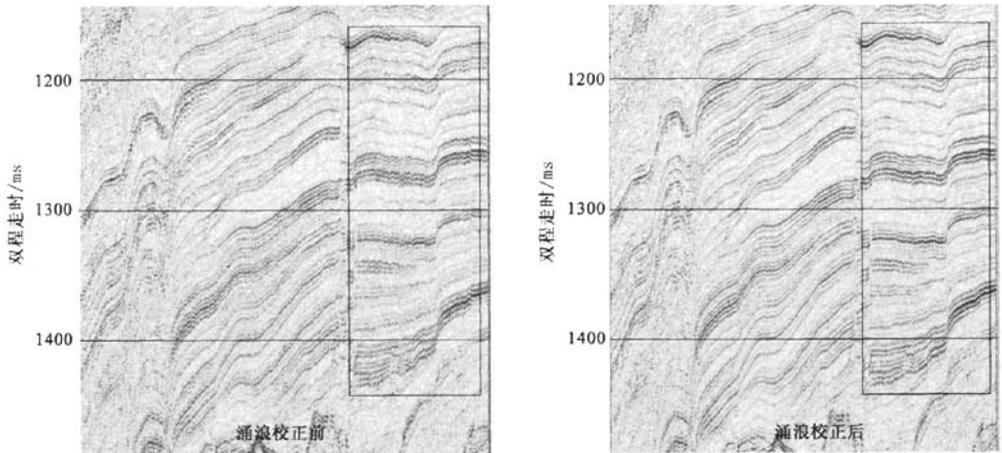


图5 气泡效应压制处理效果

1.3 气泡效应压制

气泡效应影响剖面浅层的分辨率。对于 GI 枪震源在地震记录上产生的周期性气泡效应,其表现为在海底反射之下 60 ~ 70 ms 的平行海底反射。利用此特征,采用预测反褶积来压制,预测距离为 60 ~ 70 ms。预测反褶积后平行海底的气泡效应能量明显被衰减,与有效反射斜交的同相轴消除,被压制的浅层有效反射得到突出显示,同相轴更加可靠,层位易于追踪,分辨率和信噪比都得到提高(图 5)。

1.4 随机噪声压制

海上随机噪声低频成分较强^[19],低频噪声一般在带通滤波时已经压制掉。对于分布在有效频带内的随机噪声常采用 F-X 域预测方法或信号加强方法来压制。由于南海北部测区风浪较大,资料采集时部分测线信噪比特别低,F-X 域预测方法效果甚微,故笔者采用了高精度相干加强方法进行处理,压

制后同相轴变得光滑,连续性得到加强,层位展布特征清晰,剖面整体信噪比明显提高(图 6)。

1.5 提高分辨率处理

影响分辨率的因素很多,在单道地震资料处理中,与提高分辨率直接有关的为静校正、噪声压制、反褶积、偏移。本节中仅讨论反褶积技术对提高分辨率的贡献。

在时域,提高分辨率就是压缩子波长度,在频域等价于展宽子波的振幅谱和零相位化,主要方法是反褶积。反褶积通过压缩基本地震子波来提高地震资料的时间分辨率,拓宽地震资料的频谱。

图 7 是使用预测反褶积处理的效果。可以明显看出反褶积后剖面上同相轴变细了,能量更加聚焦,成像更清晰,层间出现了很多细节,剖面的整体分辨率得到提高。

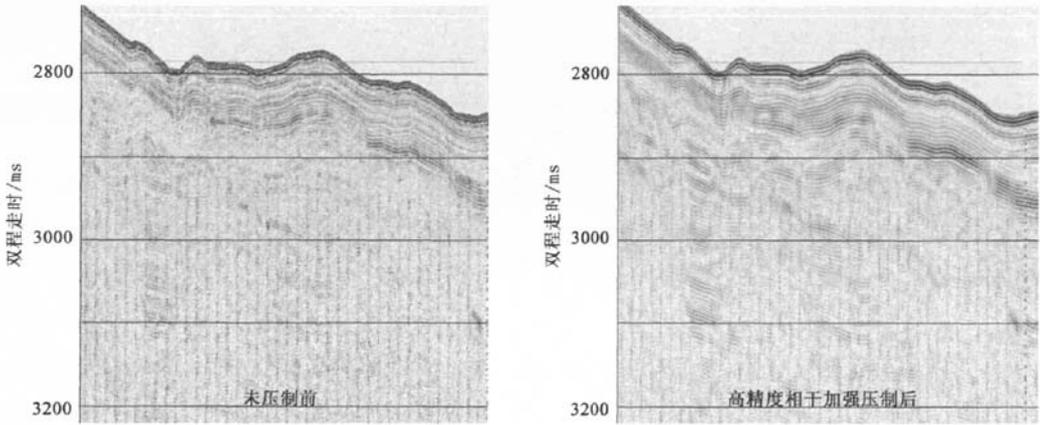


图6 随机干扰压制效果

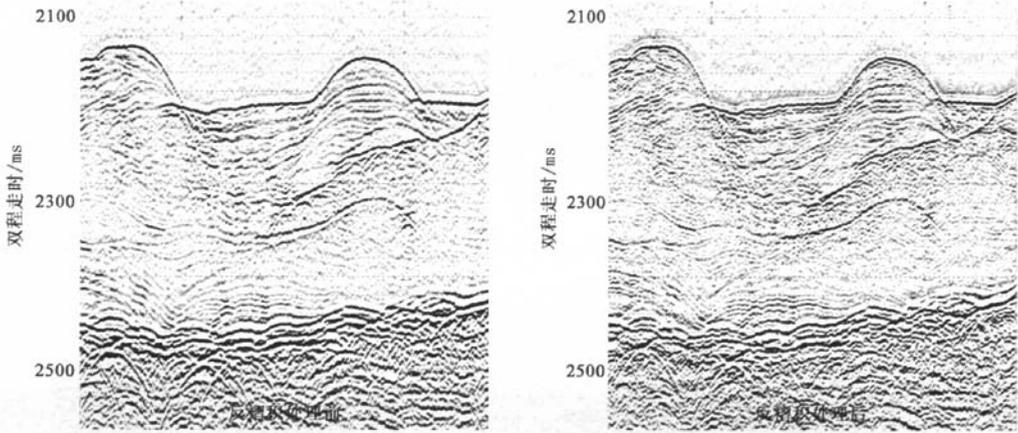


图7 反褶积处理效果对比

1.6 偏移

偏移的目的是归位,将倾斜反射归位到它们真正的地下界面位置,并使绕射波收敛,以显示诸如断层面之类的地下界面性质的细节。它对倾斜同相轴、断层等的准确成像至关重要。但是,由于单道数

据无法直接获得速度资料,可以利用同一工区的多道地震叠加速度来建立基础速度模型,并通过试验来确定一个合适的偏移速度。通过偏移处理,可以改善地震剖面的空间分辨率。

图8是单道地震资料的偏移效果,可以看出偏

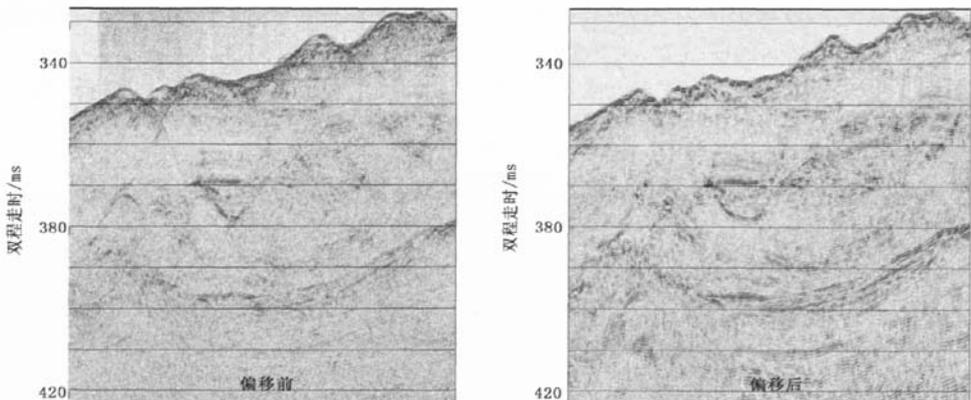


图8 偏移处理效果对比

移使绕射归位, 剖面上的蝴蝶结打开, 背斜收窄、向斜展宽, 断层、断点更清晰, 地层在剖面上的成像位置更准确, 同相轴的横向连续性得到加强, 提高了资料的横向分辨率和信噪比。

2 处理效果评述

根据以上处理方法, 获得了质量较好的地震剖面, 为进一步的地震解释提供了良好资料。

图 9 为调查中获所外陆架地震剖面, 通过处理后, 可见到平滑的同相轴明显被错断, 该高分辨率剖面显示了该地段 NE 向正断层较为发育, 视断距约 7 ~ 10 m, 断层由下至上切割至上新统, 表明该区域新生代断裂较为活跃, 为南海北部新构造运动的研究提供了重要证据。

南海北部陆架区分布有埋藏古河道, 处理后的剖面古河道的形态和充填特征清晰(图 10), 河道呈“U”型, 下切河谷特征明显, 下切深度约 20 ~ 25 m, 宽约 2 ~ 2.5 km, 内部具空白或杂乱反射, 局部可见侧向加积充填结构。古河道的发现为调查区的第四

纪海平面变化以及古气候演变提供了依据, 同时, 古河道内可能含有大量淡水资源^[20-22], 可作为寻找海底淡水资源潜在的找矿方向。

南海北部陆架区三角洲前积较为发育, 处理后的地震剖面清晰地显示出典型的三角洲前积相, 内部具前积反射结构, 斜交层理, 缺失顶积层和底积层, 与上下地层呈角度不整合接触, 反映了物源由 NE 向 SW 不断推进的一套低水位三角洲沉积体系(图 11)。

由于篇幅所限, 具体实例不再赘述。经过处理后剖面信噪比和分辨率明显提升了。多次波能量得到了极大的压制, 被多次波覆盖的反射同相轴得以显示出来。随机噪声得到显著压制, 原来断断续续甚至无法看见的同相轴浮现出来, 连续性得到加强, 波组特征清晰。因涌浪引起的反射同相轴错位抖动现象消失, 同相轴变得平滑, 一些细微构造得以准确展现, 处理后剖面更清晰、更精确地反映了地层接触关系和沉积特征, 各种地质现象更易于识别。

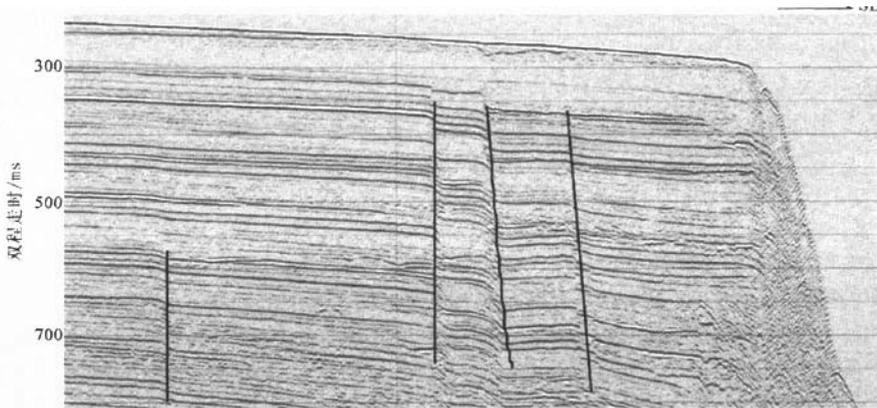


图 9 高分辨率地震剖面显示的新构造断裂

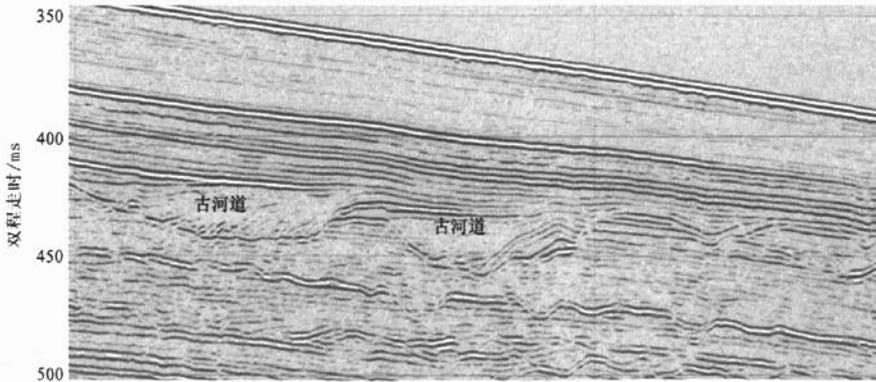


图 10 高分辨率地震剖面显示埋藏古河道

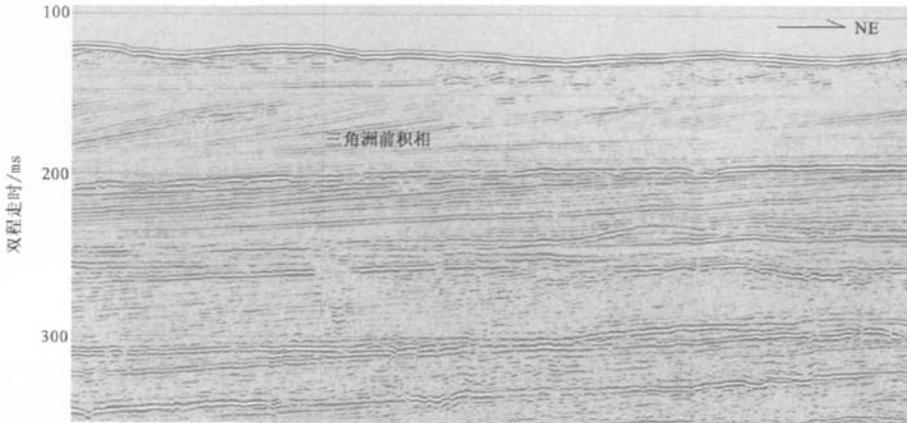


图 11 三角洲前积地震相反射特征

3 结论

海底数字单道地震测量在海洋区域地质调查中是必不可少的手段之一,可为海洋区域地质调查解释和研究工作提供良好的基础资料,但南海北部水深变化大,底质较粗,风浪较大,导致资料中存在多次波、同相轴抖动、随机噪声等干扰,资料的信噪比较低,严重影响了勘探目标。

为获得高信噪比,高分辨率的地震资料,必须针对调查区地质特点以及需解决的地质目的,根据噪声的不同特征,有针对性的采取相关技术进行处理,分别对浅层和深层多次波进行压制,进行涌浪静校正、气泡效应、随机噪声进行处理,构造复杂地区建议进行偏移处理。经过关键处理技术处理,地层的接触关系和各种地质现象易于识别和解释,为地学工作者提供了丰富的,精确的地质信息,为后续的研究工作打下良好的基础。

参考文献:

[1] 寿嘉华. 我国海洋地质工作发展战略[J]. 地质通报, 2002, 21(12): 803 - 806.
 [2] 曾宪军,伍忠良,郝小柱. 海洋地质调查方法与设备综述[J]. 气象水文海洋仪器, 2009, 1: 111 - 120.
 [3] 李丽青,梁蓓雯,徐华宁. 海上单道地震资料中多次波的衰减[J]. 石油物探, 2007, 46(5): 457 - 463.
 [4] 冯文科,鲍才旺,陈俊仁,等. 南海北部海底地貌初步研究[J]. 海洋学报, 1982, 4(4): 462 - 472.
 [5] 谢以宣. 南海东北部海底地貌[J]. 热带海洋, 1985, 2(3): 182 - 190.
 [6] 杨庆轩,梁鑫峰,田经纬,康建军. 南海北部海流观测结果及其谱分析[J]. 海洋与湖沼, 2008, 39(6): 561 - 566.

[7] 袁耀初,赵进平,王惠群. 南海东北部 450m 以浅水层与深层海流观测结果及其谱分析[J]. 中国科学: D 辑, 32: 163 - 176.
 [8] 孟庆生,楚贤峰,郭秀军. 高分辨率数据处理技术在近海工程地震勘探中的应用[J]. 2007, 22(3): 1006 - 1010.
 [9] 陈凤,李金宗,黄健明,李冬冬. 利用数字图像处理技术提高地震剖面图像信噪比[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(4): 758 - 764.
 [10] 张金强,牟永光. 多次波压制的自适应方法[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 45(4): 367 - 372.
 [11] 李丽青,徐华宁,舒虎. 涌浪静校正正在海洋单道地震资料处理中的应用[J]. 物探与化探, 2007, 31(4): 339 - 343.
 [12] 徐颖,郑朝平. 地震资料处理技术新进展 - 静校正和叠加成像[J]. 勘探地球物理学进展, 2003, 26(5 - 6): 439 - 446.
 [13] 徐文君,於文辉,卜爱飞. 地震资料多次波处理[J]. 工程地球物理学报, 2005, 2(16): 417 - 424.
 [14] 刘建勋. 提高海上单道反射地震记录信噪比和分辨率的方法[J]. 物探化探计算技术, 2007, 29: 116 - 120.
 [15] 黄新武,孙春岩,牛滨华,等. 基于数据一致性预测与压制自由表面多次波——论研究与试处理[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 173 - 180.
 [16] 张霖斌,何樵登,方云峰. 频率波数域预测和减法压制多次波[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2002, 32(1): 96 - 99.
 [17] Verschuur D J, Berkhout A J. Overview of surface and internal multiple removal strategies [G] // Off shore Technology Conference, 2000.
 [18] 高少武,周兴元,蔡加铭. 反射波地表一致性相位校正[J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(4): 482.
 [19] 张宝金,成谷,冯震宇,等. 从剖面的视觉效果谈海上地震资料处理[J]. 南海地质研究, 2000: 38 - 46.
 [20] 何良军,张藻,楼颂平,等. 物探找长江水下三角洲勘探淡水资源的重要意义[J]. 上海地质, 2006(1): 1 - 4.
 [21] 刘海龄,吴世敏,魏常兴,等. 论河口海底淡水资源的形成[J]. 自然资源学报, 1998, 13(4): 364 - 367.
 [22] 丁良才. 开发海底淡水资源,解决海岛淡水供需矛盾[J]. 海洋开发与管理, 1997, 14(3): 47 - 49.

参考文献:

[1] 赵改善. 油藏动态监测技术的发展现状与展望. 时延地震[J]. 石油物探, 2005, 28(3): 157 - 167.

[2] 陈小宏. 四维地震数据的归一化方法及实例处理[J]. 石油学报, 1999, 20(6): 22 - 26.

[3] 金龙, 陈小宏. 时移地震非一致性影响研究与互均衡效果验证[J]. 勘探地球物理进展, 2003, 26(1): 45 - 48.

[4] 庄东海, 肖春燕, 许云, 等. 四维地震资料处理及其关键[J]. 地球物理学进展, 1999, 14(2): 33 - 42.

[5] 伊尔马滋·湿. 地震资料分析——地震资料处理、反演和解释[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.

MUTUAL CONSTRAINT PROCESSING TECHNOLOGY FOR INCONSISTENCY TIME-LAPSE SEISMIC DATA

LI Qiang¹, SHANG Xin-min^{1,2}, ZHAO Sheng-tian¹, WANG Sheng-ge¹
 (Geophysical Research Institute of Shengli Oil-field Branch Co., Dongying 257022, China)

Abstract: Time, frequency, amplitude and phase differences constitute the main factors affecting the time-lapse seismic processing, and elimination of the differences in these four aspects is the key to the unrepeatable seismic data processing. The authors analyzed the differences of the construction parameters in two 3D data sets of Yongxin, used the binary corresponding evacuating method to eliminate the differences of field acquisition geometry, eliminated the energy signal-to-noise ratio differences between two data sets by targeted denoising technology and energy compensation methods, and used the frequency and phase correction technique to eliminate frequency and phase differences. Based on the four aspects of the mutual constraint processing, the study achieved good results and attained the seismic data processing requirements, thus laying a foundation for subsequent seismic attribute analysis.

Key words: Inconsistency; time-lapse processing; mutual constraint geometry; frequency correction

作者简介: 李强(1980 -),男,工程师,2003年毕业于吉林大学勘查与技术工程专业,现在胜利油田物探研究院西部处理室从事地震资料处理工作,公开发表学术论文数篇。

上接 92 页

THE MAIN PROCESSING METHODS OF HIGH-RESOLUTION SINGLE - CHANNEL SEISMIC DATA IN MARINE REGIONAL GEOLOGICAL SURVEY

Li Li-qing, Chen Hong-jun, Peng Xue-chao, Wen Ming-ming, Li Wen-cheng
 (Guangzhou Marine Geological Survey, MLR, Guangzhou 510760, China)

Abstract: High-resolution single-channel seismic is one of important methods in marine regional geological survey. It is deployed to discover the shallow stratigraphy structure, fault, magma active and all kinds of potential geo-hazards. However, the seismic data is contaminated by different noise. Data processing methods of improving S/N and resolution are discussed in this paper. The processed seismic sections are much better than the original section, which provide high quality data for marine regional geological research.

Key words: marine regional geological survey, high-resolution, single-channel seismic, main processing methods

作者简介: 李丽青(1971 -),女,1997年毕业于中国地质大学,获地球物理硕士学位,现在广州海洋地质调查局从事地震资料处理与研究工作,公开发表学术论文数篇。