

doi:10.11720/wtyht.2015.2.19

刘建勋,徐明才,王小江,等.高原冻土区三分量地震探测方法试验[J].物探与化探,2015,39(2):327-333.http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.2.19

Liu J X, Xu M C, Wang X J, et al. A study of three-component seismic exploration in plateau permafrost region[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(2): 327-333. http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.2.19

高原冻土区三分量地震探测方法试验

刘建勋,徐明才,王小江,张保卫

(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)

摘 要:三分量地震勘探是一种综合利用纵波和转换波进行精细构造探测的有效方法技术,转换波成像剖面具有较高的分辨率,可以识别小断层、小构造等地质现象。笔者结合在西藏羌塘盆地开展的三分量地震探测方法技术试验,初步对三分量地震勘探的数据采集方法、资料处理及对比解释技术进行了探讨和研究,验证了该方法在永久冻土区的有效性,取得了较好的试验效果。对今后在青藏高原开展多波多分量地震勘探方法技术的应用与研究有一定的借鉴作用。

关键词:高原冻土区;三分量地震勘探;转换波;数据采集;处理解释

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2015)02-0327-07

随着转换波勘探技术的发展,多波多分量地震勘探方法技术的应用越来越广泛。但是多波多分量地震勘探现在还是一项很不成熟的技术,目前各国都在进行研究攻关。三分量地震勘探方法作为纵波地震勘探的补充和延伸,已经逐步从理论研究走向了应用研究阶段。

三分量地震勘探的关键在于野外数据采集和转换波资料的特殊处理。由于青藏高原地质条件复杂,湖泊、沼泽、融化淤泥层、冻土层广泛分布,不利于地震波的激发和接收,要获得连续、有效的转换波信息是非常困难的。另外,转换波资料的特殊处理技术还不成熟,专用商业软件较少,三分量地震数据处理基本上还是采用纵波资料的处理技术。

近年来,随着陆域天然气水合物资源勘查项目的开展,在青藏高原永久冻土区进行了多次浅层二维纵波反射地震勘探技术的应用试验研究工作,该方法被认为是获得地下精细结构最为可靠、最为准确的探测方法。借此机会,首次在羌塘盆地开展了三分量地震探测方法技术试验,目的在于查明有利于天然气水合物赋存的浅部精细地质构造,验证方法的有效性。

1 三分量地震数据采集

在三分量地震勘探数据采集过程中,要兼顾好纵波和转换波,需要设计合理的观测系统。转换波反射系数在法向入射时为零,然后随着入射角的增大而增大,大多数界面类型的反射系数存在相对较大的入射角范围,因此,转换波的接收段应选择在此范围内。三分量地震勘探应同时获得质量较高的纵波剖面 and 转换波剖面,在设计最小偏移距时应考虑纵波反射系数,纵波反射系数在小入射角时较大,故应在尽量避开干扰波的前提下选定尽可能小的偏移距。根据已有的纵波地震资料,分析试验区目标层系中的反射界面,通过长排列波场调查和偏移距试验,确定出较理想的数据采集观测系统。

三分量地震数据采集选用了 28 Hz 的检波器,内部结构为正交三分量检波器组。其中,垂直放置的传感器为常规的纵波检波器,水平放置的动圈式传感器构成横波检波器的部件,分别记录沿测线方向的径向分量(SV 分量)和垂直测线方向的横向分量(SH 分量)。一般采用钢钎在冻土层地表钻孔安置检波器;最好的方法是选择在中午温度较高,地

表融化后,采取挖坑埋置牢固,能增强检波器与冻土层的耦合性,减少外界强风干扰,有利于改善数据质量。

纵波激发选用了美国 INOVA 公司生产的 AHV-IV 型车载机械可控震源,单台震源峰值出力高达 60 000 磅(28 t),由于探测深度范围相对较浅,采用大吨位可控震源能够满足激发能量要求。通过野外试验,选取了合适的激发因素:扫描频率范围在 10~120 Hz,扫描时间长度为 12 s,垂直叠加次数为 2~4 次,输出力参数设置为 80%。此外,为了压制随机噪声干扰,除了利用可控震源的扫描叠加技术外,还设置了噪声门限编辑强振幅噪声,利用垂直叠加技术进一步压制噪声,提高了地震记录的信噪比。

三分量地震数据采集观测系统为多道数、小道间距、长排列的接收方式(5-30-1525),以确保有足够的空间采样率,使有效转换波的同相轴更加连续,易于追踪,由于在中间激发时两边排列接收到的横波分量存在极性差异,所以选取了单边激发的多次覆盖观测系统,采用较高的覆盖次数,更有利于压制干扰噪声,获得高信噪比的地震资料。三分量检波器道间距为 5 m,炮间距为 15 m,最小炮检距为 30 m,接收道数为 300 道,每道布置 3 个采集单元,分别接收 z 分量、SH 分量和 SV 分量,共使用 900 个采集单元进行接收,覆盖次数达到 50 次。基于多次覆盖的水平叠加技术是压制干扰噪声最好的方法,但是覆盖次数越高需要的经费和时间越多。

地震仪器采用了法国的 Sercel-428XL 数字地震

采集系统,开通的最大监测采集单元为 1 215 道,三分量检波器为 405 道,完全能够满足采用小道间距、多道数、长排列的接收方式。仪器采样率为 0.5 ms,最大记录长度 3 000 ms,每个记录道采集 6 001 个数据样点,仪器在数据采集过程中全频带接收,没有加载滤波和陷波。

2 三分量地震资料处理解释

2.1 静校正

转换波静校正是三分量地震数据处理中的关键问题之一,直接影响到最终成像的质量,较好的方法是采用折射静校正和高程校正相结合的处理技术,对转换波地震数据的炮点和接收点分别按 P 波、S 波速度进行了高程静校正试验。

通过查看原始单炮数据,采用折射波静校正方法。首先采用逐炮手动拾取初至,计算出静校正量后,再把静校正量应用到单炮上,再次拾取初至、计算静校正量,经过多次循环后拾取的初至差值更小,这样拾取的初至精度会更高,多次循环后,静校正的问题得到良好的解决。根据地表的高程,按照选取最高点的高程为静校正的最终基准面的原则选取最终基准面,把折射波静校正计算过程中对速度模型建立时选取的优势速度作为替代速度。图 1 为折射波静校正的效果对比,可见折射波静校正后的单炮同向轴更光滑、连续性更好,初至也得到了良好的校正。

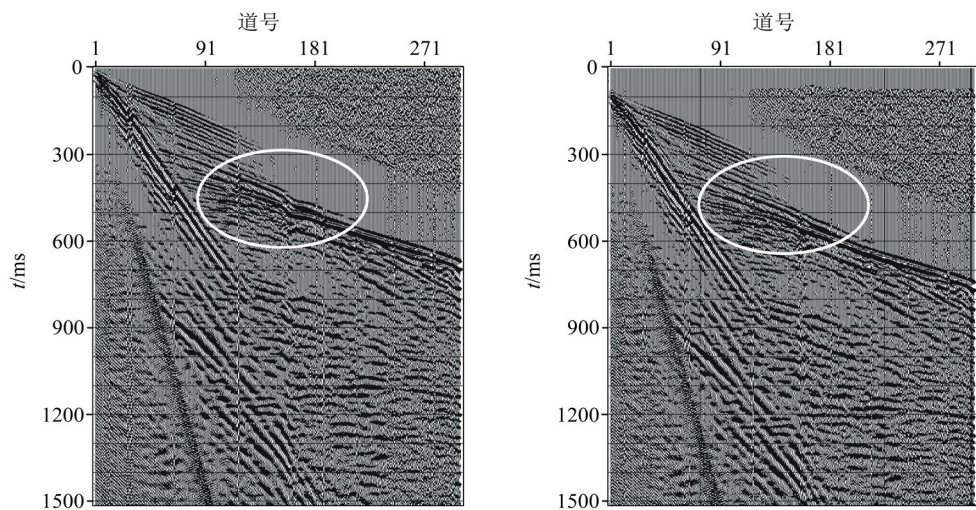


图 1 地震数据静校正前(左)后(右)处理效果

转换波静校正分为炮点静校正和检波点静校正两个处理过程。转换波的炮点静校正量采用 P-P 纵波炮点静校正量的计算方法;转换波的检波点静校正量计算比较繁琐,一般采用 P-P 纵波检波点静

校正量乘以一定的倍数 N ,其中 N 为大于 1 的数值,具体数值需要多次处理试验对比测试。测试方法主要是看单炮记录上转换波同相轴的校正情况,还要结合单炮上的面波是否成线性且光滑的现象,确定

几组 N 后,分别进行剖面叠加,对比剖面效果来确定最终的 N 值。

2.2 分离去噪

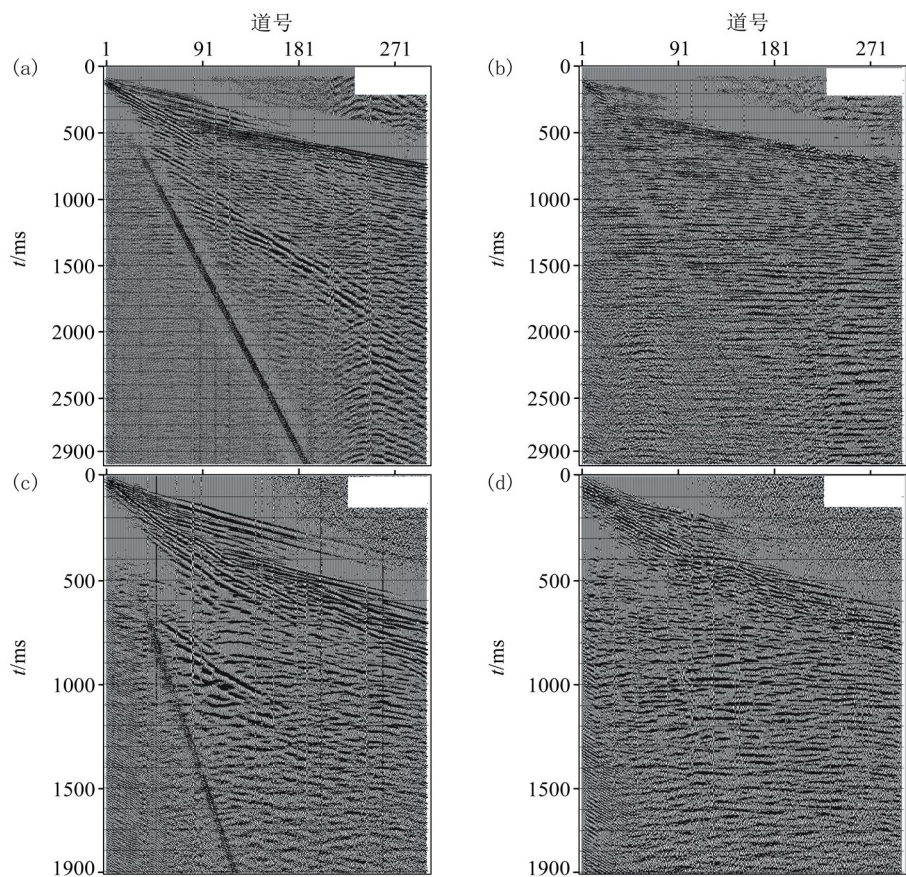
羌塘盆地三分量地震探测数据包括 z 、SH 转换波和 SV 转换波分量。分析三分量地震数据的原始记录,其波场类型比较丰富,包含有效的反射纵波和转换波,干扰噪声主要为声波、面波、直达波和随机噪声等。此外,在 SH 和 SV 转换波地震原始记录的波场中存在较强的纵波分量,在 P-P 纵波记录的波场中也包含了部分转换波的信息,因此需要对三分量地震数据进行去噪、分离等处理,提取出有效的反射纵波和转换波信息。

三分量地震资料处理主要是采用了帕拉代姆公司的 Focus5.4 地震资料处理系统。噪声衰减普遍基于预测原理,即在 $F-X$ 域中,地震数据将分为沿 x 方向可预测和不可预测部分,相干同相轴(包括信号和规则噪声)是可预测的,而随机噪声是不可预测的。通过对三分量地震原始数据的波场记录进行分析,干扰因素主要包括:随机噪声干扰、影响多道的单频噪声干扰、低频低速的面波干扰、线性的相干噪声干扰等。针对这些具有强振幅的干扰噪声,可采用相应的技术进行去噪处理。随机噪声是非相干

的、频带较丰富,常规的频率滤波、视速度滤波难以对其衰减,采用高能压噪处理技术、 $t-f$ 域时变滤波、带限噪声压制技术等联合去噪方法,能够较好地衰减随机噪声干扰,提高地震记录的信噪比。

采用高能压噪处理技术,是在炮集记录上以道数和时间段为边界设置窗口,对窗口内所有的波形进行能量均衡,衰减局部强振幅的能量团,去除随机噪声的干扰。可以通过调节道数的多少和时间段的长短来改变窗口的设置,也可以在不同的记录时间分段进行处理。带限噪声压制技术是通过频率分段对不同频率范围内的噪声进行衰减,随机噪声频带是有限的,一般与有效信号的频带重叠,如果简单地过滤噪声频带可能导致有效信号带宽损失。因此,可以定义较窄的频带滤波范围,通过横向预测分解为信号分量和噪声分量,达到衰减随机噪声的目的。

叠前去噪的重点是相干噪声的压制,进行波场分离。采用了压制相干噪声效果较好的方法,包括低频阵列滤波技术、倾角滤波压噪处理技术、局域倾斜叠加等方法,几种去噪、分离技术配合使用,能够有效地衰减面波、直达波、震源干扰波等相干噪声(图 2)。



a—P-P 去噪前记录;b—P-P 去噪后记录;c—P-SH 去噪前记录;d—P-SH 去噪后记录

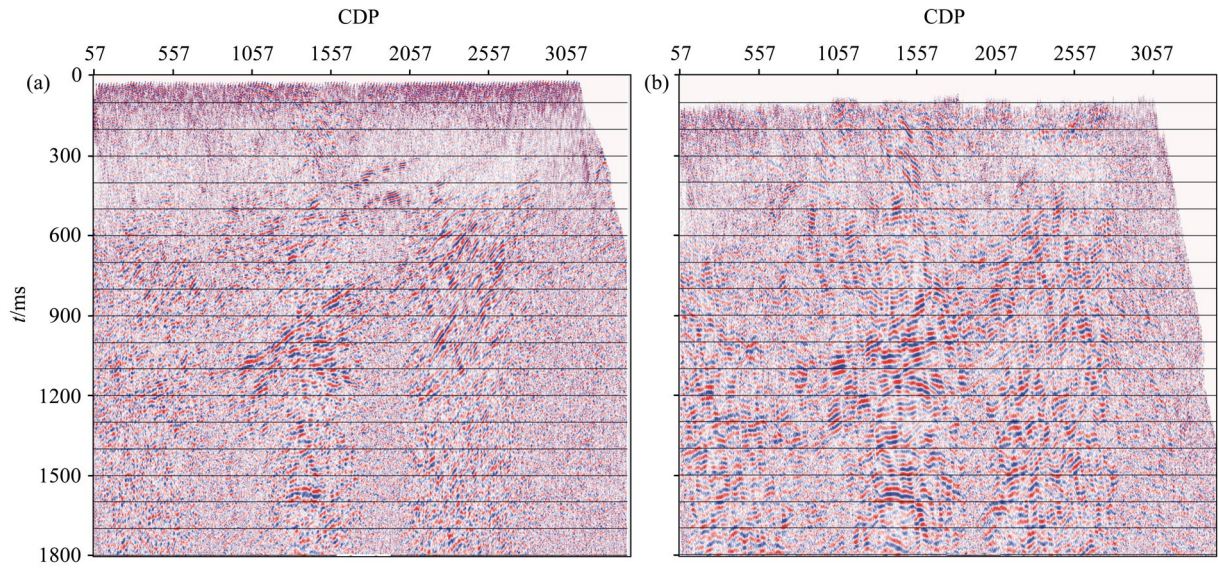
图 2 地震单炮记录去噪处理效果

低频阵列滤波技术是消弱炮集记录地滚波干扰的有效手段,是通过低速、低频带进行滤波的去噪技术。首先分析出面波干扰的低速度和低频带范围,把炮集记录从时间—空间域转换到频率—空间域,去除低速、低频的噪声干扰,保留的部分再反变换回时间—空间域即为去噪后记录。低频阵列滤波方法从低频和低速两个方面对干扰因素进行界定和衰减,能很好地保留下高频、高速的有效信息,可适用于消除与信号频带相重叠的低速规则干扰波,去噪效果较好。

倾角滤波压噪技术也称为视速度滤波,是有效的二维滤波处理技术,可用于多种抽道集记录,对线性干扰进行压制。这种方法首先对噪声的频率和视速度进行分析,根据其频率和视速度特征在干扰波的优势频段内分组建立噪声模型,然后从原始资料中将噪声减去,这样消除的噪声都集中在干扰波覆盖的区域,其他部分不受影响。倾角滤波不仅可以

压制视速度较低的线性干扰,也适用于消除视速度较高的折射波等线性噪声,对正、负低视速度的干扰都有较好的滤波效果,但同时采用正、负高速滤波会产生严重的混波作用,处理流程中应尽量避免使用。

去噪处理后三分量地震单炮记录质量明显改善,数据的信噪比较高。纵波分量经过去噪处理后,强振幅的声波、随机噪声被压制,面波、直达波、低速波等线性干扰得到有效衰减,在 200~1 000 ms 之间,多层反射波同相轴振幅增强、连续性较好,经过速度扫描、叠加处理,得到 z 分量的叠加剖面。图 3a 是 SH 分量在去噪处理之前按照纵波速度叠加的效果,剖面中强振幅倾斜同相轴与 z 分量剖面对应,说明存在 P-P 波分量泄露,SH 分量经过去噪处理后,再按照纵波速度进行叠加得到图 3b 所示剖面,处理效果很明显,对波场记录中的纵波分量进行了有效分离。



a—去噪处理前叠加剖面;b—去噪后叠加剖面

图 3 P-SH 分量叠加处理试验去 P-P 泄露效果对比

2.3 道集的选择和叠加

三分量地震数据经过叠前去噪处理后,P-P 纵波分量可以按照常规反射地震数据处理流程,依次进行 CMP 道集抽取、速度扫描、叠加、叠后去噪等处理。但对于 SH、SV 分量转换波数据,由于转换波的上、下行波的不对称,使得即使在水平均匀层状介质中,转换波的转换点的水平位置也不在炮检中点,其转换点偏离中心点的水平距离随着炮检距、反射层的深度以及横、纵波速度比的变化而变化。按照常规的抽道集方法无法实现转换波共反射点的叠加,要把 CMP 叠加技术应用到共转换点道集(CCP 道集)并实现真正的 CCP 叠加,必须先解决 CCP 道集

的抽取问题,这也是转换波处理与常规纵波处理的一个最主要的差别。

由于共转换点道集的检波点分布是不均匀的,因此抽取 CCP 道集时采取拟合的方法,拟采用下列公式计算共转换点的位置

$$x_{ccp} = x_{sht} + (x_{rec} - x_{sht}) \left[\frac{1.0}{\left(1.0 + \frac{1.0}{\gamma}\right)} \right]$$
$$y_{ccp} = y_{sht} + (y_{rec} - y_{sht}) \left[\frac{1.0}{\left(1.0 + \frac{1.0}{\gamma}\right)} \right]$$

其中: γ 为速度比 v_p / v_s , x_{rec} 和 y_{rec} 为接收点的位置

坐标, x_{sh} 和 y_{sh} 为激发点的位置坐标。从转换波的共转换点计算公式来看纵横波速度比 γ 在很大程度上决定了 CCP 的位置, γ 定义的不同, 计算出的值不同, CCP 的位置也就会不同, 叠加以后的效果相应的会有差异。在抽取 CCP 道集之前, 首先要对纵横波速度比值进行估算, 可以通过野外小折射、横波调查、测井、视速度等估算纵波、横波速度, 经过纵波资料 CDP 道集的速度分析, 一般获取的纵横波速度比较准确, 采用估算的纵横波速度比计算出共转换点 CCP 的位置。按上述方法对转换波炮集记录进行选择, 可得到 P-SH 和 P-SV 转换波的 CCP 道集记录。抽取的共转换点道集的形态不同于纵波的 CDP 道集, 存在较明显的差别, 共转换点的覆盖次数是不均匀的、存在变化, 转换点之间的道间距也不相同。

转换波 CCP 道集的速度分析是在纵波 CDP 道集速度扫描的基础上进行的, 先对 P-P 纵波分量数据进行扫描叠加, 得到二维的纵波叠加速度库, 在此基础上, 再对 CCP 道集进行 v_s 扫描。即输入纵波速度库, 采用人机交互方式迭代拾取不同的 v_p/v_s 比值, 对转换波 CCP 记录从浅到深进行转换波动校正。当同相轴被校正时, 该比值即为所求, 进而得到转换波叠加速度。

利用所求的 v_s 再重新抽 CCP 道集, 再进行

CCP 叠加速度分析, 反复迭代以求得较高精度的转换波叠加速度。一般来说需要两至三次的修正就可以找到正确的纵横波速度比值。利用拾取到的速度对 CCP 道集进行动校正、叠加处理, 可分别得到 SH 分量和 SV 分量的转换波时间域叠加剖面。

2.4 偏移处理

在地层结构复杂的情况下, 地震数据叠加得到的时间剖面并不能真正地反映地下地质的构造形态, 需要进行偏移归位处理, 该方法是提高地震记录横向分辨率的有效手段。偏移处理不仅能使倾斜反射归位到真正的地下位置, 而且有助于干涉带自动分解, 使绕射波自动收敛, 从而提高地震记录的信噪比和分辨率, 得到地下界面清晰的地震图像。

采用克希霍夫叠后偏移方法对三分量地震数据进行偏移处理试验, 得到了时间域叠后偏移剖面。z 分量叠加剖面 and 叠后偏移剖面对比如图 4 所示, 绕射波经过偏移处理后得到很好的收敛, 倾斜同相轴向上倾方向移动、倾角变陡, 将反射波和绕射波从其视位置归位到产生它们的反射界面和绕射点上, 部分干扰得到分解或收敛, 改善了反射波同相轴的连续性, 振幅能量有所增强, 断点和褶皱比较清晰, 提高了空间分辨率, 偏移剖面真实的反映了地下构造形态。

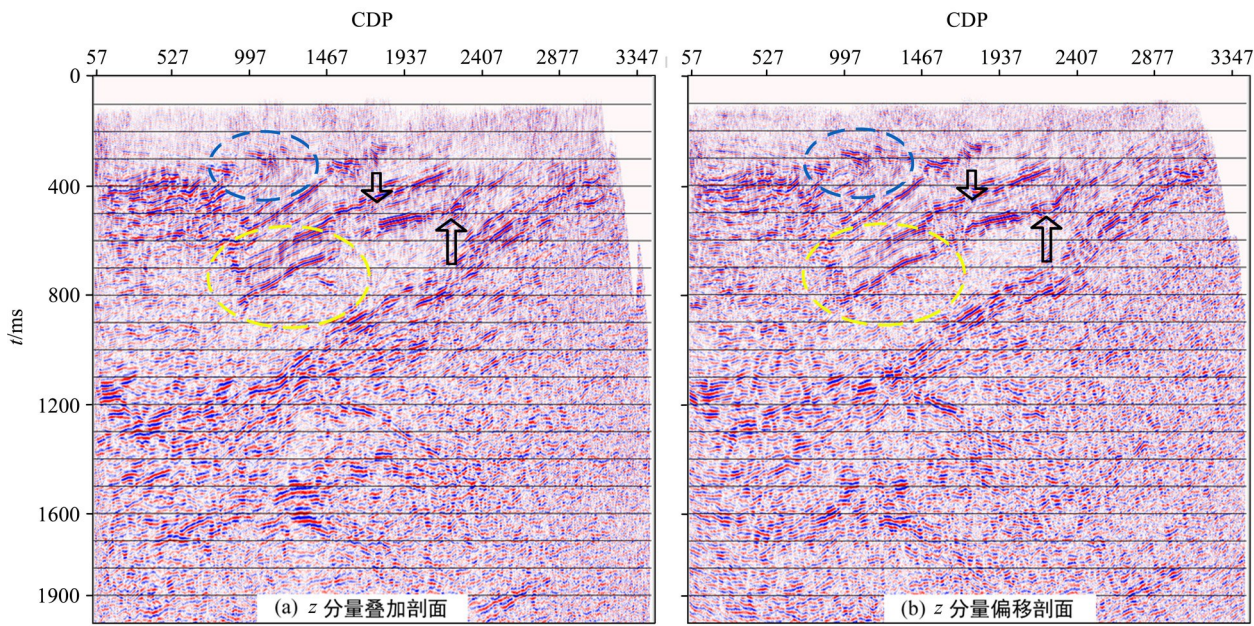


图 4 P-P 分量叠加剖面与偏移剖面对比

2.5 剖面对比解释

对于同深度的目标地层, 既可能是 P 波的反射界面, 又可能是产生横波的转换界面, 由于 v_p 和 v_s

的速度不同, 反映在时间叠加剖面上, 表现为纵波和转换波的双程旅行时不对应。较好的处理方法是采用深度偏移处理技术, 分别把纵波、转换波时间域叠

加剖面转换到深度域内,使不同类型的 z 分量、SH 和 SV 分量有效信息处理后具有相同的成像结果,以便于剖面层位的对比解释。由于对转换波资料的深度偏移处理技术还不成熟,此次仅在时间域内对三分量地震数据叠加时间剖面进行了对比研究。

目前纵波和转换波时间匹配主要还是采用人工拾取特征反射层位,对振幅进行标定,然后进行自动

压缩拉伸处理。

截取 z 分量叠后偏移剖面 0~2 000 ms,与 SH、SV 分量偏移剖面的 0~3 000 ms 按纵横波速度比压缩成对应于 z 分量的时间剖面,成像结果如图 5 所示。从三分量偏移成像剖面对比来看,SH 和 SV 剖面有差异,两个剖面上的构造形态与 z 分量剖面能够对应。

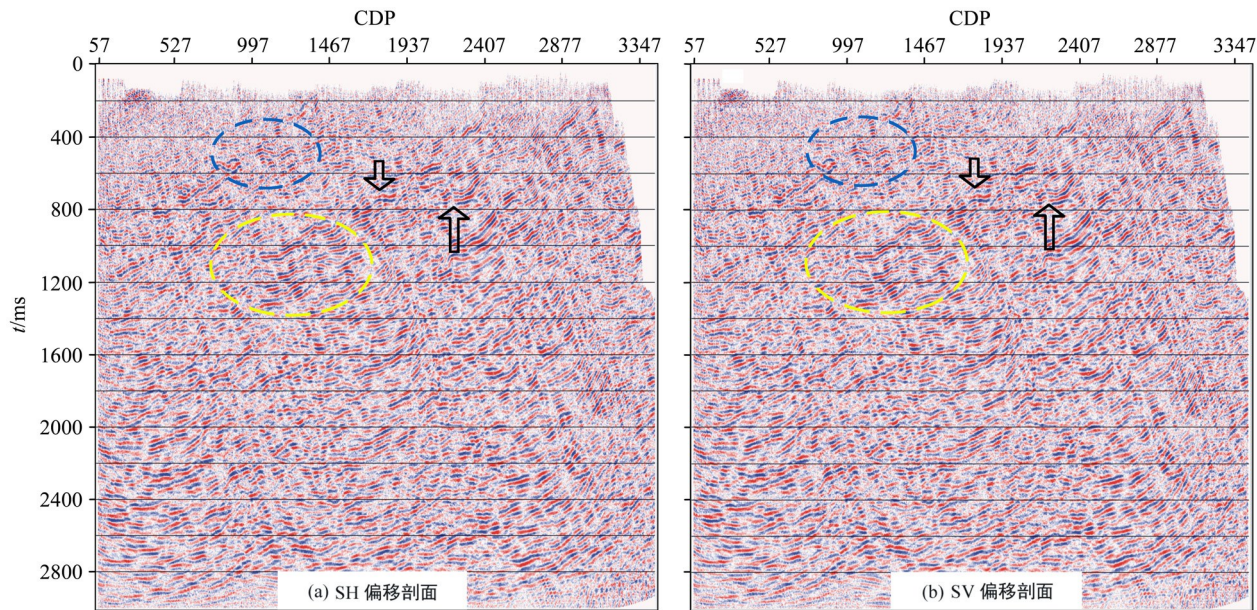


图 5 P-SH 分量和 P-SV 分量偏移剖面对比

(1) z 分量偏移剖面上 300 ms 的强振幅反射同相轴对应 SH、SV 剖面上 500 ms 处的目的层,两者形态相似。

(2) z 分量剖面上 600 ms 处的倾斜反射同相轴对应 SH、SV 剖面上 1 000 ms 位置的倾斜反射同相轴。

(3) 剖面上箭头所指位置, z 分量偏移剖面显示的断点和褶皱清晰,SH 和 SV 偏移剖面显示的断点、褶皱与 z 剖面对应性较好。

(4) SH 和 SV 分量偏移剖面浅部信息丰富、信噪比较高,但在 1 200 ms 后的深层,叠加、偏移成像效果差,倾斜的构造特征不太明显。

3 结论

首次在西藏羌塘盆地高原冻土区开展三分量地震探测技术应用试验研究,取得了较好的勘探成果。

(1) 野外数据采集获取了较连续、较完整的有效三分量地震信息。

(2) 三分量地震资料的波场特征复杂,分离去噪处理技术取得了较好的效果,获得了 SH 和 SV 分量数据体;采用迭代的方法进行速度扫描,完成了 CCP 道集选排和叠加,SH 和 SV 分量转换波成像效

果较好。

(3) 利用纵横波速度比值的关系,试验了三分量地震资料的对比解释,剖面反映的地质构造形态特征对应性较好。

三分量地震勘探信息丰富,具有较高的分辨力,SH 分量、SV 分量与 z 分量资料综合解释可降低多解性、提高探测的准确度,但在这一新领域还缺乏数据采集、特殊处理及对比解释的经验。尤其是野外数据采集阶段,转换波的采集和识别比较困难,需要通过大量的试验,检测地震观测系统接收 SH 分量、SV 分量有效信息的效果;另外,转换波的特殊处理技术还不完善,尤其是共转换点的选排、深度偏移等处理技术有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 王赞,滕殿波,邢春颖.多分量地震技术实用化的一些关键问题[J].勘探地球物理进展,2005,28(3):174-177.
- [2] 张永刚,王赞,王妙月.目前多分量地震勘探中的几个关键问题[J].地球物理学报,2004,47(1):151-155.
- [3] 胡天跃,张广娟,赵伟,等.多分量地震波波场分解研究[J].地球物理学报,2004,47(3):504-508.
- [4] 刘建勋,张保卫. P-SV 转换波的分离提取技术[J].物探与化探,2011,35(1):123-126.

[5] 董敏煜.多波多分量地震勘探[M].北京:石油工业出版社,2002.

[6] Wei X C,Chen T S, Ji Y X. Converted wave AVO inversion for average velocity ratio and reflection coefficient of shear wave[J]. Applied Geophysics, 2008, 5(1): 35-43.

[7] Shi J X. Four-parameter velocity analysis and its applications to the Ken-71 area converted-wave data[J]. Applied Geophysics, 2008, 5(1): 50-56.

[8] 李战业,尹军杰,王赟.地震散射波模拟成像在金属矿勘探中的应用[J].地质与勘探,2009,45(2): 80-84.

[9] 张明,韩大匡,姚逢昌,等.转换波成像方法综述[J].石油物探,2006,45(5): 553-556.

[10] 李慧杰,时志安,张海鹰,等.多分量转换波地震勘探初探[J].吉林地质,2004,23(3): 42-46.

[11] 王磊,何兵寿.煤层转换波的数值模拟及应用[J].石油物探,2004,43(5): 475-478.

[12] 刘建勋,王小江.金属矿转换波地震勘查技术模拟[J].物探与化探,2012,36(4): 607-611.

[13] 方斌,徐波,周立军.纵横波联合勘探方法初探[J].工程地球物理学报,2007,4(5): 411-416.

[14] 钟凌云.小波变换方法在地震资料噪声消除中的应用[J].物探与化探,2007,31(3): 245-249.

[15] 李国发,彭苏萍,何兵寿,等.转换波地震资料处理的关键问题与解决方法[J].中国矿业大学学报,2005,34(1): 41-45.

A study of three-component seismic exploration in plateau permafrost region

LIU Jian-Xun, XU Ming-Cai, WANG Xiao-Jiang, ZHANG Bao-Wei

(Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China)

Abstract: Three-component seismic exploration is an effective method for the utilization of P-wave and converted-wave to detect fine structures. With this method, converted-wave imaging profiles have high resolution, and small geological structures such as small faults and small structures can be identified. In this paper, based on the application experiments of three-component seismic exploration technology in Qiangtang basin of Tibet, the authors investigated the three-component seismic data acquisition method, converted-wave data processing technology and comparative interpretation method, and the results achieved prove the effectiveness of this method. This paper has certain reference value for the application and study of multi-component seismic exploration technology in plateau permafrost area in the future.

Key words: plateau permafrost region; three-component seismic exploration; converted-wave; data acquisition; processing and interpretation

作者简介: 刘建勋(1972-),男,1994年毕业于西安地质学院,教授级高工,现主要从事高原冻土区天然气水合物资源勘查地震探测方法技术的研究工作。