

转换型折射波传播规律及其在转换波静校正中的应用研究

刘洋^{①②*}, 魏修成^③

① 油气资源与探测国家重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249;

② 中国石油大学(北京)CNPC 物探重点实验室, 北京 102249;

③ 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083

* E-mail: wliuyang@vip.sina.com

收稿日期: 2007-04-20; 接收日期: 2008-02-01

国家“十五”科技攻关计划项目(编号: 2003BA613A-09)和石油科技中青年创新基金项目(编号: 03E7018)资助

摘要 纵波震源激发、三分量检波器接收的三分量地震勘探技术是解决复杂油气藏勘探的有效手段. 在三分量地震勘探资料处理中, 转换波资料处理尤为关键, 转换波资料处理的难点之一是转换波静校正. 研究了非转换型折射波和转换型折射波传播规律, 发现形成 PPS 转换型折射波的有利条件是上覆介质横波速度比下伏介质横波速度要小很多, 提出了基于 PPS 转换型折射波的转换波静校正方法, 并对实际三分量地震资料进行了处理, 转换波静校正取得了较好的效果.

关键词

PPS 转换型折射波
转换波
静校正

近年来发展起来的纵波震源激发、三分量检波器接收的纵波(PP波)和转换波(PS波)联合地震勘探技术是解决复杂油气藏勘探的有效手段^[1~4]. 由于近地表横波速度低、变化大, 因此, 消除近地表横波速度对反射横波传播时间影响(即横波静校正)的问题尤为突出^[5].

目前针对转换横波静校正的方法主要有 3 类. 第一类是利用勒夫波的频散特性来反演横波速度^[6], 进而计算横波静校正量. 第二类是利用非转换型的横波折射波来反演近地表横波速度^[7]. 第三类是直接求解横波静校正的最大迭加能量法^[8]. 由于目前地震勘探普遍采用纵波震源激发, 因此难以观测到勒夫波和非转换型横波折射波, 使得前两类方法的应用受到限制. 第三类方法类似于剩余静校正, 不能够从根本上解决长波长横波静校正问题.

2002 年, Ritzwoller 和 Levshin^[8]提出联合利用面波频散特性、非转换型纵波折射波和非转换型横波折

射波联合反演表层横波速度方法. Li^[9]提出了一种利用 Z 分量和 X 分量地震记录初至波时差来计算横波静校正的方法. Heelan^[10]研究了计算折射波振幅强度的方法. Hall^[11]对非转换型折射波和转换型折射波进行了介绍, 对其传播的运动学规律进行了简要描述. 最近几十年关于折射波的研究都是集中于研究非转换折射波(PPP 折射波、SSS 折射波)^[12~17], 对转换型折射波的研究很少.

本文以转换型折射波的传播理论为基础, 对转换型折射波的传播特征进行了计算与分析, 发展了基于转换型折射波的横波静校正方法, 并对实际转换波资料进行了处理, 取得了较好的静校正效果.

1 转换型折射波传播理论

地震波以临界角入射到不同介质分界面时, 会产生滑行波, 滑行波在界面滑行过程中不断出射, 则形成折射波. 如果折射波在下行传播、滑行传播和上

行传播过程中均为同一类波(即均为纵波或均为横波), 则该折射波称为非转换型折射波. 如果折射波在下行传播、滑行传播和上行传播过程中波的类型发生了变化(既有纵波又有横波), 则该折射波称为转换型折射波.

对于单个界面的模型, 假设上覆介质纵波速度小于下伏介质的横波速度, 则当 P 波分别以第一临界角、第二临界角入射时, 会产生如图 1 所示的折射波. 图 1 中, PPP 波为非转换型折射波, PPS 波、 PSP 波、 PSS 波为转换型折射波.

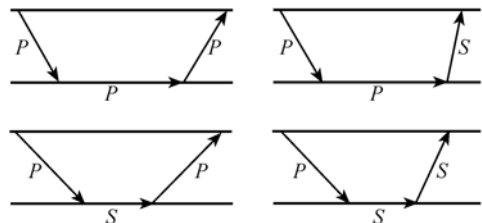


图 1 单个界面的折射波类型

对于多层水平层状介质, P 波震源激发时, 地下第一个界面最多产生 4 种折射波, 其中 3 种为转换型折射波; 第二个界面最多产生 16 种折射波, 其中 15 种为转换型折射波; 第 n 个界面最多产生 4^n 种折射波, 其中 4^n-1 种为转换型折射波.

应用斯奈尔定理, 可以研究各种折射波的传播

路径, 进而得出其旅行时方程. 应用 Heelan^[10]发展的首波理论, 可以计算出各种折射波波场强弱. 当 P 波或 S 波入射到分界面形成反射、透射时, 可以利用佐普里兹方程来计算波的反射系数和透射系数.

2 转换型折射波传播规律

应用上述理论, 针对给定理论模型, 分别计算了折射波传播的时距规律、振幅规律和合成地震记录, 并对其传播特点和规律进行了分析与总结.

2.1 转换型折射波传播的时距曲线计算与分析

考虑如表 1 所示的模型, 采用纵波震源激发, 分别计算来自第一个界面和第二个界面的折射波时距曲线, 结果如图 2 所示. 由图 2 可见: 第一个界面没有横波滑行的折射波; 第二个界面上存在纵波滑行和横波滑行的折射波; 对于同一个界面上的折射波, 具有相同滑行类型的折射波的时距曲线是平行的, 且以上下行波都是纵波的折射波传播最快, 而上下行波中包含有横波的折射波传播得要慢些; 在同一

表 1 模型 1 参数

层序号	界面深度/m	$V_p/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	V_p/V_s	密度/ $10^3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
1	20	600	3.0	1.5
2	50	1000	2.5	2.0
3	100	2500	2.0	2.5

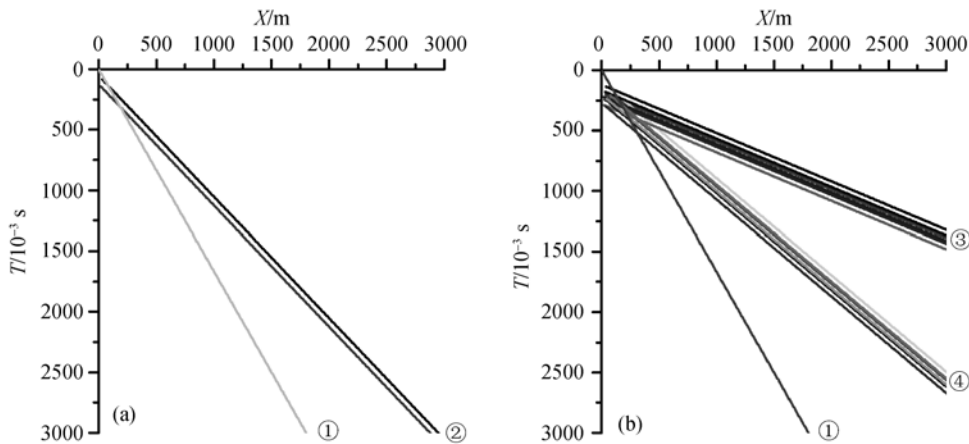


图 2 模型 1 折射波时距曲线

(a) 第一个界面处形成的折射波(含直达波); (b) 第二个界面处形成的折射波(含直达波). 图中, ① 为直达 P 波; ② 为来自第一个界面的折射波, 从上至下分别为 PPP , PPS 波; ③ 为来自第二个界面的滑行波为 P 波的折射波, 从上至下分别为 $PPPPP$, $PPPS$, $PSPPP$, $PPSP$, $PSPSP$, $PPSS$, $PSPP$, $PSSP$ 波; ④ 为来自第二个界面的滑行波为 S 波的折射波, 从上至下分别为 $PPSPP$, $PPSSP$, $PSSPP$, $PPSPS$, $PSSPS$, $PPSSS$, $PSSPS$, $PSSSS$ 波; 其中, $PPPS$ 波和 $PSPPP$ 波的时间相同, $PPSS$ 波和 $PSPP$ 波的时间相同, $PPSP$ 波和 $PSSP$ 波的时间相同, $PPSSS$ 波和 $PSSPS$ 波的时间相同

个界面上, 纵波滑行折射波首先到达, 横波滑行折射波到达得要晚.

2.2 转换型折射波传播的振幅计算与分析

对于转换型折射波传播振幅规律的研究, 主要研究转换型折射波强弱与介质速度的关系, 即何种速度结构有利于转换型折射波的形成.

2.2.1 滑行 P 波出射转换成 P 波和 S 波分析

如图 1 所示, 用 X/Y 值表示 PPP 波与 PPS 的振幅比. 首先计算滑行 P 波分别出射为 P 波和 S 波的振幅比随上覆介质速度的变化曲线. 计算所采用的参数为: 上覆介质密度 D_1 为 $1.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 上覆介质横波速度 V_{S1} 分别为 1100, 1000, 900, 800, 700, 600, 500, 400 m/s, 上覆介质纵波速度 V_{P1} 由 1500 m/s 变化到 2400 m/s, 下伏介质纵波速度 V_{P2} 为 2500 m/s, 下伏介质横波速度 V_{S2} 为 1250 m/s, 下伏介质密度 D_2 为 $2.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. 计算结果如图 3 所示, 由图 3 可见.

- (1) 当上覆介质横波速度较高时, 随着上覆介质纵波速度的增加, 振幅比增大, PPS 转换型折射波振幅减小.
- (2) 当上覆介质横波速度中等时, 随着上覆介质纵波速度的增加, 振幅比变化不大, PPS 转换型折射波振幅变化不大.
- (3) 当上覆介质横波速度较小时, 随着上覆介质纵波速度的增加, 振幅比减小, PPS 转换型折射波振

幅增大.
(4) 随着上覆介质横波速度的减小, 振幅比减小, PPS 转换型折射波振幅增大.

另外, 还计算了上覆介质密度、下伏介质纵波速度、横波速度、密度对振幅比的影响. 结果表明: 速度对振幅比的影响比密度对振幅比的影响大. 由上述分析可得, 纵波在滑行过程中出射形成强转换横波的条件是上覆介质横波速度比下伏介质横波速度要小很多.

2.2.2 透射转换成 S 波分析

地震波除了在滑行过程中出射会转换成横波外, 在地震波下行传播透射、上行传播透射过程中均可能形成转换横波. 下面计算分析各种转换型折射波的强弱.

以表 2 中的模型为例, 计算和分析来自第二个界面的折射波.

一方面, 研究地面纵波入射、第二界面纵波滑行且纵波出射地面的折射波, 符合这种传播特征的折射波包括 PPPPP, PSPPP, PPPSP, PSPSP 等四种折射波. 计算了 PSPPP, PPPSP, PSPSP 转换型折射波与 PPPPP 非转换型折射波振幅比, 计算结果如图 4 所示. 由图可见, 这三种振幅比值均小于 1, 表明在地面纵波入射、界面纵波滑行且纵波出射地面的各种折射波中, PPPPP 折射波振幅最大.

另一方面, 研究地面纵波入射、第二界面纵波滑

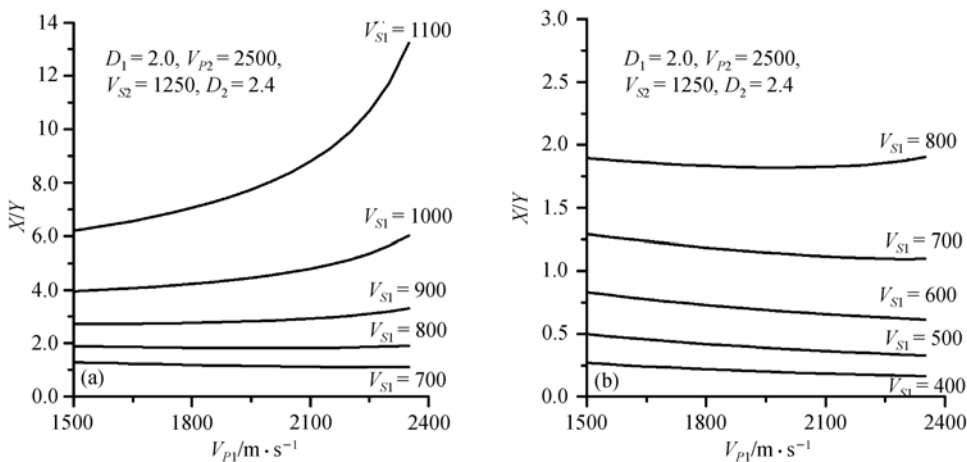


图 3 上覆介质速度变化对振幅比 X/Y 的影响
(a) 不同横波速度对应的系列曲线 1; (b) 不同横波速度对应的系列曲线 2

表 2 模型 2 参数

层序号	界面深度/m	$V_p/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	V_p/V_s	密度/ $10^3\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
1	20	800	2.00	1.5
2	50	1650	3.75	2.0
3	100	2800	2.00	2.5

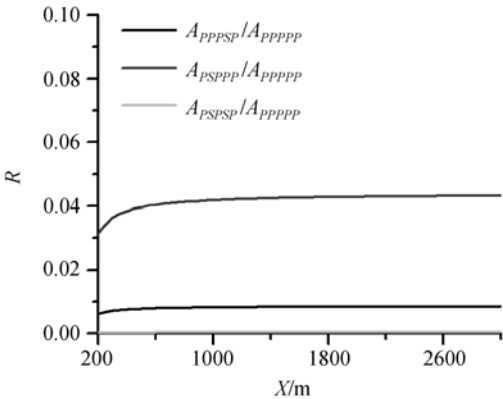


图 4 模型 2 的 PPPSP, PSPPP, PSPSP 折射波与 PPPPP 折射波的振幅比随炮检距变化图

行且横波出射地面的折射波,符合这种传播特征的折射波包括 PPPPS, PPPSS, PSPPS, PSPSS 等 4 种折射波. 计算了 PPPPS, PSPPS, PSPSS 折射波与 PPPSS 折射波振幅比, 计算结果如图 5 所示. 由图可见, PPPSS 折射波振幅最大.

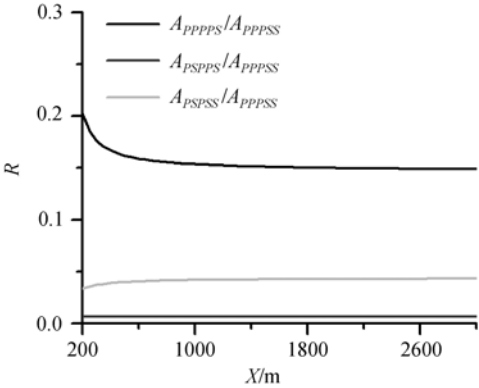


图 5 模型 2 的 PPPPS, PSPPS, PSPSS 折射波与 PPPSS 折射波的振幅比随炮检距变化图

2.3 折射波合成记录

采用射线追踪法, 对表 1 中的模型进行了正演计算, 正演记录如图 6 所示. 由图可见, P 波出射地表的折射波主要投影在 Z 分量上, S 波出射地表的折射波主要投影在 X 分量上; 在水平分量记录上, 第二个界面 P 波滑行的转换型折射波 PPPSS 波振幅要高于 PPPPP 波的振幅, 也高于其它类型的转换型折射波, 因而有利于该波的识别时信息提取. 对表 2 中的模型进行了折射波正演, 结果如图 7 所示, 也得出上述类似结论.

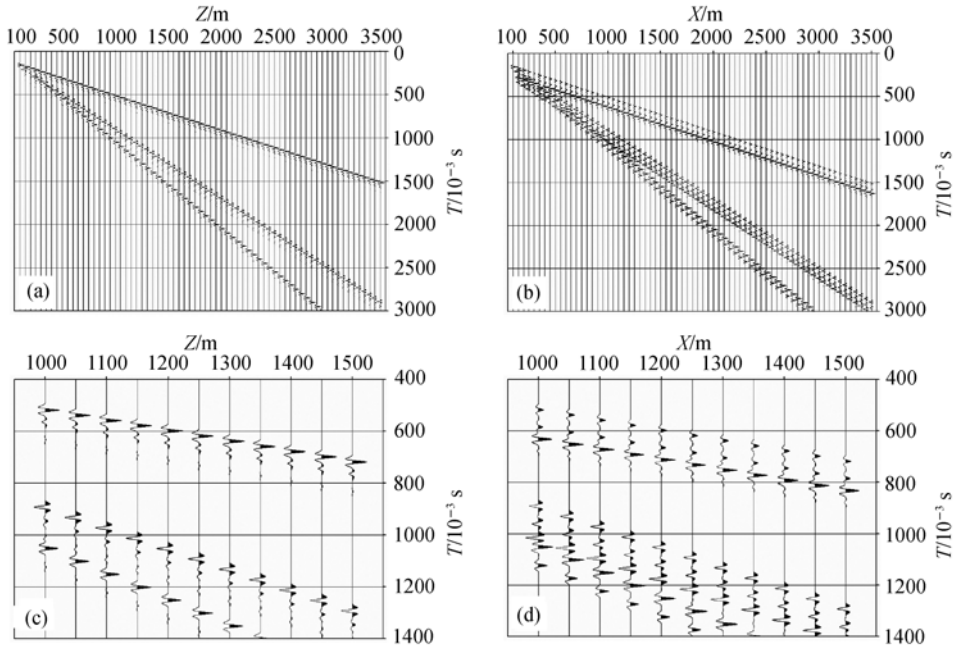


图 6 由模型 1 正演得到的折射波记录和局部放大图
(a) Z 分量; (b) X 分量; (c) Z 分量局部放大图; (d) X 分量局部放大图

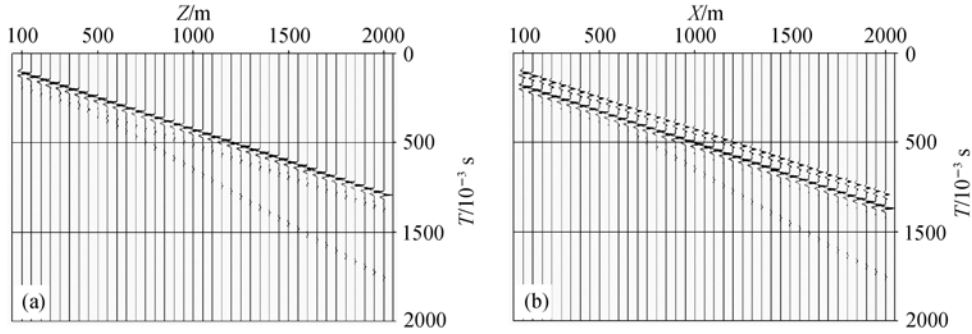


图7 由模型2正演得到的折射波记录

(a) Z分量; (b) X分量

3 基于转换型折射波的横波静校正方法

3.1 转换型折射波识别方法

由于近地表存在低速带, 导致P波出射地面的折射波主要投影在垂直Z分量上, S波出射地面的折射波主要投影在水平X分量上. 垂直Z分量上所记录的各种折射波中, 由激发点以P波下行传播到折射界面、然后以P波滑行、最后再以P波上行传播到地面的非转换型折射波(记为PPP折射波)能量最强, 一般表现为初至波. 通过前面分析可知, 当近地表低速带横波速度比高速层横波速度小很多时, 在水平X分量上所记录的各种折射波中, 由激发点以P波下行传播到折射界面、然后以P波滑行、最后以S波上行传播到地面的转换型折射波(记为PPS折射波)能量最强, 因而有利于该波的识别和信息提取. 这种转换型折射波上行时以纯横波在低速带内传播, 它携带了低速带的横波速度信息, 因此可以将这种波用到横波静校正中去.

下面主要考虑来自高速层顶面的PPS转换型折射波, 这类转换型折射波能量最强, 同时也有利于横波静校正. 通过理论计算和实际记录分析, 总结出此类转换型折射波具有如下特征:

(1) 时间特征: 中等至大炮检距初至波往往表现为PPP非转换型折射波, PPS转换型折射波表现为续至波, 因此应在续至波区域寻找和识别.

(2) 分量特征: 纵波出射地表的折射波主要投影在垂直Z分量记录上, 横波出射地表的折射波主要投影在水平X分量记录上, 因此应在水平X分量记录上寻找和识别.

(3) 偏振特征: 弹性体波质点运动轨迹表现为直线, 但纵波质点的振动方向与波传播方向平行, 横波质点的振动方向与波传播方向垂直, 据此可以识别波出射到地面时的类型.

(4) 频率特征: 通常近地表为低速带, 低速带对地震波具有较强吸收衰减作用, 而且, 低速带对横波的吸收大于对纵波的吸收, 导致PPS折射波的主频要低于PPP折射波的主频.

(5) 时距特征: 由于近地表横波速度低、横波速度变化范围大, 所以PPS转换型折射波传播时间长、变化剧烈; 在共炮点道集上, PPS转换型折射波旅行时的变化比PPP非转换型折射波旅行时的变化剧烈; 由于强的PPS转换型折射波是在纵波滑行出射时转换形成的, 所以其视速度与PPP非转换型折射波视速度相当.

图8为某地区典型Z分量和X分量记录, 在Z分量记录上, PPP非转换型折射波表现为初至波; 在X分量记录上, PPS转换型折射波表现为续至波, 其它各种特征明显, 容易识别.

3.2 转换型折射波静校正方法

采用类似于文献[18]的方法来计算横波静校正量, 主要步骤为:

(1) 利用垂直分量PPP非转换型折射波时间, 进行时距曲线拟合, 得出PPP折射波的交叉时.

(2) 采用最优迭代分离方法, 将PPP折射波交叉时分离成炮点纵波延迟时和检波点纵波延迟时.

(3) 利用PPS转换型折射波时间计算出检波点横波延迟时, 由于PPS转换型折射波时间和PPP非转换型折射波时间之差近似等于检波点横波延迟时

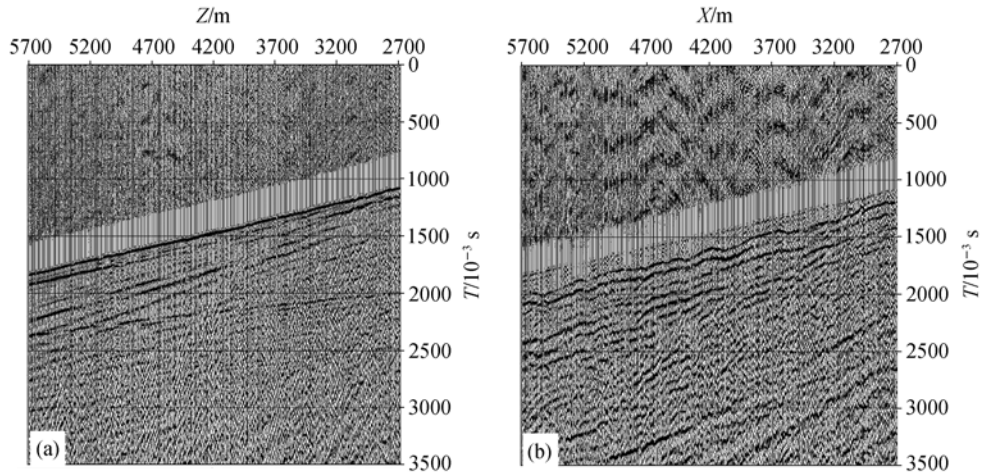


图 8 某地区典型单炮记录的 Z 分量和 X 分量

(a) Z 分量; (b) X 分量

和检波点纵波延迟时之差, 所以可以先计算出二者之间的差值, 再计算横波延迟时。

(4) 利用延迟时计算近地表纵波速度和横波速度。

(5) 根据基准面高程、纵波填充速度和横波填充速度, 分别计算炮点纵波静校正量、检波点纵波静校正量、检波点横波静校正量。

4 实际资料处理

将本静校正方法应用于某区实际三分量资料处

理。图 9(a)为 X 分量原始单炮记录, 由图可见该区转换波静校正问题较为严重。图 9(b)为利用野外模型法提供的炮点纵波静校正量、检波点横波静校正量进行静校正后的单炮记录, 由图可见其静校正效果不明显。由于从图 9(a)记录上可见明显的 PPS 转换型折射波, 因此利用本文发展的方法计算了纵波和横波静校正量, 图 9(c)为应用本文方法静校正后的单炮记录, 可见本方法静校正效果明显优于野外模型法静校正效果。

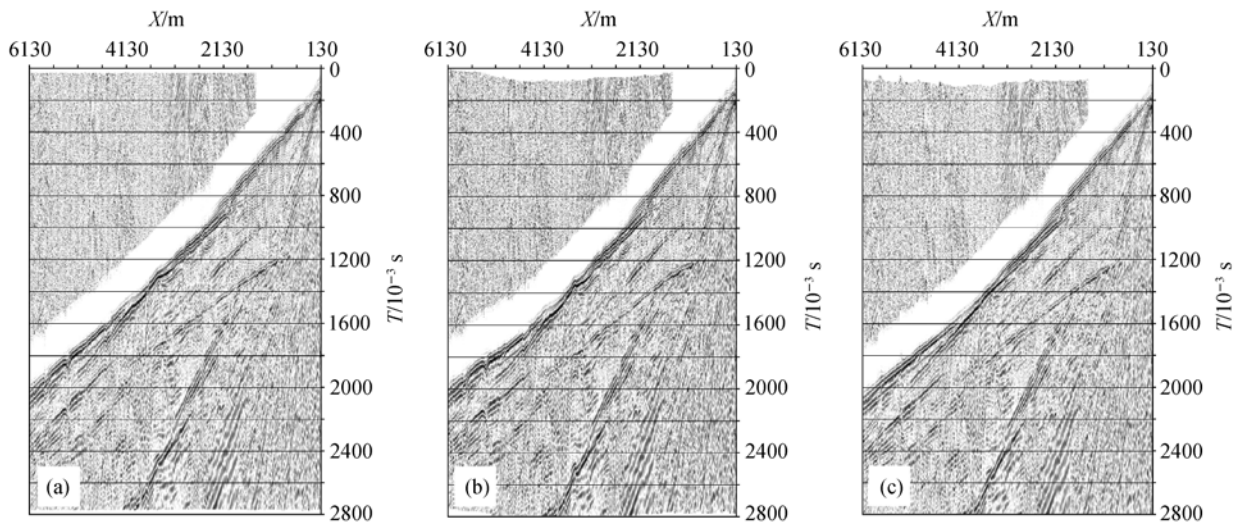


图 9 X 分量本方法静校正与野外模型法静校正效果对比图

(a) 原始单炮记录; (b) 野外模型法静校正后单炮记录; (c) 本方法静校正后单炮记录

5 结论

本文研究了转换型折射波的传播特点和规律, 揭示了形成 *PPS* 转换型折射波的有利条件, 形成了 *PPS*

转换型折射波识别的基本方法和基于 *PPS* 转换型折射波的横波静校正方法, 并在实际三分量地震资料处理中进行了应用, 转换波静校正获得较好的效果。

参考文献

- 1 Caldwell J. Marine multi-component seismology. The Leading Edge, 1999, 18(11): 1274—1282[[doi](#)]
- 2 Stewart R R, Gaiser J E, Brown R J, et al. Converted-wave seismic exploration: methods. Geophysics, 2002, 67(5): 1348—1363[[doi](#)]
- 3 Stewart R R, Gaiser J E, Brown R J, et al. Converted-wave seismic exploration: applications. Geophysics, 2003, 68(1): 40—57[[doi](#)]
- 4 董敏煜. 多波多分量地震勘探. 北京: 石油工业出版社, 2002
- 5 Cary P W, Eaton D W S. A simple method for resolving large converted-wave (P-SV) statics. Geophysics, 1993, 58(3): 429—433[[doi](#)]
- 6 Mari J L. Estimation of static corrections for shear-wave profiling using the dispersion properties of Love waves. Geophysics, 1984, 49(8): 1169—1179[[doi](#)]
- 7 Frasier C, Winterstein D. Analysis of conventional and converted mode reflections at Putah sink, California using three-component data. Geophysics, 1990, 55(6): 646—659[[doi](#)]
- 8 Ritzwoller M H, Levshin A L. Estimating shallow shear velocities with marine multicomponent seismic data. Geophysics, 2002, 67(6): 1169—1179
- 9 Li Y P. A new method for converted wave statics correction. Expanded abstracts of 72nd SEG Annual Meeting, 2002 October 6—11, Utah. Dallas: SEG Press, 2002. 979—981
- 10 Heelan P A. On the theory of head waves. Geophysics, 1953, 18(4): 871—892[[doi](#)]
- 11 Hall D H. Converted waves in refraction survey over marks with variable depth. Geophysics, 1964, 29(5): 733—744[[doi](#)]
- 12 Ervin C P, McGinnis L D, Otis R M, et al. Automated analysis of marine refraction data A computer algorithm. Geophysics, 1983, 48(5): 582—589[[doi](#)]
- 13 Taner M T, Wagner D E, Baysal E, et al. A unified method for 2-D and 3-D refraction statics. Geophysics, 1998, 63(1): 260—274[[doi](#)]
- 14 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. 地球物理学报, 2001, 44(2): 272—278
- 15 冯太林, 张学工, 李衍达, 等. 折射波地震记录叠加成象方法研究. 地球物理学报, 2001, 44(1): 129—134
- 16 张建中, 徐峰, 戴云. 共中心点域浅层折射波解释方法及应用研究. 石油地球物理勘探, 2001, 36(4): 459—465
- 17 赵德亨, 田钢, 王帮兵. 浅层地震折射波法综述. 世界地质, 2005, 24(2): 188—193
- 18 魏修成, 刘洋. 等效连续速度模型在地震资料处理中的应用. 勘探地球物理进展, 2003, 26(4): 260—267