

# 青藏高原东北缘盆山结合部位深反射资料处理方法与初步地质认识

王海燕<sup>1</sup> 高 锐<sup>1</sup> 马永生<sup>2</sup> 朱 铨<sup>2</sup> 李秋生<sup>1</sup>  
李鹏武<sup>1</sup> 匡朝阳<sup>1,3</sup> 卢占武<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院地质研究所岩石圈中心, 北京 100037; 2. 中石化股份有限公司南方勘探开发分公司, 云南 昆明 650021; 3. 中国石化集团, 华东石油局第六物探大队, 江苏 南京 210007)

**摘要:**盆山结合带地质条件复杂、地形起伏大, 深地震反射资料具有信噪比低、各种干扰波严重以及速度横向变化大等特点。针对盆山结合部位深反射资料的特点, 主要利用 ProMAX 处理系统对横跨若尔盖盆地和西秦岭造山带结合部位的二维深地震反射资料(简称 SP04-2 剖面)进行折射静校正、叠前去噪、地表一致性处理、人机交互速度分析、剩余静校正循环迭代处理、地表基准动校正叠加和叠后去噪处理等方法试验研究, 形成一套适应盆山结合部位深地震反射资料的处理方法和流程, 最终得到 SP04-2 叠加剖面。该剖面首次揭示出若尔盖盆地—西秦岭造山带盆山结合部位的岩石圈结构, 为研究盆山深部接触关系提供了可靠的地震学依据。

**关键词:**深地震反射; 盆山结合部位; 资料处理; 信噪比; 去噪

**中图分类号:** P315.63      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2007)01-0142-07

若尔盖盆地和西秦岭造山带是青藏高原东北缘典型的盆山构造, 由于其特殊的大地构造环境和恶劣的高原自然条件<sup>[1-3]</sup>, 多年来, 它的岩石圈精细结构、构造性质及盆山深部构造关系等一直没有被彻底揭露出来, 而深地震反射剖面技术是揭示岩石圈细构造的有效手段。但由于深反射地震探测深度大, 在数据采集时, 尽管采用了较深的炮孔、较大的药量以及合理的数据采集参数, 记录到的深层信号幅度仍较弱, 有时还会被强干扰背景所淹没。此外, 复杂的地质构造(如盆山结合部位)使深反射地震剖面的波组特征复杂, 给处理和解释造成很大困难。为更好地对深地震反射资料进行地质构造解释, 获得真实可靠的深反射剖面是关键。因此在低信噪比的深地震反射资料处理中, 提高记录的分辨率很重要, 关键是从干扰背景中提取和增强弱反射信号。

## 1 深地震反射资料情况

笔者采用 2004 年采集的横过松潘地块北缘和西秦岭造山带深地震反射剖面的第二段深反射资料(简称 SP04-2)作为实例, 来讨论适合盆山结合部位的处理方法和流程。

SP04-2 剖面跨越西秦岭造山带和若尔盖盆地的结合部位, 地形起伏剧烈, 高差悬殊且地下构造复杂, 地表主要出露石炭系、二叠系、三叠系等老地层的灰岩、白垩系、古近—新近系和第四系<sup>[4]</sup>。采集的深反射资料具有低信噪比、干扰强、构造复杂、速度变化大等特点。分析原始单炮记录, 其波场分布主要有: 有效反射波、直达波、折射波、面波、随机干扰波和线性干扰波等。经对原始资料及二维监控处理剖面中所存在问题的分析, 认为本区资料处理的技术难点包括:

① SP04-2 剖面跨越盆山结合部位, 高差变化较大, 低速带的测定精度较低, 从而引起动静校正不准, 因此做好动静校正问题是本次处理的关键;

② 本区地表变化较大, 激发和接收条件较差, 导致部分原始单炮记录上干扰背景大, 使得有效地识别弱信号并消除噪声干扰、提高资料的信噪比成为复杂地表条件下低信噪比深地震反射资料的又一个难点。

针对上述分析, 重点进行以提高信噪比为基础, 以客观真实的成像为目的进行处理。并通过方法试验和参数测试工作最终确定总结出一套较合适的深地震反射资料处理技术

收稿日期: 2006-08-28; 改回日期: 2006-11-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40334035)和青年科学基金项目(40604010)资助。

作者简介: 王海燕, 女, 1975 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事地球物理与大地构造研究; E-mail: hyanwhy@126.com。

方法,并在 SP04-2 实际资料处理应用中取得了良好效果。

## 2 处理方法

根据研究区地质特点,结合原始资料情况,着重从折射静校正、叠前去噪、速度分析、剩余静校正迭代处理、地表基准的动校正及叠后去噪等入手,以提高信噪比为目的,消除各种噪声干扰,突出有效反射、提高叠加成像质量,为后续工作提供构造形态真实、波组特征清晰的处理结果,主要技术如下:

### 2.1 折射静校正

做好静校正工作,克服地形高差与低速带的影响。盆地结合部位地表地质条件复杂,通常可采用地形校正与折射静校正相结合的方法。地形校正能够校正表层的地形和结构变化所造成的时差。但只作地形校正并不能完全消除表层因素的影响。在复杂地表地质条件下,特别是低信噪比地区,近地表的厚度和速度可由折射波初至时间来确定。实践证明,折射静校正是一种较为有效的方法,它可以避开含噪信

号的互相关问题。任何低信噪比资料,甚至在没有任何反射同相轴的条件下,折射波初至总是可识别或基本识别的<sup>[4]</sup>。因此,在低信噪比地区,折射静校正能解决低速带引起的静校正问题,特别是长波长静校正问题<sup>[9]</sup>。图 1 为静校正前后单炮记录对比图,经折射静校正后,单炮记录的初至被拉平(图中 A 和 B),同相轴连续性有明显改善。

### 2.2 叠前去噪

叠前对随机噪声进行有效压制是改善资料信噪比的关键技术。尤其对于那些不可预测随机噪声,多次叠加虽然能对其进行有效的压制,但对于信噪比很低的地区,有效信号基本上淹没在噪声中,必须在叠前对随机噪声进行有效的压制,才能提高资料的信噪比,保证后续处理。针对本区波场特点,分别采用不同的方法对各种干扰进行有效压制和消除。

①采用人工编辑方法剔除野值和坏道,并利用二维滤波等方法来消除浅层折射和面波干扰。

②在时间与空间域预测出相干的同相轴,再将相干的信号和随机噪声分离开并加以剪除。具体做法可以对炮集或检波

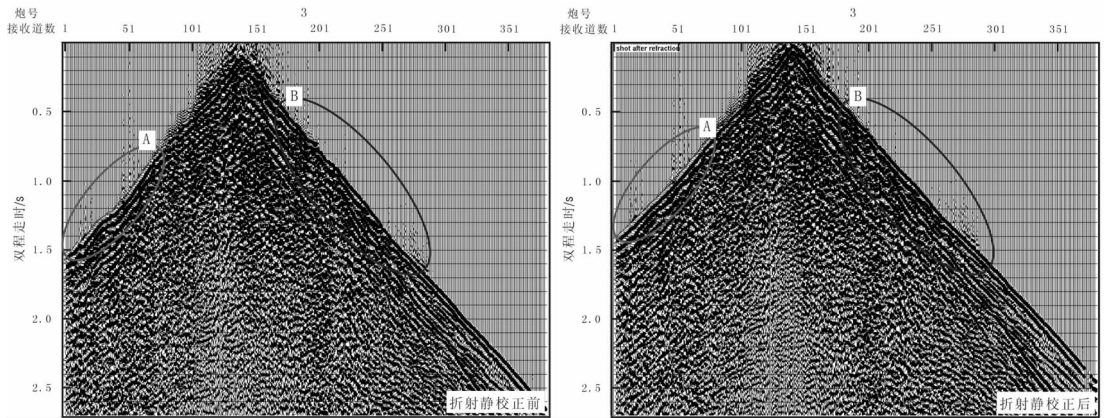


图 1 折射静校正前后单炮记录对比

Fig.1 Contrasting shot records before and after refraction static correction

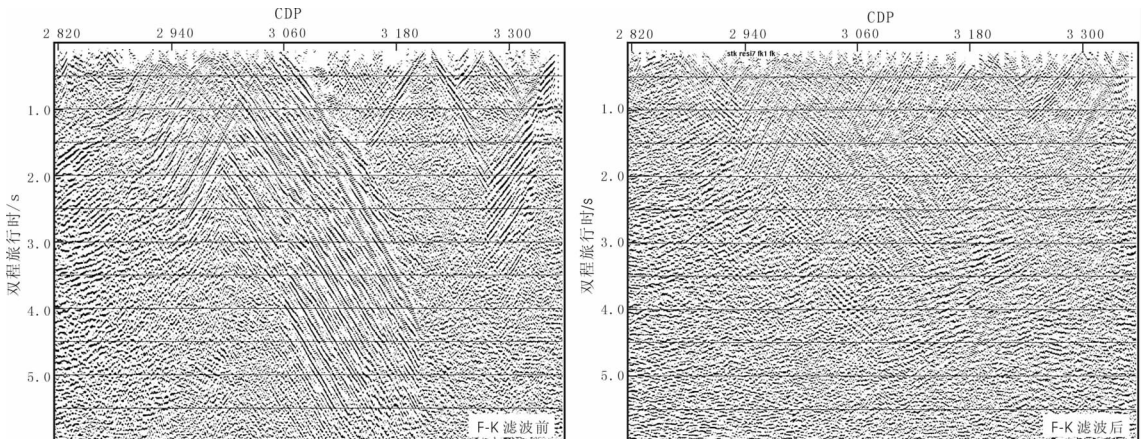


图 2 F-K 滤波前后叠加剖面图(局部)

Fig.2 Stacked section before and after F-K filter (a part of the section)

点集或经过动校正后的共中心点道集进行叠前随机噪声压制。

③线性干扰波是影响该地区信噪比最严重的相干干扰波。通过资料分析和方法测试,采用了 F-K 滤波法去除线性干扰波。该方法利用噪声和有效波在 F-K 域的不同特征来消除或衰减噪声,提高记录的信噪比。但在单炮记录上直接应用 F-K 滤波方法常会产生空间假频和折叠效应,因此在消除该工区低信噪比资料的线性干扰时,是共炮点域动校正后使用 F-K 滤波方法<sup>[5,9]</sup>。图 2 为线性干扰波衰减前后局部叠加剖面对比,显示 F-K 滤波方法有效地压制了线性干扰波。

### 2.3 地表一致性处理

地表一致性处理可以消除振幅空间变化。在该方面主要采用地表一致性振幅补偿和地表一致性反褶积两种方法。

①地表一致性振幅补偿。由于深地震剖面长,涉及到的表层条件变化较大,激发和接收因素变化也很大,不同的炮点和检波点及同一炮的不同道之间能量存在较大差异。采用球面扩散补偿和地表一致性的振幅补偿相结合的办法可减弱因激发、接收条件变化及地表条件不均匀所造成的振幅空间变化,有效地改善道间的振幅和相位关系,使地震道的振幅能量分布均匀合理,有益于提高信噪比和保真处理<sup>[7,8]</sup>。

②地表一致性反褶积。地表一致性预测反褶积是一种多道计算反褶积,它消除了炮点、检波点、CDP 点和炮间距几个方向上滤波器的混合效应,求出的反褶积因子比较平稳,褶积效果使得地震记录的振幅、频率、相位的一致性较好,能更好地压缩地震子波,提高地震记录的纵向分辨率<sup>[9]</sup>。预测反褶积较之脉冲反褶积,能最大限度地保证地震记录的信噪比(图 3)。

### 2.4 速度分析

速度参数不准直接影响剖面叠加效果,同时也会影响资料的品质和横向分辨率。因此,提高速度分析的精度是提高资料横向分辨率的关键环节。进行速度分析时对速度谱进行放大逐步分析,同时显示速度剖面,以剖面上的速度趋势来控制部分速度谱不好的点,并参考 CDP 动校正道集以及谱点附近的叠加效果来控制当前谱点速度的准确性,保证了速

度拾取的精确程度<sup>[9,10]</sup>。由于 SP04-2 探测深度大,记录时间长(30 s),此时浅层记录的动校正量较大,而深层记录的动校正量较小,因此,对于 6.0 s 以上的地震记录,使用精细速度分析方法求取准确的叠加速度,而对于 6.0 s 以下的深层记录的速度分析可粗略些。

### 2.5 剩余静校正

尽管已经过各种校正处理,剩余静校正是改善剖面同相轴连续性差、不光滑、信噪比低等现象的有效技术手段。进行剩余校正时,对于初叠加剖面的浅部有连续地震波组的情况,选取该波组作为剩余静校正的时窗,对于 CDP 道集的所有道进行剩余静校正处理,可以取得较好的处理效果。但当地震时间剖面不存在比较连续的地震波组,或者在处理的地震时间剖面上,没有较好的波组可选为剩余静校正的时窗进行剩余静校正处理,往往不能取得较好的处理效果。孟尔盛先生曾经指出,在浅层没有好的波组情况下,可以选取深层连续性好的层位作为基准层进行剩余静校正量的计算,能够取得较好的效果,该观点在处理 SP04-2 剖面中得到了证实。SP04-2 剖面的 6.0 s 以上不存在连续清晰的反射波组,处理中采用 7.0 s 左右(TWT)的连续强反射波组作为基准层进行剩余静校正处理,经过多次人机交互速度分析和剩余静校正迭代,来消除剩余静校正量的影响,取得了很好的效果。图 4 为经过不同次数剩余静校正后剩余静校正量值图。

### 2.6 叠后去噪处理

虽然在叠前处理中采用了多种去噪手段,但仍会或多或少地残留一些干扰噪声。为进一步提高深反射资料的信噪比,须进行叠后去噪处理。经过方法测试和分析,确定采用 F-X 反褶积和中值滤波法去除叠加剖面存在的随机噪声和残留的干扰波。

#### (1)F-X 反褶积

在低信噪比的深部地震反射资料处理中,经常采用 F-X 反褶积进行叠后去噪,去除随机噪声的同时提高地震记录的信噪比和分辨率。对 SP04-2 进行 F-X 反褶积后,剖面中

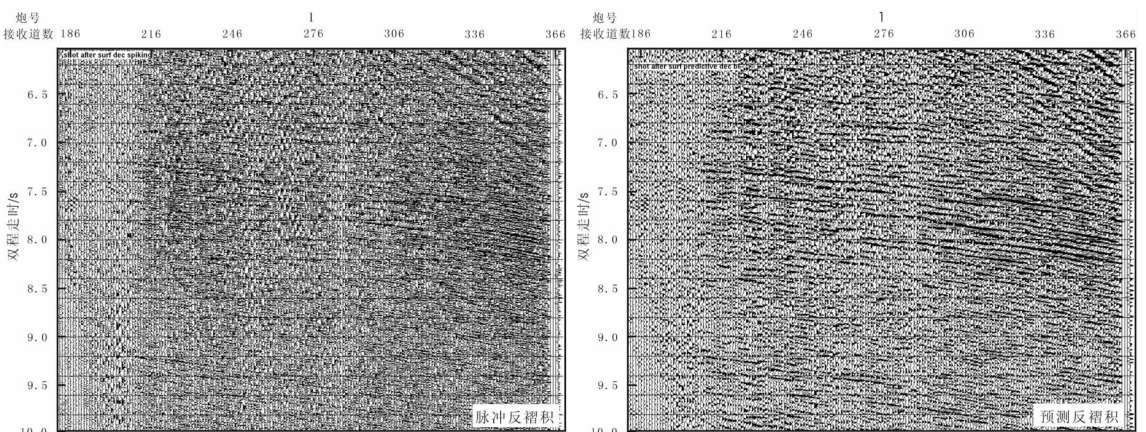


图 3 不同反褶积方法单炮记录对比

Fig.3 Contrast of shot records with different deconvolution methods

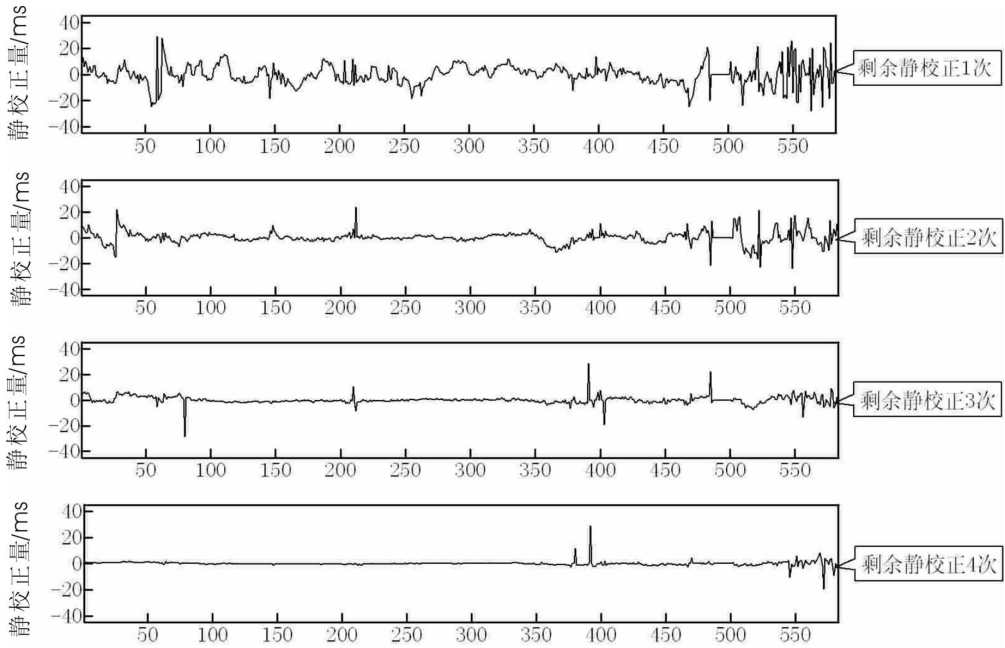


图 4 剩余静校正量值图  
Fig.4 Map of residual static correction

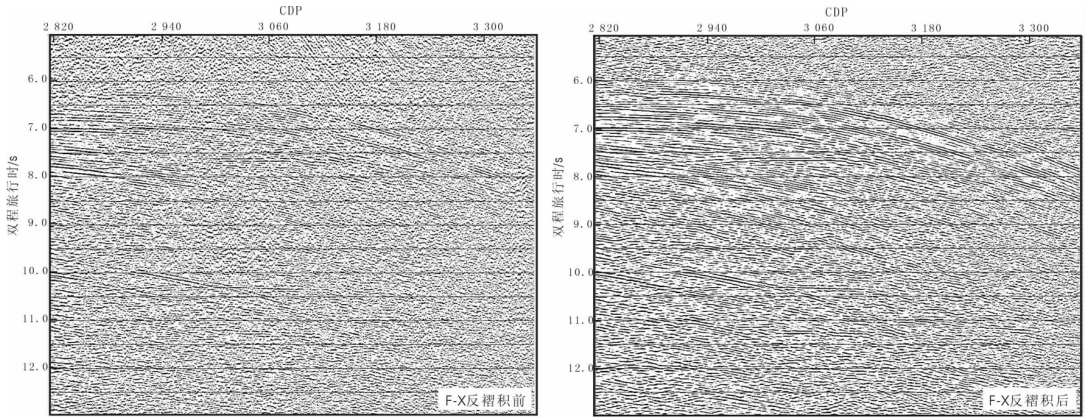


图 5 F-X 反褶积前后叠加剖面对比图(局部)  
Fig.5 Contrasting stacked sections before and after F-X deconvolution (local)

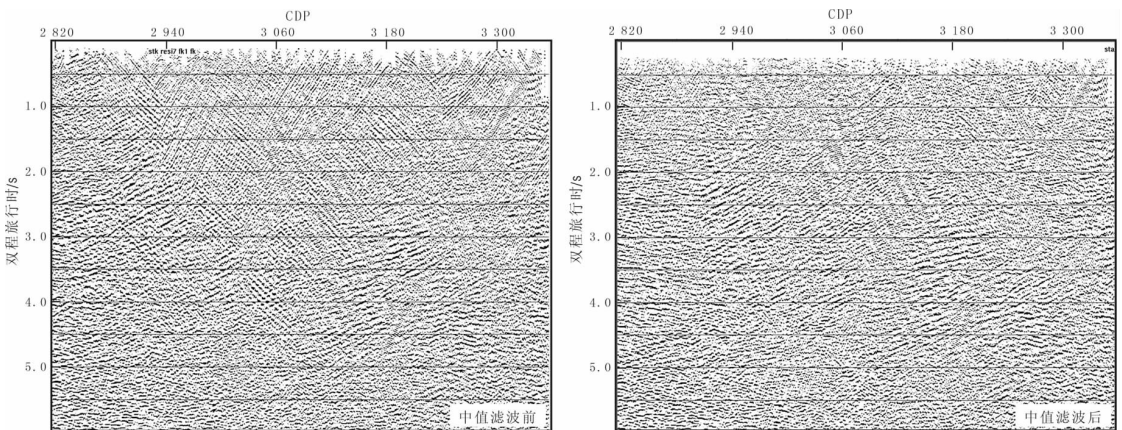


图 6 中值滤波去噪前后叠加剖面(局部)  
Fig.6 Stacked sections before and after median filter noise attenuation (local)

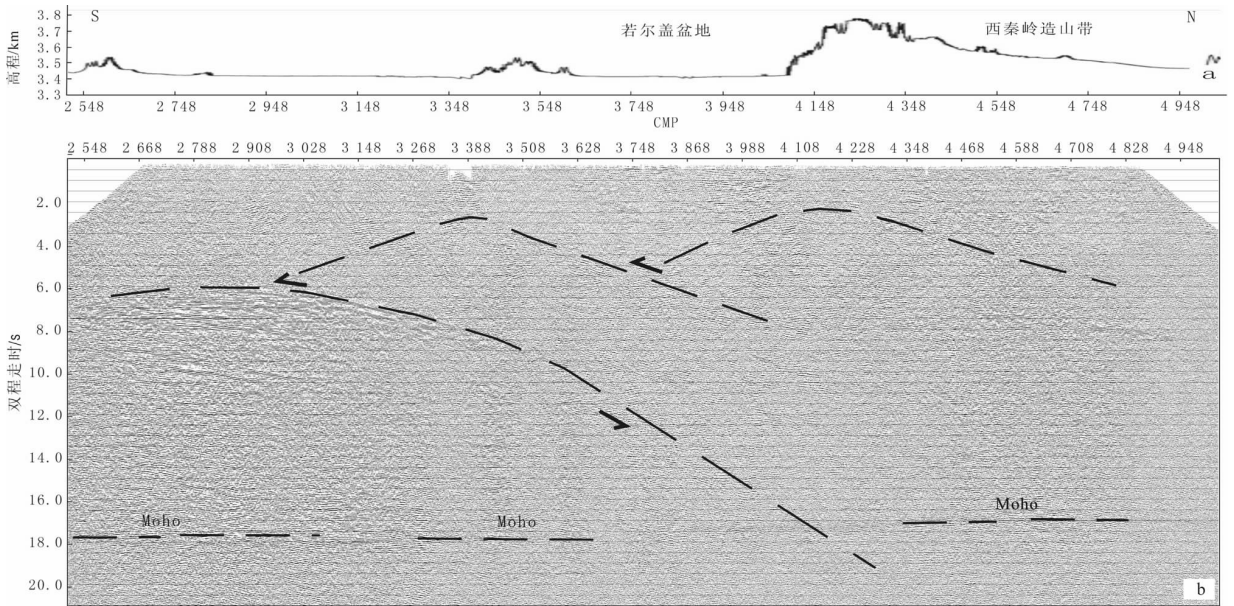


图7 SP04-2 深地震反射叠加剖面 and 初步解释

Fig.7 Deep seismic reflection stacked section and preliminary interpretation of SP04-2

的残留随机噪声得到了很有效的压制,剖面的成像质量也得到明显提高。图5为F-X反褶积前后的叠加剖面(局部)对比,可以看到去噪后剖面的信噪比明显提高,有效地压制了叠加剖面中的随机噪声。

### (2) 中值滤波

F-X反褶积去噪后浅层仍然存在部分强干扰,经测试采用中值滤波方法利用干扰波和有效信号的速度差异可以有效地去除残留的强干扰波。图6是中值滤波去噪处理前后的叠加剖面(局部)图。对比图6中中值滤波前后剖面,明显看到去噪前剖面中0~5.0 s (TWT) 时间段上的斜干扰很突出,压制了浅层的有效波,而中值滤波处理后的时间剖面上大部分斜干扰已被去除。

## 3 主要反射特征和初步认识

### 3.1 主要反射特征

利用上述的方法技术和处理流程得到一条0~30.0 s较客观可靠的叠加剖面(图7),总结该剖面的反射特征,横向上由南向北不同的反射特征又可划分为三大震相区:若尔盖盆地部分的强地震反射区、盆山结合部位的杂乱-透明反射区和西秦岭造山带部分的中强反射区;由浅到深划分为4套反射层系:0~7.0 s为上地壳反射层系,7.0~17.0 s为下地壳反射层系,17.0~18.2 s为莫霍面反射层系,18.2 s以下为上地幔反射层系。上地壳表现弱反射特征,以逆冲叠覆构造为主;下地壳主要表现为北倾的强反射特征,是SP04-2段剖面最显著的反射特征;Moho为强反射的下地壳的底界面,表现为近水平的反射特征,而在盆山结合带由于若尔盖下地壳插入西秦岭上地幔中从而造成Moho不成像。

### 3.2 初步认识

SP04-2深地震反射剖面不仅揭示了若尔盖盆地和西秦岭造山带南段的岩石圈结构,而且在岩石圈尺度上揭露出若尔盖盆地向西秦岭造山带俯冲的空间行为,为追踪若尔盖地下地壳俯冲到西秦岭造山带之下的证据等提供了较客观的地震依据。初步解释见图7-b。

(1)若尔盖盆地与西秦岭造山带的岩石圈尺度构造关系。下地壳北倾的反射结构图像反映了若尔盖地下地壳向北俯冲插入西秦岭造山带,并在盆山结合带处穿过Moho插入西秦岭上地幔盖层,而西秦岭造山带由北向南逆冲推覆到若尔盖盆地上,揭示出若尔盖盆地与西秦岭造山带是在挤压构造体系下形成的俯冲和逆冲推覆构造。

(2)后期伸展运动可能形成现今近平的Moho。Moho反射表现为近水平的多组断续强反射震相。在COCORP的反射剖面中,平的莫霍面反射通常被解释为莫霍面是新形成的,相对年轻<sup>[11-14]</sup>。根据地表地形(图7-a)、地壳厚度及Moho的起伏形态之间的相关性,推断可能是后期伸展运动形成了现今西秦岭造山带近于平的莫霍面特点。

(3)若尔盖盆地与西秦岭造山带曾同属于松潘块体。剖面显示出若尔盖和西秦岭地壳主要反射特征类似:岩石圈整体均表现为弱反射的上地壳、强反射下地壳和弱反射的上地幔的反射特征;上、下地壳的分界面均在6.0~7.0 s(TWT);上地壳以隆起为主要构造特征,下地壳均以北倾的反射为主;Moho均为下地壳和上地幔的明显的分界面。根据上述特征推测若尔盖盆地和西秦岭造山带可能曾同属统一稳定的松潘块体。

(4)可能存在壳内拆离构造层。叠加时间剖面显示上、下

地壳反射强弱不同明显不同,且地层变形程度不同,即上地壳以隆起为主要构造特征,下地壳均以北倾的反射为主。结合青藏高原边缘存在壳内拆离层的资料<sup>[15-18]</sup>,推测若尔盖盆地和西秦岭造山带上、下地壳之间存在拆离构造层。

### 参考文献(References):

- [1] 穆桂春. 若尔盖高原的自然概况与地貌发育[J]. 西南师范学院学报,1982,4:42-46.  
Mu Guichun. The natural situation and physiognomy growth of the Zoigè plateau [J]. Journal of Southwest China Normal University, 1982,4:42-46(in Chinese with English abstract).
- [2] 李勇, 侯中健, 司光影, 等. 青藏高原东缘新生代构造层序与构造事件[J]. 中国地质,2002, 29(1):30-36.  
Li Yong, Hou Zhongjian, Si Guangying, et al. Cenozoic tectonic sequence and tectonic events at the eastern margin of the Qinhai-Tibet plateau [J]. Geology in China,2002, 29(1):30-36(in Chinese with English abstract).
- [3] 陈维生, 文沛然, 长绍华, 等. 区域地质志 [R]. 四川省地质矿产局,1984.  
Chen Weisheng, Wen Peiran, Chang Shaohua, et al. Regional Geolonal of Sichuan Province [R]. Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources,1984(in Chinese).
- [4] 李庆忠. 关于低信噪比地震资料的基本概念和质量改进方向[J]. 石油地球物理勘探,1986,21(4):343-364.  
Li Qingzhong. Basal notion and reformative direction of quality on seismic data of low S/N ratio [J]. Oil Geophysical Prospecting, 1986,21(4):343-364(in Chinese with English abstract).
- [5] 吴战培, 杜胜明, 姚付生, 等. 山区低信噪比地震资料处理方法[J]. 石油地球物理勘探,1998,33(增刊):10-15.  
Wu Zhanpei, Du shengming, Yao Fusheng, et al. Low S/N ratio seismic data processing method in mountain [J]. Oil Geophysical Prospecting,1998,33(supp.):10-15(in Chinese with English abstract).
- [6] 吴战培. 炮点域动校正后 F-K 滤波 [J]. 石油地球物理勘探, 1995,30(3):422-423.  
Wu Zhanpei. F-K filter after NMO correction on shot gather [J]. Oil Geophysical Prospecting,1995, 30(3):422-423(in Chinese with English abstract).
- [7] 刘馥, 等. 地表一致性振幅补偿[J]. 石油物探信息,1994.  
Liu Fu, et al. Surface consistent amplitude recovery [J]. Oil Physical Exploration Information, 1994(in Chinese with English abstract).
- [8] 屈智华, 叶秋焱, 刘旺. 中国西部复杂地区地震资料处理[J]. 物探与化探, 2000,24(1):43-50.  
Qu Zhihua, Ye Qiuyan, Liu Wang. The processing of seismic data for western China complex arears [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2000,24(1):43-50(in Chinese with English abstract).
- [9] 徐明才, 高景华, 胡振远. 深反射地震资料处理和解释的初步研究[J]. 物探与化探, 1995,19(5):360-368.  
Xu Mingcai, Gao Jinghua, Hu Zhenyuan. A preliminary study on the processing and interpretation of deep reflection seismic data [J]. Geophysical & Geochemical Exploration,1995,19 (5):360-368 (in Chinese with English abstract).
- [10] 徐明才, 高景华. 深部地震资料的处理和解释方法[J]. 物探化探计算技术, 1999,21(2):151-158.  
Xu Mingcai, Gao Jinghua. Methods of processing and interpretation about the deep seismic data [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration,1999,21 (2):151-158(in Chinese with English abstract).
- [11] Brown L D, Wille D M, Zheng L, et al. COCORP:New perspectives on the deep crust [J]. Geophys J.R.AstrSoc,1987,89:47-54.
- [12] Brown L D. Lower continental crust:Variations mapped by COCORP deep profiling[J]. Annal. Geophy.,1987,5:325-332.
- [13] 高锐, 黄东定, 卢德源, 等. 横过西昆仑造山带与塔里木盆地结合带的深地震反射剖面[J]. 科学通报,2000,45(17):1874-1879.  
Gao Rui, Huang Dongding, Lu Deyuan, et al. Deep seismic reflection profile across the contact zone of west Kunlun orogen and Tarim basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2000,45 (17):1874-1879(in Chinese).
- [14] 高锐, 肖序常, 刘训, 等. 新疆地学断面深地震反射剖面揭示的西昆仑-塔里木结合带岩石圈细结构 [J]. 地球学报,2001,22(6):547-552.  
Gao Rui, Xiao Xuchang, Liu Xun, et al. Detail lithospheric structure of the contact zon of West Kunlun and Tarim revealed by deep seismic reflection profile along the Xinjiang Geotransect [J]. Acta Geoscientia Sinica,2001,22 (6):547-552 (in Chinese with English abstract).
- [15] 王椿镛, 韩渭宾, 吴建平, 等. 松潘-甘孜造山带地壳速度结构 [J]. 地震学报,2003,25(3):229-242.  
Wang Chunyong, Han Weibin, Wu Jianping, et al. Crustal structure beneath the Songpan-Ganze orogenic belt [J]. Acta Seismological Sinica,2003,25(3):229-242(in Chinese with English abstract).
- [16] 李亚东. 白龙江地区的逆冲推覆构造 [J]. 甘肃地质学报,1994,3(1):41-49.  
Li Yadong. On obduction nappe structure of Bailongjiang region [J]. Acta Geological Gansu, 1994,3 (1):41-49 (in Chinese with English abstract).
- [17] 李亚林, 李三忠, 张国伟. 秦岭勉略缝合带组成与古洋盆演化 [J]. 中国地质,2002,29(2):129-134.  
Li Yalin, Li Sanzhong, Zhang Guowei. Composition of the Mianlue suture zone and its relation with the evolution of the old oceanic basin [J]. Geology in China,2002,29(2):129-134(in Chinese with English abstract).
- [18] 张岳桥, 杨农, 孟辉, 等. 四川攀西地区晚新生代构造变形历史与隆升过程初步研究[J]. 中国地质,2004,31(1):23-33.  
Zhang Yueqiao, Yang Nong, Meng Hui, et al. Late Cenozoic tectonic deformation history and uplift process of the Panxi region, western Sichuan [J]. Geology in China, 2004,31 (1):23-33 (in Chinese with English abstract).

## Processing method of deep seismic reflection data from the basin-range junction zone on the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau and preliminary geological understanding

WANG Hai-yan<sup>1</sup>, GAO Rui<sup>1</sup>, MA Yong-sheng<sup>2</sup>, ZHU Xuan<sup>2</sup>, LI Qiu-sheng<sup>1</sup>,  
LI Peng-wu<sup>1</sup>, KUANG Zhao-yang<sup>1,3</sup>, LU Zhan-wu<sup>1</sup>

(1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

2. *Southern Exploration & Production Company, Sinopec, Kunming 650021, Yunnan, China;*

3. *No. 6 Geophysical Prospecting Party, East China Petroleum Administration, Sinopec, Nanjing 210007, Jiangxi, China)*

**Abstract:** The basin-range junction zone has complex surface geological conditions and a rather undulate tomography, where deep seismic reflection data are characterized by a low S/N ratio, strong multifold noises and great lateral variation in velocity. According to the characteristics of these deep seismic reflection data, the authors used the ProMAX processing system to make refraction static correction, pre-stack noise attenuation, surface consistent processing, man-machine interactive velocity analysis, residual static correction circulating iterative processing, NMO based on surface and post-stack noise suppression on the 2-D deep seismic reflection data (or called the Sp04-2 profile) across the junction zone of the Zoigê basin and West Qinling orogen and found a set of processing method and flow process suited to the low S/N ratio deep reflection data of the basin-range junction zone. Finally they got the SP04-2 stacked section. The section for the first time reveals the lithospheric structure of the basin-range junction zone of the Zoigê basin and West Qinling orogen and offer a reliable seismologic basis for studying the contact relationships in the deep interior of the basin-range zone.

**Key words:** deep seismic reflection; basin-range junction; data processing; S/N ratio; noise removal

---

**About the first author:** WANG Hai-yan, female, born in 1975, PhD in structural geology, mainly engages in the study of geophysics and tectonics; E-mail: hyanwhy@126.com.