

# 地震相分析在深反射地震勘探资料解释中的应用

刘 葵<sup>1</sup>, 赵文津<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院地质力学所, 北京 100081; 2. 中国地质科学院, 北京 100037)

**摘 要:** 作者对 INDEPTH 项目深反射地震剖面的细致研究发现, 在深反射地震剖面上不仅仅强反射同相轴可以反映地壳深部的结构、构造特征, 而且其上的地震相特征在上、中、下地壳也有一定的差异。通过将地震相分析引入深反射地震勘探的研究中, 可以利用地震相特征的差异对深反射地震剖面进行充分解释, 为深部工作中的地壳结构、构造特征研究提供更丰富、可靠的资料基础。

**关键词:** 深反射地震剖面; 地震相分析

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

## 引言

深反射地震法是 70 年代中期由美国康奈尔大学奥利弗 (Olive) 教授提出的, 为了探测岩石圈深部构造特征开展的一项深探测技术, 目前在许多国家都设立了相应的研究计划和机构, 如美国的 COCORP、英国的 BIRPS、法国的 ECORS、德国的 DEKORP、加拿大的 LITHOPROBE 等。这些工作的开展成功解决了造山带、裂谷和板块缝合带研究中一些重大的大地构造问题。该技术的形成和发展与石油地震勘探技术的发展分不开。在深反射地震勘探资料的处理和分析中沿用了石油勘探技术中的许多手段, 在其剖面的解释上都采用了石油勘探技术中的强反射同相轴的对比和追踪方法。

随着科学技术水平和对资料研究的不断深入, 在二十世纪七十年代末期石油地震勘探领域中地震地层学的出现, 地震相、地震相分析的概念逐渐被认识并被广泛应用<sup>[1-4]</sup>。地震相这一名词出自石油地震勘探技术, 其来源于沉积相。“相”是一定岩层生成时的古地理环境及其物质表现的总和 (Sloss, 1962)<sup>[5]</sup>; 地震相可以理解为沉积相在该地震剖面上表现的总和; Sheriff (1982)<sup>[6]</sup>将地震相定义为: “由沉积环境 (如海相和陆相) 所形成的地震特征”; Vail (1977) 认为地震相分析是根据地震资料来解释环境背景和岩相<sup>[7]</sup>。地震相分析中的一个基本概念是, 地震相是岩相的地震波或声波的响应, 地震相内的反射层代表地层层面、有地层意义的不整合面和可能的流体接触面, 地震相的分析的目的是进行区域地层解释, 确定沉积体系、岩相特征和解释沉积发育史, 最后预测有力的生油区和储集相带。地震相单元和

收稿日期: 2004-12-10

基金项目: 国土资源大调查项目 (编号: 200313000062) 与 INDEPTH III 的部分研究成果。

作者简介: 刘葵 (1968-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事应用地球物理研究; E-mail: xizang@vip.sina.com

地质相单元有着一定的对应关系。由于深部地震勘探工作开展得较少，资料也较有限，目前国内、外还没有将地震相的概念引入到深反射地震勘探的研究中。

本文通过对 INDEPTH 项目在青藏高原南部的深反射地震剖面的细致分析和研究发现，地震相不仅能够反映不同的沉积相特征，而且对地壳的结构构造特征也有良好的反映。

### 1 上、中、下地壳的岩石特征

地壳随着深度的变化其岩性、物性都会发生一定的变化。通常上地壳中存在的岩性有玄武岩、花岗岩、中酸性片岩片麻岩；中地壳主要有中基性片岩片麻岩、麻粒岩、辉长岩；下地壳主要有辉岩、麻粒岩、中基性片麻岩，地幔中发育着二辉橄榄岩、榴辉岩等基性超基性岩。随着深度的变化，岩石的密度存在着一定的变化范围<sup>[8]</sup>（图 1）。由于地壳内岩性、物性的纵向变化，使其在深反射地震剖面上可以看到不同的地震相特征，虽然纵向岩性的变化是渐变的，其相变的特征不明显，在深反射地震剖面上看不到代表相变界面的强反射同相轴，但当地壳受到外力作用在不同方向发生片理化时，在不同方向上可以看到能够对比的地震相特征。

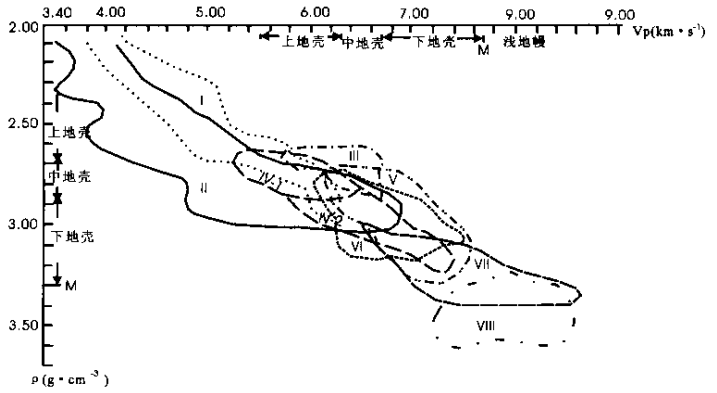


图 1 不同岩石地震波速度与密度的关系（据杨文采，1997）

I-砂岩；II-玄武岩；III-花岗岩；IV-1-中酸性片麻岩；IV-2-中基性片岩片麻岩；V-麻粒岩；VI-辉长岩；VII-橄橄榄岩；VIII-榴辉岩

Fig.1 Relation between the seismic velocity and density of different types of rock (after Yang Wencai, 1997).

I-Sandston; II-Basalt; III-Granite; IV-1-Intermediate-acid gneiss; IV-2-Intermediate-basic gneiss; V-Granulite; VI-Gabbro; VII-Peridotite; VIII-Eclogite

### 2 深反射地震剖面上的地震相特征实例

1992 年开始的中美合作 INDEPTH 项目在青藏高原开展了大规模的深反射地震调查，取得了许多可喜的成绩，如发现了 MHT 的存在，为印度板块俯冲到藏南之下提供了深反射证据<sup>[9-11]</sup>，在雅鲁藏布江北上地壳发现部分熔融层<sup>[12-15]</sup>等。这些结论的发现是在对深反射剖面上的强反射同相轴进行分析和解释的基础上得到的。通过对深反射地震剖面的进一步研究发现，剖面上不同深度、区域的地震相特征也存在一定的差异，这为深入开展深反射地震剖面的解释工作提供了依据。

本文以 1994 年 INDEPTH 项目在念青唐古拉山东侧地堑内取得的多条深反射剖面为例，阐述上、中、下地壳在深反射地震剖面上的地震相特征的差异和其界面划分方法。主要分析的剖面有念青唐古拉山东侧宁中乡南到当雄北取得了五条深反射地震剖面 Tib6、Tib7、Tib8、Tib9、Tib10（其中 Tib6、Tib7、Tib9 等三条为近 SN 并转向 NE—SW 的剖面，转折点在 Tib7 的中部，Tib8、Tib10 为垂直于 Tib7、Tib9 的两条 NW—SE 向横剖面），其工作位置见图 2。由于这些剖面是交叉的剖面并有方向上的变化，给解释工作提供了更多的信息。

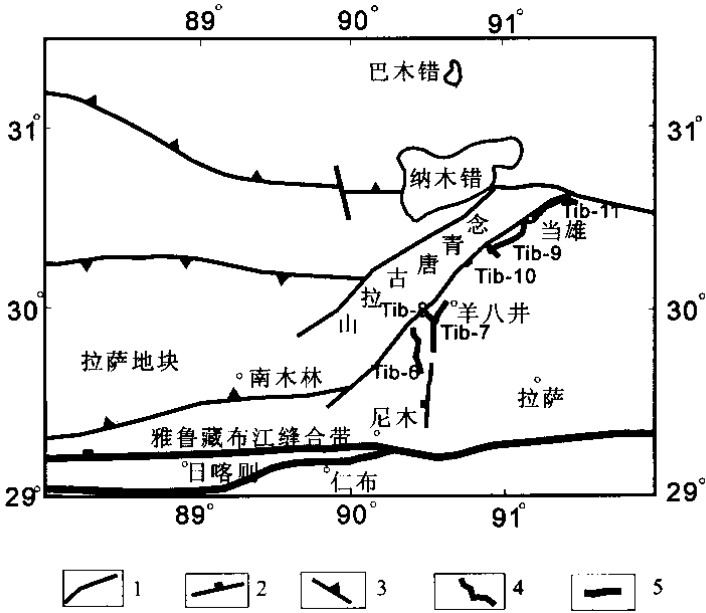


图 2 深反射地震剖面位置图

Fig.2 Location of deep seismic reflection profiles

1. 断层；2. 正断层；3. 逆断层；4. 共中心点叠加剖面；5. 缝合带

从剖面 Tib6、7 (如图 3) 上可以看到，5~7 秒范围内有十分明显的弧形反射同相轴，这一点在 INDEPTH 项目过去的论述中已得到了充分的论述。从剖面总体看，除亮点处出现了强的连续的弧形反射特征外，没有看到其它的连续的强反射同相轴，这并不意味着深部不存在物性界面，而可能是由于深部反射的强度不够没能形成强反射同相轴或由于浅部的亮点反射对其下部的反射产生了屏蔽作用。虽然没有强反射同相轴的出现，但通过对剖面的仔细对比和分析可以看到不同深度的地震相特征的差异。8 秒以上：可以看到明显的亮点反射特征；8~14 秒：看到了明显的向北倾斜的反射同相轴；14 秒附近可以看到近水平的反射同相轴；14~23 秒：看到了明显的向北倾斜的反射同相轴；23 秒以下：没有明显规律的、弱的杂乱反射。通过对与其交叉的深反射地震剖面 TIB8 (图 4) 的分析也可以看到类似的特征：8 秒以上：可以看到明显的亮点反射特征；8~14 秒：出现较明显向西北倾斜的反射同相轴；14~23 秒：出现明显的向东南倾斜的反射同相轴；23 秒以下：没有明显规律的、弱的杂乱反射。通过对不同剖面上的地震相对比可以看到：虽然在 8、14、23 秒附近处没有出现强的反射同相轴，但他们却是不同地震相特征的分界面，也就是说在这些面的上下应该对应着不同的岩相特征。8、14、23 秒双程反射时间对应的深度 (若地壳平均速度为 6.2Km/s) 为 25、43、71 公里，显然它们与上、中、下地壳界面的位置和 Moho 的深度基本一致。

在上述两条剖面北与其相邻的剖面上可以看到相似的特征：Tib9 剖面 (图 5) 上可以看到：5~7 秒 (15~21 公里深) 范围内有明显的亮点反射特征；9~14 (南)~18 (北) 秒范围内 (27~43~54 公里深) 出现多个相交的弧形反射；22.5 秒后没有明显的地震反射特征出现。与 Tib9 剖面垂直的 Tib10 (图 5) 上可以看到：5~7 秒也存在有较明显的亮点反射特征；7~12 秒反射特征不明显；12~13 秒有水平方向的反射同相轴出现，与交叉测线 Tib9 上的强的弧形反射对应；14~22.5 秒出现明显向东南方向倾斜的反射同相轴；14 秒附近有较

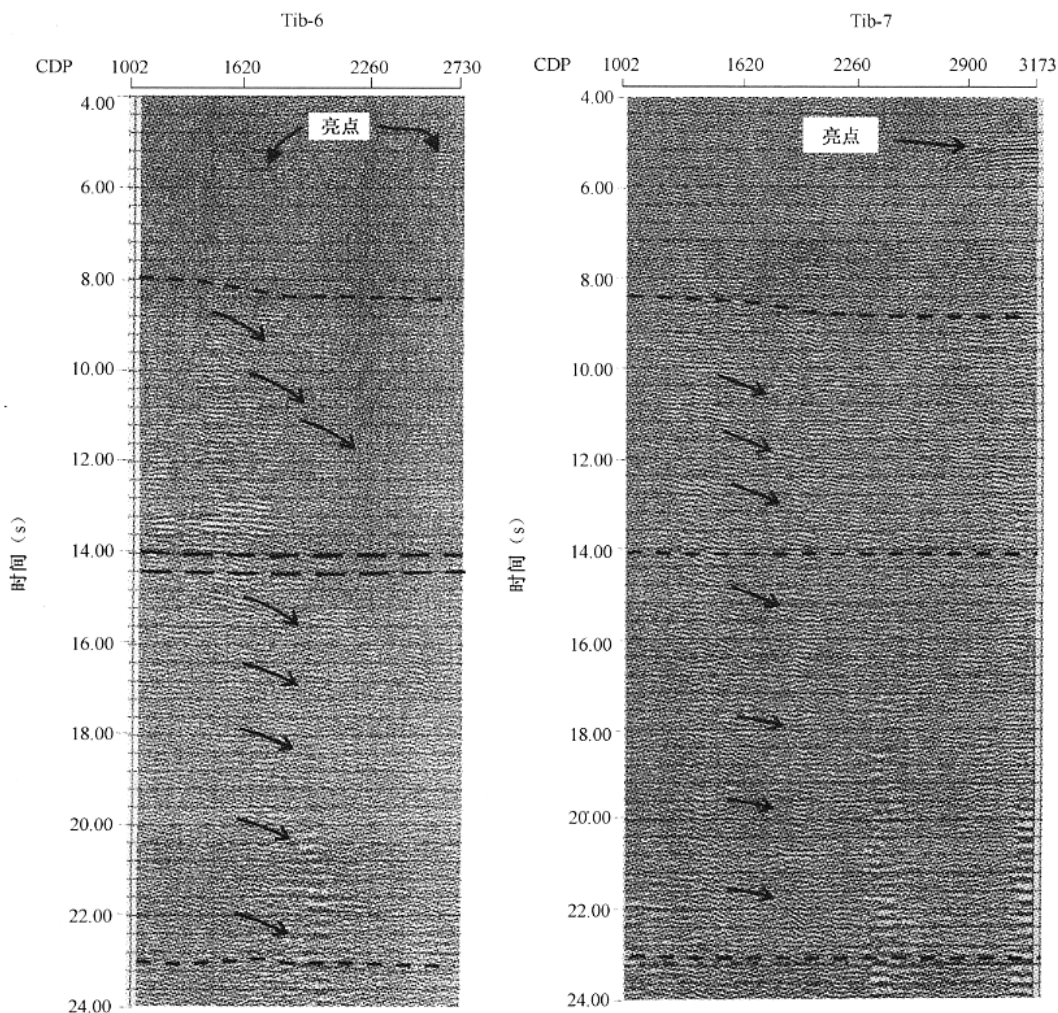


图3 Tib6、Tib7地震反射剖面(未偏移)

Fig.3 Seismic reflection profiles Tib6、Tib7 (not deviated)

连续的水平反射出现；22.5秒后没有明显的地震反射特征出现。经过综合分析认为，虽然在9、14(南)—18(北)22.5秒处没有见到强的反射同相轴，但他们却分隔了不同的地震相特征，通过对这些交叉剖面相应层的对比，基本可以断定这些相界面就是上、中、下地壳及Moho层的界面。

### 3 讨论

深反射地震法是针对岩石圈探测开展的人工地震方法，由于它探测深度大，要求的反射能量大，在野外施工和室内处理时都有其独特之处，但其接受的信息都是来自地下的反射波，其反映的结果都代表了地下的物质特征。地壳深部同样存在着岩石物性的差异，石油地震勘探中地震地层学的地震相分析方法同样适用于深反射地震剖面的解释工作。当地壳内岩性、物性的纵向变化不明显时，在深反射地震剖面上看到的地震相的相变特征不明显，但当

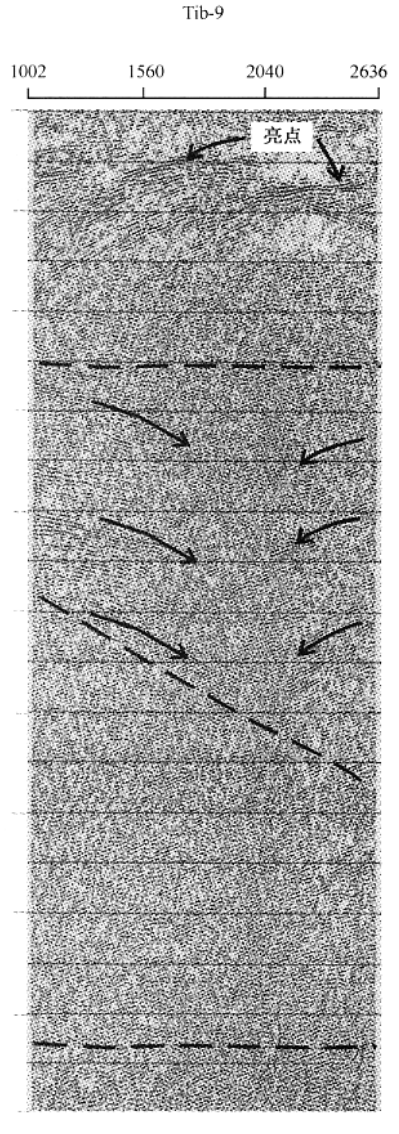
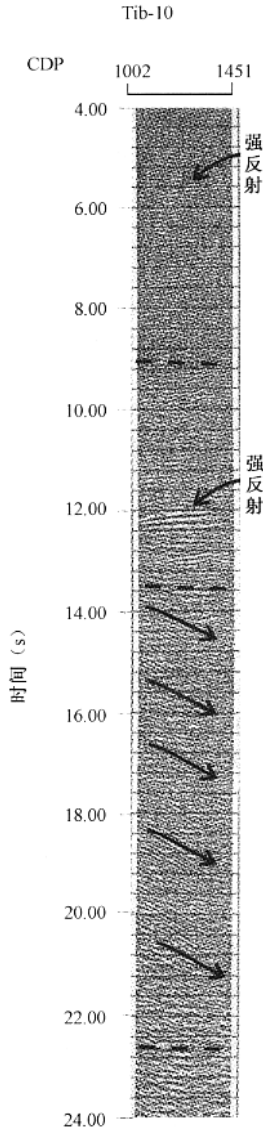
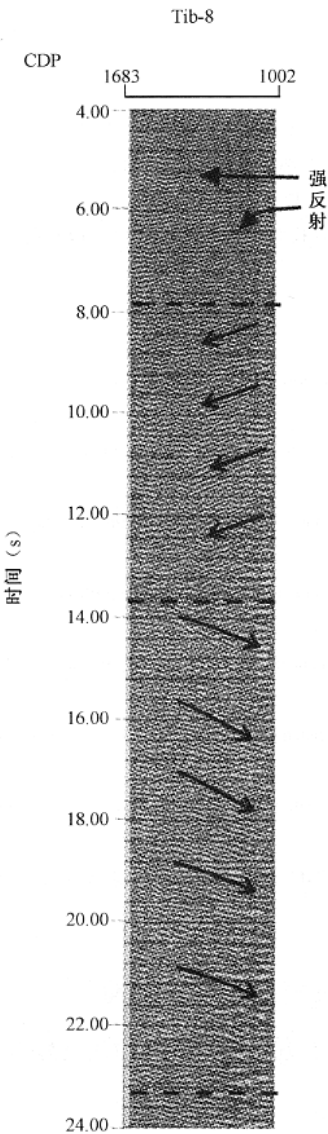


图 4 Tib8 地震反射剖面 (未偏移)

Fig.4 Seismic reflection profiles Tib8 (not deviated)

图 5 Tib9、10 地震反射剖面 (未偏移)

Fig.5 Seismic reflection profiles Tib9 and Tib10 (not deviated)

地壳受外力作用上、中、下地壳有一定的形变时，其地震相特征也会发生相应的变化。这种地震相特征的变化通常并不十分明显，需要反复对比相应的纵、横剖面才能做出判断。由于深反射地震资料有限，在不同地区的地震相特征对比分析还需进一步研究。

### 4 结论

就目前的分析结果看，上、中、下地壳存在着不同的地震相特征，尤其是地壳有一定形变的地区，由于物质组成的差异造成形变的较大差异，地震相特征差异也较大。通过地震相特征的差异来划分上、中、下地壳以及壳内的特殊异常体是一个可以深入探究的方法。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 徐怀大, 王石凤, 陈开远. 地震地层学解释基础 [ M ]. 北京: 中国地质大学出版社, 1990.
- [ 2 ] 佩顿, C. E., 牛毓荃. 地震地层学 (在油气勘探中的应用) [ M ]. 北京: 石油工业出版社, 1980.
- [ 3 ] 纪友亮, 张世奇, 张宏. 层序地层学原理及层序成因机制模式 [ M ]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [ 4 ] 刘葵, 等. 地震勘探技术在地震地层学中的应用及存在的问题 [ J ]. 长春科技大学学报, 1998, 28 (增刊): 30 ~ 36.
- [ 5 ] Sloss L. L. Stratigraphic models in exploration. AAPG Bull, 1962, (46).
- [ 6 ] Sheriff R. E. Structural interpretation of seismic data, AAPG, 1982.
- [ 7 ] Vail P. R. Seismic recognition of depositional facies on slopes and rises. AAPG Bulletin, 1977, 61 (5): 837.
- [ 8 ] 杨文采. 应用地震层析成像 [ M ]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [ 9 ] Zhao Wenjin, Mechie J., Guo J. et al. Seismic mapping of crustal structures beneath the Indus-Yarlung suture, Tibet [ J ]. Terra Nova, 1997, 9 (1): 42 ~ 46.
- [ 10 ] Zhao Wenjin, Nelson K. D., Meissner R. Advances of INDEPTH-A deep profiling study in Tibet and the Himalayas [ J ]. Episodes, 1997, 20 (4): 266 ~ 272.
- [ 11 ] Zhao Wenjin, Nelson K. D., Project INDEPTH Team. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet [ J ]. Nature, 1993, 366: 557 ~ 559.
- [ 12 ] Nelson K. D., Zhao Wenjin, Brown L. D. et al. Partially molten middle crust beneath Southern Tibet: Synthesis of Project INDEPTH results [ J ]. Science, 1996, 274 (6): 1684 ~ 1688.
- [ 13 ] Brown L. D., Zhao Wenjin, Nelson K. D. et al. Bright spots, structure, and magmatism in southern Tibet from INDEPTH seismic reflection profiling [ J ]. Science, 1996, 274 (6): 1688 ~ 1690.
- [ 14 ] Makovsky Y., Klemperer S. L., Ratschbacher L. et al. INDEPTH wide-angle reflection observation of P-wave conversion from crustal bright spots in Tibet [ J ]. Science, 1996, 274 (6): 1690 ~ 1691.
- [ 15 ] 赵文津、赵逊、史大年、刘葵, 等, 喜马拉雅和青藏高原深剖面 (INDEPTH) 研究进展 [ J ]. 地质通报, 2002, 21 (11): 691 ~ 700.

## APPLICATION OF SEISMIC PHASE ANALYSIS IN THE INTERPRETATION OF DEEP SEISMIC REFLECTION DATA

LIU Kui<sup>1</sup>, ZHAO Wen-jin<sup>2</sup>

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

**Abstract:** By a meticulous study of INDEPTH deep seismic reflection profiles, the authors found that not only the strong reflection line-ups of the deep seismic reflection profiles may reflect the structure of the deep interior of the crust but also the seismic phases in the upper, middle and lower crust have somewhat different features. By applying the seismic phase analysis in the study of deep seismic reflection exploration, we may use the difference in seismic phase features to interpret the deep reflection seismic profiles sufficiently, and thus more abundant and reliable materials may be provided for the study of the crustal structure.

**Key words:** deep reflection seismic profile; seismic phase analysis