

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

## 褶皱的地震波反射响应及其大陆地壳构造地质意义

嵇少丞<sup>1,2)</sup>, 龙长兴<sup>3)</sup>, 夏斌<sup>2)</sup>

1) 加拿大蒙特利尔综合工学院民用、地质与采矿工程系, 蒙特利尔, H3C 3A7

2) 中国科学院广州地球化学研究所边缘海地质重点实验室, 510640

3) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081

**内容提要:**褶皱是挤压造山带中最普遍的地质构造,但是为什么在地震反射剖面上却极少呈现褶皱呢?本文从一个构造地质学者的角度出发,数值模拟了几种常见褶皱构造的地震波反射响应。结果表明,传统的反射地震技术并不能正确成像闭合褶皱、斜歪或倒转褶皱及二级以上的多级复合褶皱。褶皱陡倾翼的反射消失,而褶皱转折端的反射形成一系列断断续续分布的假水平层理,这些假水平层理在下地壳中极易被错误地解释成由地壳拉张形成的水平构造层理或由底侵作用形成的水平基性岩席。笔者认为,老、中、新褶皱造山带的下地壳中大多数不连续水平反射可能是由褶皱造成的。

**关键词:** 褶皱;地震波反射;挤压造山带;大陆地壳;构造变形

人类通过探测波速和波反射组构随深度的变化以了解地壳的结构和成分。在过去30年里,世界各大陆已积累了大量的地震波反射剖面资料,例如美国的COCORP计划,加拿大的LITHOPROBE计划,法国的ECORS计划以及英国的BIRPS计划(Meissner et al., 1991; Pfiffner et al., 1991; Martignole and Calvert, 1996; Cook et al., 1999)。然而由于地震波反射技术自身的多种局限性,例如近地表现象、多反射、有限频率效应、倾斜构造、波速的横向变化或者与数据采集和处理相关联的客观限制因素,变质岩区地震波反射剖面的构造地质解释目前尚面临许多困难,甚至还有被错误解释的潜伏危险。虽然上述技术上的局限性可通过三维叠前深度偏移地震波成像予以克服,然而迄今为止昂贵的三维地震波成像技术还仅用于圈定浅部地壳的油气构造,绝大多数地区高质量的三维地震成像尚不存在。本文的目的就是要从一个构造地质学者的角度分析变形地区几种常见褶皱构造的地震波反射响应,并特别强调如果不了解人工地震方法的局限性就极可能会导致对挤压造山带地震波反射剖面的错误解释。

褶皱是岩石受力发生的弯曲变形,其形状千姿

百态、复杂多变。褶皱可以出现在不同的尺度(从手标本到整个山系)和不同年龄(从太古宙到新生代)的岩石之中(Burg et al., 1994; Pfiffner et al., 2000)。例如,在中国大陆科学钻探(CCSN)所在的苏北连云港市东海县毛北地区,超高压榴辉岩、超镁铁岩及其长英质片麻岩围岩等在其深俯冲及其后折返过程中皆经历了强烈的褶皱作用,形成一系列轴面往SE倾斜的倒转褶皱(许志琴等, 2004)。然而,这些无论在地表还是在钻孔都客观存在的褶皱在地震反射剖面上(杨文采等, 2004)却并不呈现,这是为什么?研究褶皱构造的地震波响应对于从地质和构造角度正确解释地震波反射剖面尤为重要,有必要回答下列问题:具复杂几何形态的褶皱是否能被传统的反射地震方法正确地成像?如果不能,褶皱构造的地震波反射响应与其几何形态、对称性、轴面定向以及紧闭程度或翼间角之间关系如何?虽然变质岩地区褶皱构造非常常见,而其地震反射剖面上却往往见不到褶皱构造,其原因何在?褶皱构造是否是地壳反射剖面上常见的断断续续的水平反射的真正成因?为了回答上述问题,我们数值模拟了多层褶皱的地震波反射响应,其结果将有助于制约大陆特别是变质岩地区的反射资料的正确解释。

注:本文为中国国家杰出青年科学基金(B类)、科技部973项目(编号2003CB716500)、中国科学院杰出海外青年学者基金和加拿大自然科学和工程研究基金联合资助的成果。

收稿日期:2006-02-11;改回日期:2006-10-20;责任编辑:郝梓国。

作者简介:嵇少丞,男,1960年生。留法博士,加拿大蒙特利尔综合工学院教授,中国科学院广州地球化学研究所和中国国土资源部大陆动力学实验室客座教授,主要从事地球材料流变学、岩石物理和深部构造方面的研究。Email: sj@polymtl.ca。

## 1 方法

褶皱构造地震波响应的常见研究方法有两种,一是对人造物理模型直接进行超声波实测(Melia and Carlson, 1984; McDonald et al., 1983)。物理模型通常由两种不同波速和密度的介质构成(例如玻璃和环氧树脂胶),模型的形状和尺度必须适应于实验室测量。为简单起见,每一介质必须为弹性各向同性体,这样才能保证检测到的波反射确实是由褶皱层界面而不是材料的各向异性造成。为了调查褶皱的地震波响应,需要制作一系列含不同材料体积分数、层厚、褶皱形态和空间分布样式的物理模型,但在模型制作的技术上还存在许多困难,特别是层间相互粘合以及如何消除层内和层间气孔的问题。另外,虽然从理论上说这类实验无需在高围压环境中进行,但是施加适当的围压(例如10~20MPa)将有助于保持不同介质层之间的紧密接触,提高波信号的质量。总之,物理模拟不仅费钱而且费时。

褶皱构造地震波响应的第二种研究方法是数值模拟。本研究使用 INSIGHT 软件包并采用 Kirchhoff 方法对褶皱构造的地震反射进行二维模拟。INSIGHT 软件包是由 ITA (Inverse Theory and Applications, Inc.) 公司研制开发的大型商业化软件,已被加拿大 LITHOPROBE 国家计划广泛应用于人工地震资料的处理和模拟(Long and Salisbury, 1996; Ji et al., 1997)。由于褶皱形态千姿百态,不可能对每一种可能形态的褶皱一一予以模拟,本研究仅对4种常见类型褶皱进行了详细研究,这4种褶皱分别是直立开阔褶皱(图1a),直立闭合褶皱(图1b),斜歪不对称褶皱(图1c)和二级复式褶皱(图1d)。所谓复式褶皱即是一级大褶皱中又包含了许多次一级小褶皱。每一种地质模型都是由三个均匀的、各向同性的并具高波阻抗的褶皱弯曲层包含在各向同性并具低波阻抗的均匀介质之中。为了模拟变质岩中常见的褶皱构造,我们假说高波阻抗层为角闪岩, $V_p=6.6\text{km/s}$ ,  $\rho=2.9\text{g/cm}^3$ ;低

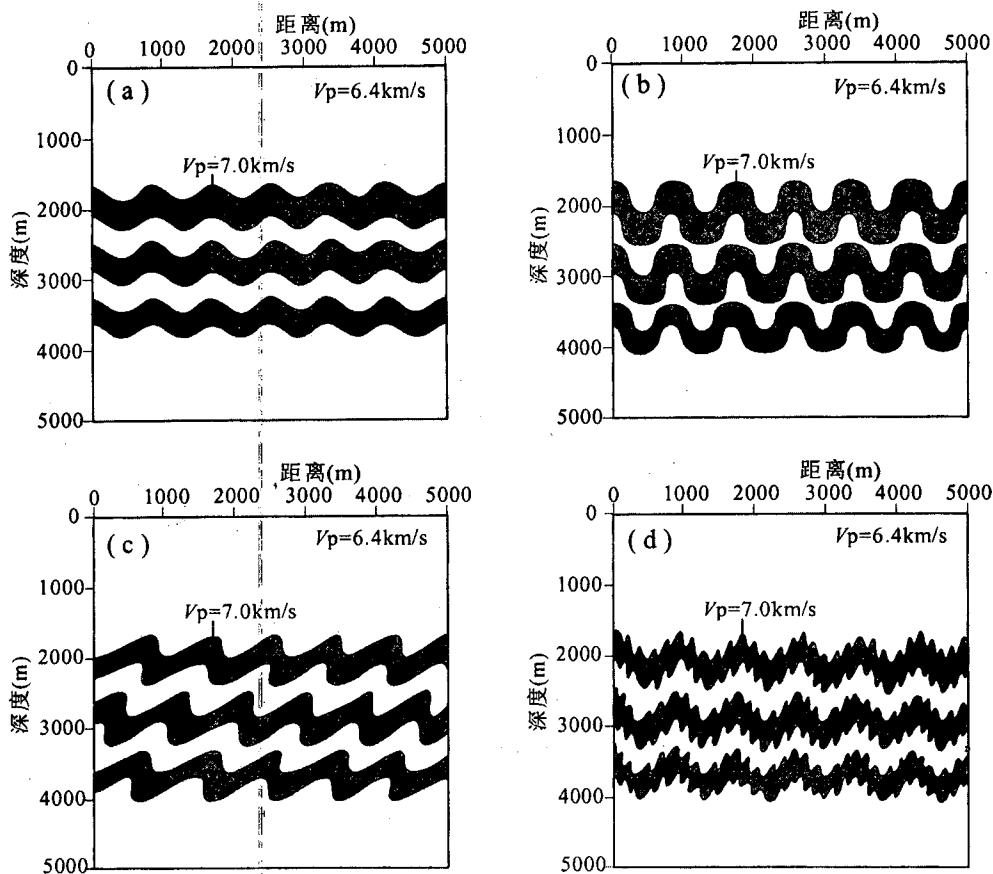


图1 数值模拟4种类型的褶皱构造

Fig. 1 Four types of folds studied by numerical modeling

(a)一直立开阔褶皱;(b)一直立闭合褶皱;(c)一斜歪不对称褶皱;(d)一二级复式褶皱

(a)—Up-right open folds; (b)—up-right close folds; (c)—inclined asymmetrical folds; (d)—multi-order folds

波阻抗介质是花岗片麻岩,  $V_p = 6.1 \text{ km/s}$ ,  $\rho = 2.6 \text{ g/cm}^3$ , 这些值对应于角闪岩和花岗片麻岩在 100 MPa 围压下的平均 P 波速度和密度 (Ji et al., 2002)。必须指出, 介质间波阻抗衬度的取值在本模拟中并非十分重要, 因为该研究的目的是褶皱几何形态的成像而不是反射的绝对强度。反射剖面垂直于褶皱轴, 地质模型定为 5km 宽, 5km 深。3 个褶皱弯曲层位于模型中间。褶皱的波长约 850m, 波幅随褶皱类型而异。接收道间距为 25m, 震动频率为 100 Hz, 地震波成像采用 Kirchhoff 叠前时间偏移方法。与有限差分偏移方法相比, Kirchhoff 偏移方法不仅具有较高的计算效率, 而且适用于高倾岩层的反射。迄今为止, 世界上大多数地壳规模的二维地震反射剖面都是采用 Kirchhoff 叠前时间偏移方法。虽然 Kirchhoff 叠前深度偏移方法已经被石油勘探公司成功地用于浅部地壳油气田三维地震反射成像, 但用于地壳深反射资料处理尚有许多有待克服的困难 (Bouzidi et al., 2002)。

## 2 结果

现将 4 种常见褶皱即直立开阔褶皱、直立闭合褶皱、斜歪不对称褶皱和二级复式褶皱的模拟结果展示于图 2~5。每一种褶皱的偏移校正前后的反射剖面同时给出。显而易见, 未偏移校正的反射剖面和输入的物理模型截然不同, 说明从未偏移校正的反射剖面不可能得出任何关于褶皱几何形态的正确信息。所以, 以未偏移校正的反射剖面为基础的任何地质解释 (Calvert and Clowes, 1990; Varsek and Cook, 1991; Pfiffner et al., 1991) 仅仅是猜测而已, 不可避免会出错。比较偏移校正后的反射剖面和输入的物理模型将得出这些褶皱的垂直反射特征。对于直立开阔褶皱来说 (图 2b), 仅是最上弯曲层的界面能够被反射地震方法正确成像, 下面几个弯曲层在偏移校正剖面上呈一系列侧向短反射。直立闭合褶皱的几何形态在偏移校正剖面上不能正确地成像, 陡倾两翼的反射信息彻底消灭, 褶皱转折端即脊部和槽部形成一系列半连续的水平或近水平的反射 (图 3b)。深部褶皱层的成像准确性总是比浅部的差得多。对于斜歪非对称褶皱, 陡立的褶皱翼在反射剖面上成不了像, 而缓倾翼却形成一系列不连续的倾斜反射 (图 4b)。对于二级复式褶皱, 偏移校正剖面和输入的地质模型面貌截然不同。模拟结果说明, 地震反射剖面根本不可能正确地反映出地壳特别是深部地壳中褶皱的几何形态, 所以地震深反射时间剖

面的地质解释必然非常粗糙, 很难准确与客观。

## 3 讨论

反射地震目前已成为透视大陆地壳深部构造最重要的方法。过去 30 年来, 来自世界各大陆大量的反射地震资料已更新了人们对于大陆成分、构造和演化的认识 (Yang Wencai, 2002; Martignole and Calvert, 1996; Cook et al., 1999; Klemperer and BIRPS Group, 1987), 其中最重要的贡献可能要数深部地壳高反射层以及在不同构造域存在不同反射样式的发现。在年轻的拉张的中下地壳中, 通常出现近水平的多层强反射, 而莫霍面之下的上地幔中却无反射。在挤压造山带的地壳中, 反射样式以逆掩推覆和楔状为主, 形态较复杂 (Meissner et al., 1991)。前寒武纪地区的中下地壳也以明显的近水平、侧向不连续的反射为主。

有关下地壳中近水平、不连续反射层的成因, 目前有 3 种解释 (Warner, 1990): ①流体说, 认为下地壳中存在水平延展的层状孔隙, 而且被流体充填 (Klemperer and BIRPS Group, 1987; Holbrook et al., 1991); ②剪切带说, 认为反射层对应于近水平的韧性剪切带或糜棱岩层 (Passchier, 1986; Holbrook et al., 1991; Ji et al., 1993; Ji et al., 1997); ③基性岩席说, 认为上地幔部分熔融的基性岩浆在下地壳中作水平层状侵入, 从而形成反射 (Deemer and Hurich, 1994; McBride et al., 2004)。然而, 目前仍是众说纷纭, 莫衷一是。流体虽然可能局部存在, 但不可能在整个下地壳到处分布, 例如下地壳麻粒岩就几乎不含什么流体。底侵作用 (Underplating) 主要发生在拉张地区如大陆裂谷和火山陆缘的下地壳内, 所以并不适合于解释挤压褶皱造山带深部地壳的地震波反射。由于一些地质工作者过于简单地将偏移校正后的时间反射剖面直接对等于地质深度剖面, 地震波反射剖面的详细构造解析迄今尚未引起足够的重视, 甚至经常被完全忽略。例如近水平不连续反射层往往被简单地解释成近水平延展的高波阻抗体或构造层理 (例如, Pfiffner et al., 1991)。然而, 这样的解释至少会遇到两个困难。第一, 在碰撞挤压造山带内很难将近水平半连续反射层归之于上述成因, 因为水平构造层理正是地壳强烈拉张的结果 (Rey, 1993); 第二, 由于波离散、干涉以及勘探几何的局限性 (例如勘探线的有限长度), 反射地震法并不能使复杂地质构造正确成像 (Drummond et al., 2004)。所以, 反射剖面上所

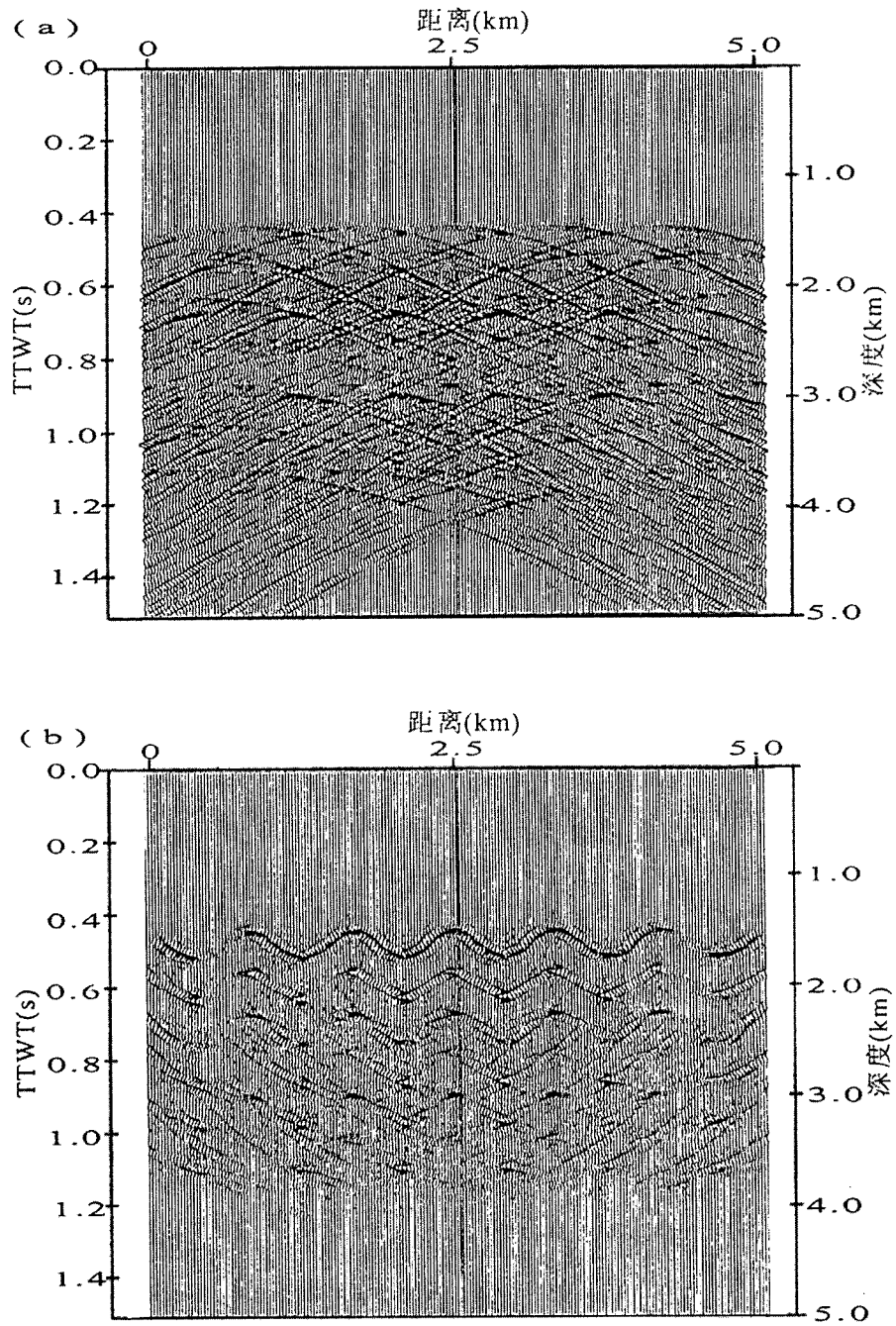


图 2 图1a 所示的直立开阔褶皱的未偏移校正(a)和偏移校正(b)反射地震剖面  
Fig. 2 Unmigrated (a) and migrated (b) seismic sections for up-right open folds shown in Fig. 1a  
TTWT—往返走时  
TTWT—Two-way travel time

反映出的纹理并不一定意味着地壳深处真的存在什么层状构造,问题是这些貌似水平层理的反射层是否由其它什么地质构造形成?

褶皱可能是地壳中最普遍的地质构造,因为相当大一部分构造缩短是通过岩层的褶皱弯曲吸收掉

的。在挤压造山带中,褶皱可以说是无处不在,其规模(波长和波幅)可大到十几千米,也可小到手标本甚至显微薄片内都能见到。褶皱既可以出现在近地表的沉积岩中,也可以出现在下地壳的高级变质岩中;既可以由简单剪切也可以由纯剪切而成。褶皱形

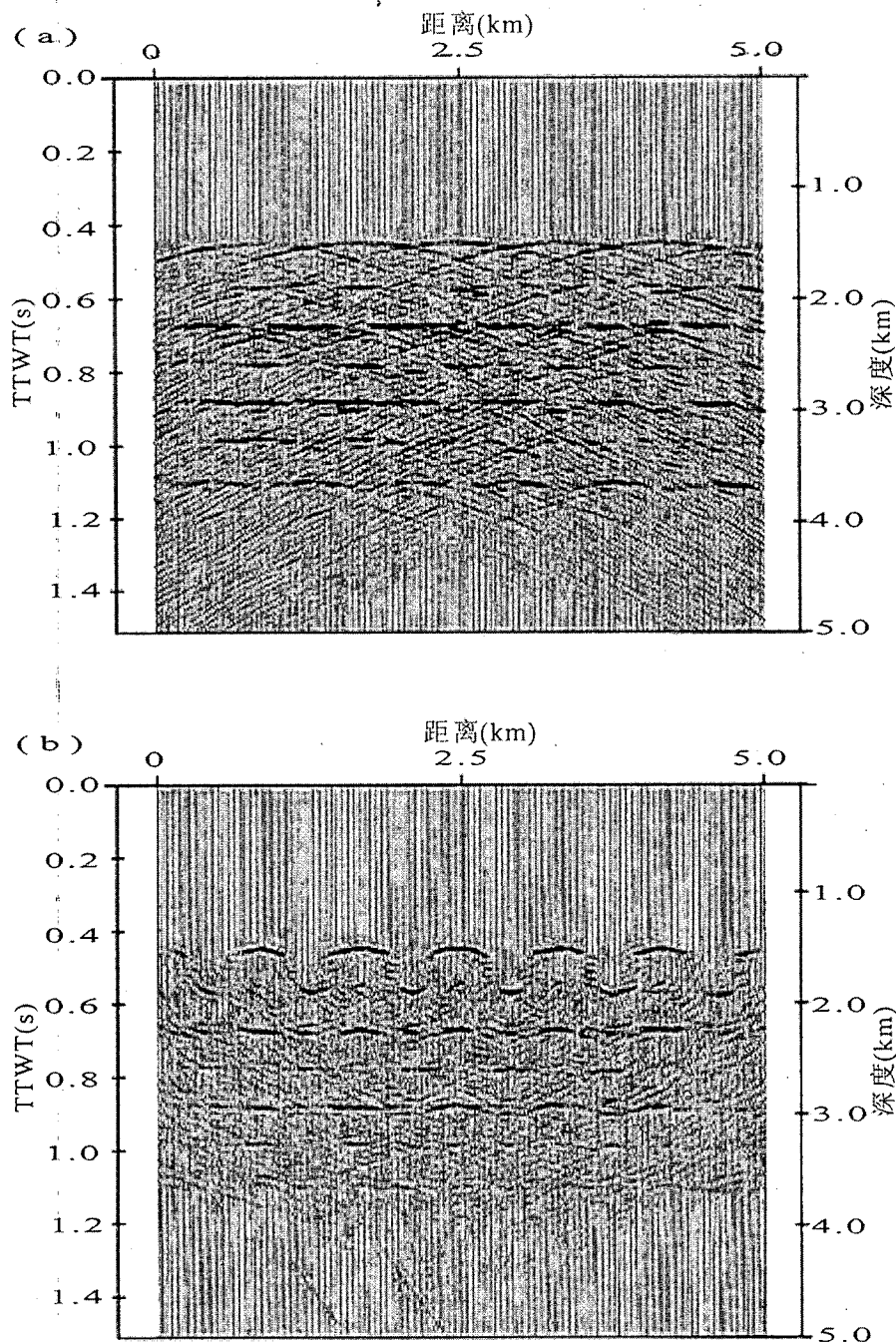


图 3 图 1b 所示的直立闭合褶皱的未偏移校正 (a) 和偏移校正 (b) 反射地震剖面

Fig. 3 Unmigrated (a) and migrated (b) seismic sections for up-right close folds shown in Fig. 1b

TTWT—往返走时

TTWT—Two-way travel time

态更是千姿百态,随轴面和两翼产状的变化,褶皱从直立、斜歪,经倒转到平卧;随应变增加从平缓褶皱和开阔褶皱,经闭合褶皱再到紧闭褶皱和等斜褶皱。在挤压造山带中褶皱往往成串出现,大小复合,形成复背斜、复向斜交互出现,呈连续波状布满全区,如

我国秦岭、天山和欧洲的阿尔卑斯山、北美的阿巴拉契亚山等造山带中就以这种样式的褶皱为主。但是为什么在大陆地壳的地震波反射剖面上却很少看到褶皱呢?褶皱是最普遍的构造现象,在反射剖面的构造解释中必须要考虑到其影响。所以褶皱反射响应

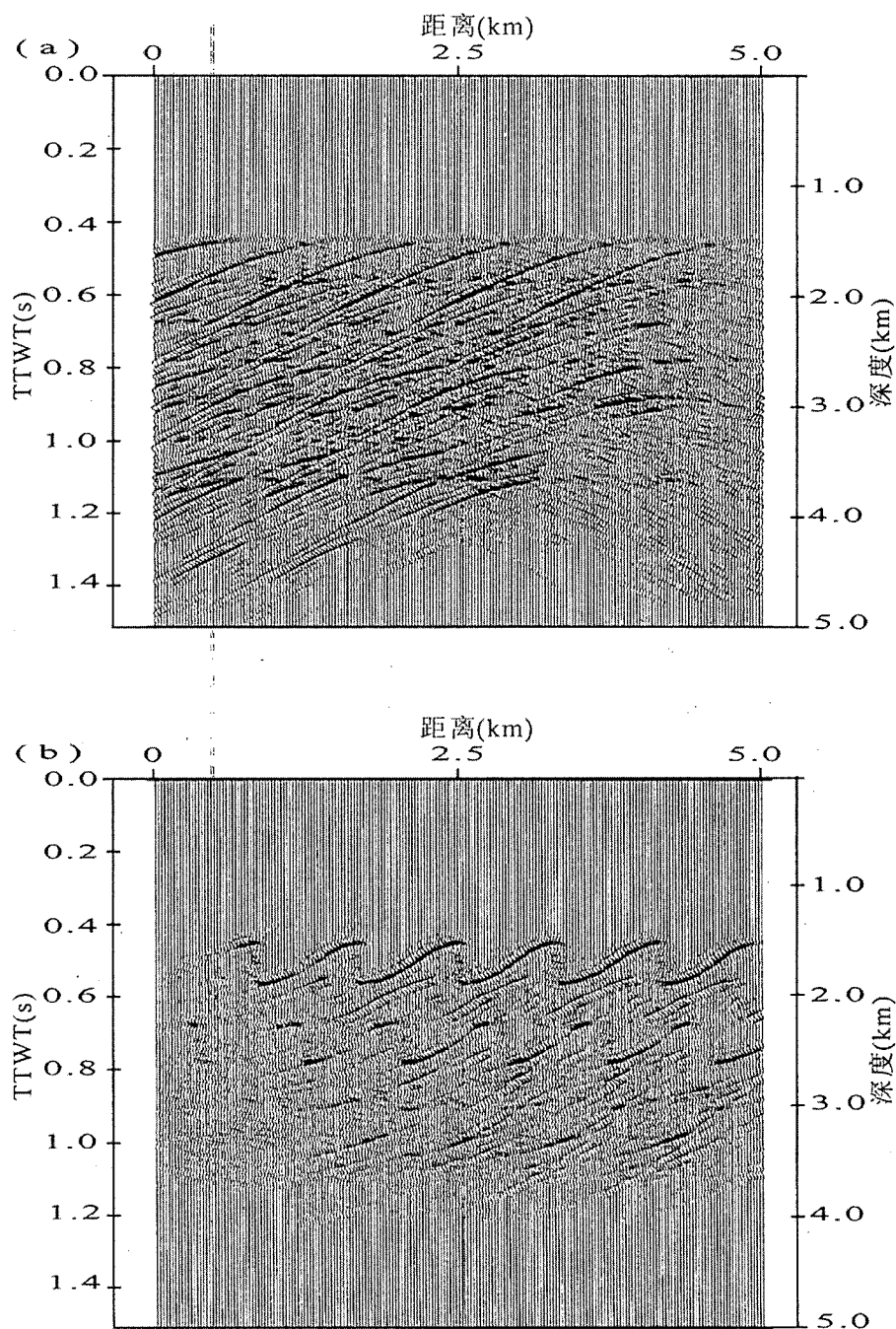


图 4 图 1c 所示的斜歪不对称褶皱的未偏移校正 (a) 和偏移校正 (b) 反射地震剖面

Fig. 4 Unmigrated (a) and migrated (b) seismic sections for inclined asymmetrical folds shown in Fig. 1c

TWTT—往返走时

TWTT—Two-way travel time

的详尽研究必将为利用人工地震方法调查地壳变形特征和构造演化提供新的思路。

二维地震反射模拟表示,多级复式褶皱、闭合或紧闭褶皱、斜歪褶皱和倒转褶皱的几何形态都不可能传统的反射地震方法正确成像,褶皱两翼岩层

的反射信息丢失,在剖面上仅留下转折端即脊部和槽部的反射信息,构成断断续续的假水平反射层。由于在反射剖面上的形态与褶皱本来面貌截然不同,这些反射很容易被错误解释为水平产状的成分层或构造层理。显而易见,连续的复式褶皱层边界为深部

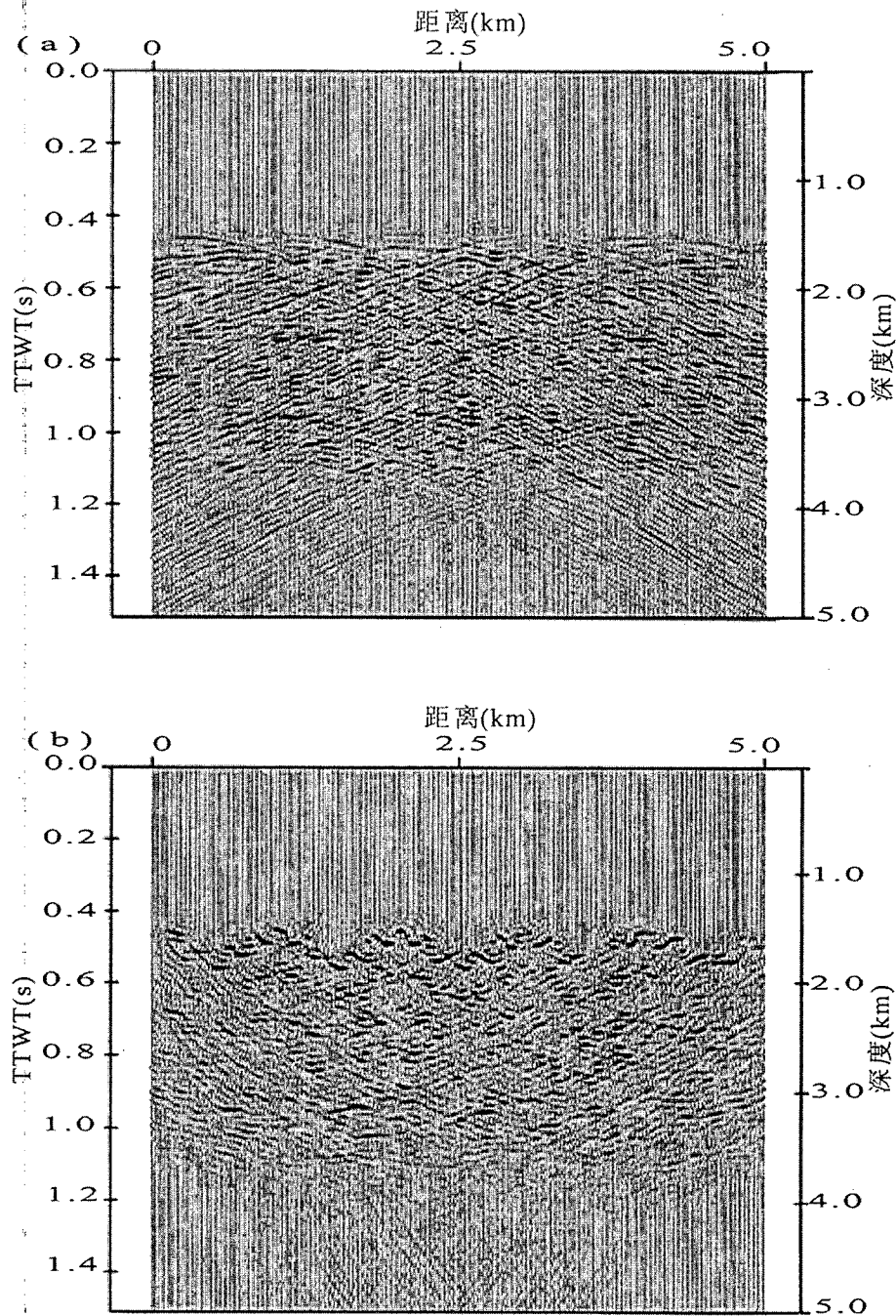


图 5 图 1d 所示的二级复式褶皱的未偏移校正 (a) 和偏移校正 (b) 反射地震剖面  
Fig. 5 Unmigrated (a) and migrated (b) seismic sections for multi-order folds shown in Fig. 1d

TTWT—往返走时

TTWT—Two-way travel time

地壳断断续续的水平反射提供了一种新的解释。必须指出,在实际的深反射剖面上,深部地壳的真实波速并不确知,使用标准的偏移方法常常并不能获得令人满意的结果。例如,对于同一个时间剖面使用不同的尝试波速,可得到截然不同的深度剖面 (Damotte, 1993)。此外,反射地震的侧向分辨率在下

地壳的深度范围内不会小于几千米。所以,褶皱几何形态从地震反射剖面上会完全消失。同理,变形岩石中复杂复式褶皱的地震反射一直被忽视或错误解释。

不同岩性具有不同的流动强度和变形行为,在应力作用下各层弯曲形态明显不同,不再呈有规律

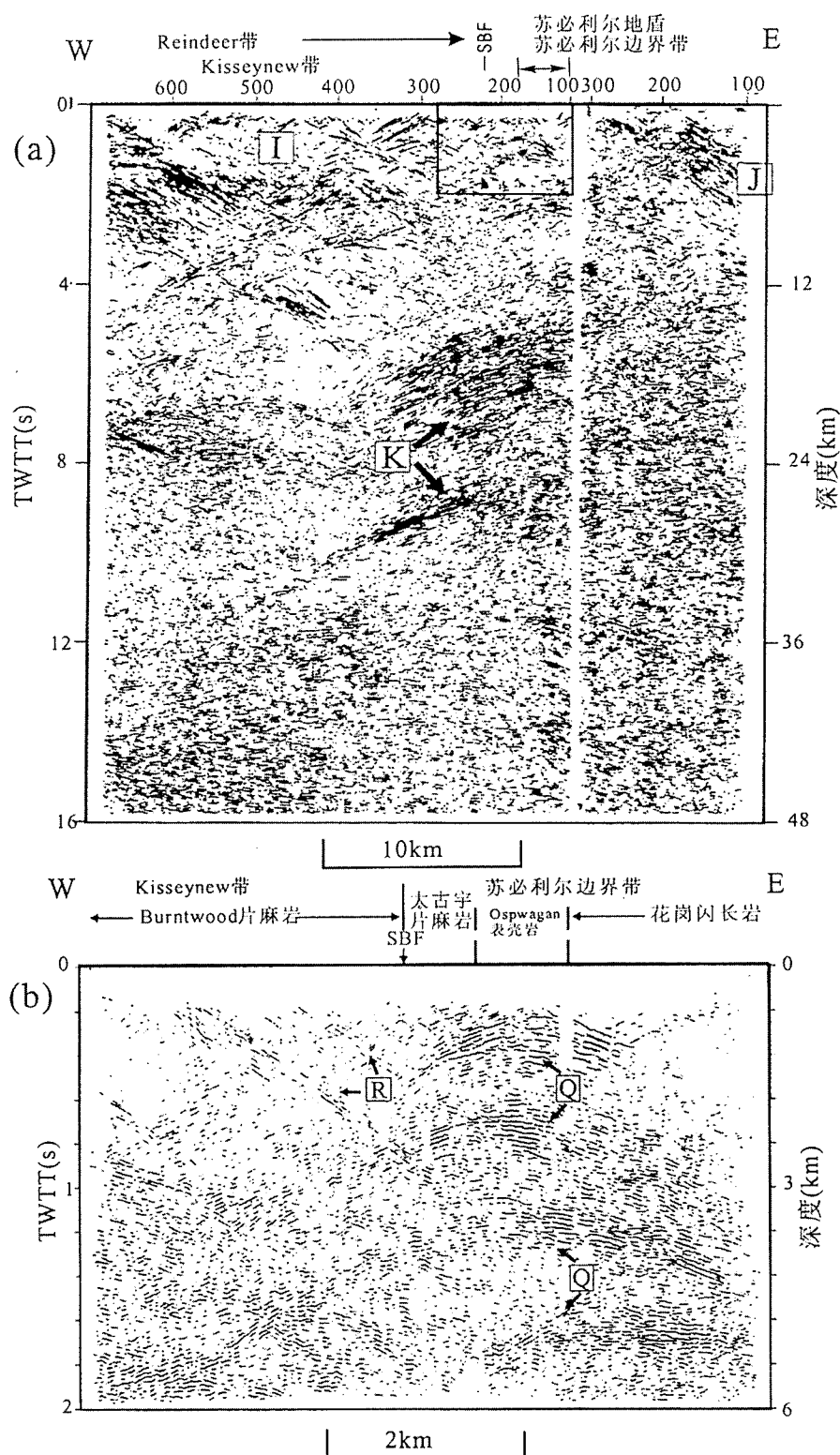


图 6 横跨加拿大 Manitoba 省北部 Sask 和 Superior 地盾之间碰撞造山带的反射地震剖面  
Fig. 6 Merged seismic reflection images for the collision belt between the Sask and Superior cratons in northern Manitoba, Canada

(a) 中的长方形框表示 (b) 所示的高分辨率地震成像的具体位置。SBF 为 Superior 边界断裂, BZ 是边界带, 其他符号说明见正文  
The rectangle in (a) indicates location of the corresponding high-resolution data shown in (b). Labels are referred to in the text. SBF is the Superior Boundary Fault, and BZ is boundary zone

的渐变过渡关系,从而形成不协调褶皱。当这些不同强度不同厚度的岩石互层出现时,褶皱会变得异常复杂。厚度大的强岩层以弯滑和横弯作用为主,形成等厚褶皱,并伴有脆性断裂作用;而夹在强岩层之间的弱岩层以弯流和柔流作用为主,弱岩层还会从褶皱翼部流向褶皱转折端或其它虚脱位置,进一步形成形态非常复杂的次级褶皱。不协调褶皱常见于中高级变质岩,所以流行于中下地壳。一般来说,岩石流变强度和波速呈正相关,流动强度高的岩石其波速亦高(Ji et al., 2002)。大尺度的不协调褶皱可能形成地震反射剖面上相互交插的楔状反射。

在变质岩区常见叠加褶皱,即已经褶皱的岩层再次弯曲变形而形成形态更加复杂的褶皱。叠加褶皱可以是同一递进变形过程中不同构造变形事件的褶皱相互叠加的结果,也可以是两个或两个以上毫不相干的构造旋回的褶皱相互叠加的结果。大尺度的叠加褶皱必然会形成复杂的地震波反射样式。此外,大规模的非对称的平卧褶皱、翻卷褶皱、尖棱或膝折褶皱也会产生楔状或双重构造状反射样式。

在大陆地壳内部,褶皱的几何形态和对称性、规模和空间分布样式受控于构造环境、物理条件(温度、应变率、应力大小与作用方式)以及褶皱岩层的力学性能。如果我们确定了各种类型褶皱的地震反射响应,我们就可以利用反射地震方法调查地下构造和地壳内部变形特征。

图6a所示的是横跨加拿大 Manitoba 省太古宙 Sask 和苏比利尔地盾陆陆碰撞带的一条 LITHOPROBE 地震反射剖面(White et al., 1999),该碰撞出现在1.88~1.72Ga 之间,在北美被称之为哈德森造山运动。该剖面从 Kisseynew 带穿过苏比利尔边界断裂,然后进到苏比利尔边界带。图6b 是苏比利尔边界带上部地壳(<6 km 深)的高分辨反射成像。将反射剖面对照地表地质(Bleeker, 1990)进行解析,可以看出在苏比利尔边界带中那些水平和微弯上拱的弧形反射(Q)可以一直延伸到大约6 km 深,Q 反射最可能是由层状岩石的复杂褶皱所致。中等角度向东倾斜的反射(R)既可能是由剪切带也可以是由非对称的倒转褶皱串所致,后者指示东盘向上的韧性剪切,与地表地质观察完全吻合。如图6a 所示,苏比利尔边界带的中地壳,即12~30 km 深度区间内,以西倾的反射为主。因为位于苏比利尔地盾和 Reindeer 带之间的边界带在哈德森造山运动过程中向苏比利尔地盾方向逆掩推覆,中地壳的这些向西倾斜的反射的成因既可能是非对称倒转褶

皱串,也可以是不同岩性互层的推覆剪切带。下地壳反射呈水平状,但作断断续续分布。据 White 等.(1999)研究,莫霍面出现在往返走时15s 处,如果取地壳的平均 P 波波速为6.6km/s,则整个地壳厚度就有49.5km。这些断断续续的近水平反射极可能是由具复杂形态的多级复式褶皱造成的。

## 4 结论

作者数值模拟了几种常见类型褶皱的地震波反射响应,这些褶皱包括直立开阔褶皱、直立闭合褶皱、斜歪不对称褶皱和多级复式褶皱。模拟结果表明,传统反射地震技术并不能正确成像闭合褶皱、倒转褶皱和复式褶皱。褶皱陡倾翼的反射明显消失,而褶皱转折端的反射却形成一系列断断续续的假水平层。这样的反射图像和褶皱的本来面貌风马牛不相及,却貌似水平层理的特征。出现在反射剖面上的这些假水平层常会被错误地解释成由地壳拉张形成的水平构造层理或由底侵作用所致的上地幔部分熔融岩浆注入下地壳而形成的水平基性岩席。模拟结果证明,成分层理不一定就是中下地壳内水平反射层的唯一成因。由强烈构造缩短造成的复杂形态的褶皱串同样会形成水平反射,上述两种机制形成的水平反射的不同之处在于其侧向连续性,由多级复式褶皱形成的水平反射在侧向上总是断断续续分布。有趣的是,地盾和褶皱造山带的地震波反射在水平方向上的连续性总是比拉张地区的要差得多(当然局部的剪切带例外)。这说明水平层理确实是拉张地区如美国西南盆岭地区下地壳水平反射的真正成因,而老、中、新褶皱造山带中下地壳的大多数水平反射却应由褶皱造成。

## 参 考 文 献

- 许志琴,张泽明,刘福来,杨经绥,唐哲民,陈世忠,柴耀楚,李天福,陈方远. 2004. 中国大陆科学钻探主孔1200米构造柱及变形构造初步解析. 岩石学报, 20(1): 53~72.
- 杨文采,杨午阳,程振炎. 2004. 中国大陆科学钻探孔区三维地震资料的初步解释. 岩石学报, 20(1): 127~138.
- Bleeker W. 1990. Evolution of the Thompson Nickel Belt and its nickel deposits, Manitoba, Canada, Ph. D. thesis. University of New Brunswick, Fredericton, N. B., Canada.
- Bouzidi Y, Schmitt D R, Burwash R, Kanasevich E R. 2002. Depth migration of deep seismic reflection profiles: crustal thickness variations in Alberta. Can. J. Earth Sci., 39: 331~350.
- Burg J P, Davy P, Martinod J. 1994. Shortening of analogue models of the continental lithosphere: New hypothesis for the formation of the Tibetan plateau. Tectonics, 13: 475~483.
- Calvert A J, Clowes R. 1990. Deep, high-amplitude reflections from a major shear zone above the subducting Juan de Fuca plate.

- Geology, 18: 1091~1094.
- Cook F A, van der Velden A J, Hall K W, Roberts B J. 1999. Frozen subduction in Canada's Northwest Territories: Lithoprobe deep lithospheric reflection profiling of the western Canadian Shield. *Tectonics*, 18: 1~24.
- Damotte B. 1993. Experience from the ECORS program in region of complex geology. *J. Appl. Geophys.*, 29: 301~338.
- Deemer S J, Hurich C A. 1994. The reflectivity of magmatic underplating using the layered mafic intrusion analog. *Tectonophysics*, 232: 239~255.
- Drummond B J, Hobbs R W, Goleby B R. 2004. The effects of out-of-plane seismic energy on reflections in crustal-scale 2D seismic sections. *Tectonophysics*, 388: 213~224.
- Holbrook W S, Catchings R D, Jarchow C M. 1991. Origin of deep crustal reflections: Implications of coincident seismic refraction and reflection data in Nevada. *Geology*, 19: 175~179.
- Ji S C, Long C X, Martignole J, Salisbury M. 1997. Seismic reflectivity of a finely layered, granulite-facies ductile shear zone in the southern Grenville Province (Quebec). *Tectonophysics*, 279: 113~133.
- Ji S C, Wang Q, Xia B. 2002. *Handbook of Seismic Properties of Minerals, Rocks and Ores*. Montreal: Polytechnic International Press. 1~630.
- Ji S C, Xia B. 2002. *Rheology of Polyphase Earth Materials*. Montreal: Polytechnic International Press. 1~260.
- Ji S C, Salisbury M, Hanmer S. 1993. Petrofabric, P-wave anisotropy and seismic reflectivity of high grade tectonites. *Tectonophysics*, 222: 195~226.
- Klemperer S L, BIRPS Group. 1987. Reflectivity of the crystalline crust: hypotheses and tests. *Royal Astronomical Society Geophysical Journal*, 89: 217~222.
- Long C X, Salisbury M. 1996. Velocity structure of the Britt Domain, southwestern Grenville province from laboratory and refraction experiments. *Can. J. Earth Sci.*, 33: 729~745.
- Martignole J, Calvert A J. 1996. Crustal-scale shortening and extension across the Grenville Province of western Quebec. *Tectonics*, 15: 376~386.
- McBride J H, White R S, Smallwood J R, England R W. 2004. Must magmatic intrusion in the lower crust produce reflectivity? *Tectonophysics*, 388: 271~297.
- McDonald J A, Gardner G H F, Hilterman F J. 1983. *Physical Modeling at the Seismic Acoustics Laboratory*. Univ. Houston, Houston, TX, USA. 1~258.
- Meissner R, Wever T, Sadowiak P. 1991. Continental collisions and seismic signature. *Geophys. J. Int.*, 105: 15~23.
- Melia P J, Carlson R L. 1984. An experimental test of P-wave anisotropy in stratified media. *Geophysics*, 49: 374~378.
- Passchier C W. 1986. Mylonites in the continental crust and their role as seismic reflectors. *Geol. Mijnb.*, 65: 167~176.
- Pfiffner O A, Ellis S, Beaumont C. 2000. Collision tectonics in the Swiss Alps: Insight from geodynamic modeling. *Tectonics*, 19: 1065~1094.
- Pfiffner O A, Levato L, Valasek P. 1991. Crustal reflections from the Alpine orogen: results from deep seismic profiling. In: *Continental Lithosphere: Deep Seismic Reflections*, Geodynamics 22. American Geophysical Union, 185~193.
- Rey P. 1993. Seismic and tectonometamorphic characteristics of the lower continental crust in Phanerozoic areas: A consequence of post-thickening extension. *Tectonics*, 12: 580~590.
- Varsek J L, Cook F A. 1991. Seismic reflection geometry of a folded and detached, accretionary complex: Kootenay arc, British Columbia. *Geology*, 19: 159~162.
- Warner M R. 1990. Basalts, water, or shear zones in the lower continental crust? *Tectonophysics*, 173: 163~174.
- White D J, Jones A G, Lucas S B, Hajnal Z. 1999. Tectonic evolution of the Superior Boundary Zone from coincidence seismic reflection and magnetotelluric profiles. *Tectonics*, 18: 430~451.
- Xu Z Q, Zhang Z M, Liu F L, Yang J S, Tang Z M, Cheng S Z, Cai Y C, Li T F, Cheng F Y. 2004. The structure profile of 0~1200m in the main borehole, Chinese Continental Scientific Drilling and its preliminary deformation analysis. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 53~72.
- Yang W C. 2002. Geophysical profiling across the Sulu ultra-high-pressure metamorphic belt, eastern China. *Tectonophysics*, 354: 277~288.
- Yang W C, Yang W Y, Chen Z Y. 2004. Interpretation of 3D seismic reflection data in the Chinese Continental Scientific Drilling site. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 127~138.

## Seismic Reflection Response of Folds and Implications for Structural Geology of Continental Crust

JI Shaoheng<sup>1,2)</sup>, LONG Changxing<sup>3)</sup>, XIA Bin<sup>2)</sup>

1) *Département des Génies Civil, Géologique et des Mines, école Polytechnique de Montréal, Montréal, H3C 3A7, Canada*

2) *Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640, China; 3) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081, China*

### Abstract

In order to understand seismic response of folded structures, reflection modeling has been performed on various types of fold trains including single-order open folds, close folds and asymmetric inclined folds as well as multi-order folds. The synthetic sections show that, unlike large scale single-order open folds, multi-order folds and inclined folds cannot be correctly imaged by conventional reflection techniques. The reflections from fold

limbs tend to be muted, leaving the crests and troughs that merge laterally into pseudo-horizontal reflections. These reflections bear no resemblance to folds but mislead, instead, the presence of subhorizontal reflections. The latter is often interpreted as subhorizontal layering or compositional lamination formed by crustal extension or underplating. The modeling results also suggest that the compositional lamination is not necessarily the sole source of subhorizontal reflections. Complex folded structures due to intensive shortening may also produce such subhorizontal reflections, but the latter are generally more discontinuous laterally and less dense than those caused by simple lamination. Interestingly, the reflections observed in cratons and fold belts are generally laterally shorter and less dense (except in ductile shear zones) than those observed in the extensional regions. This indicates that seismic lamination may correspond to laminated lower crust in extensional regions such as the Basin and Range (USA), but most likely to complex folded structures beneath both ancient and modern fold belts.

**Key words:** folds; seismic reflections; compressional orogenic belts; continental lower crust; tectonic deformation

---