

· 处理技术 ·

塔里木沙漠区地震数据品质与沙层 Q 吸收

李合群*^{①②} 孟小红^① 赵波^② 罗国安^{②③} 徐峰^④

(①中国地质大学(北京),北京 100083; ②东方地球物理公司,河北涿州 072751;

③中国石油大学(北京),北京 102249; ④西南石油大学,四川成都 610500)

李合群,孟小红,赵波,罗国安,徐峰. 塔里木沙漠区地震数据品质与沙层 Q 吸收. 石油地球物理勘探, 2010, 45(1):28~34

摘要 结合塔里木沙漠区勘探地震数据、沙层 Q 吸收调查数据以及 Q 吸收理论模拟,本文对造成该区地震数据品质与地形相关性的主要原因、沙层 Q 吸收对地震数据的作用以及针对沙层的 Q 值估算和 Q 吸收补偿等问题进行较为深入的分析。分析结果表明:沙层 Q 吸收不是造成该区地震数据品质与地形相关性的主要原因;现有的 Q 值估算方法,在针对沙层的 Q 值估算中面临很强的干扰; Q 吸收补偿只能在一定程度上减小与地形相关性的地震数据品质差异。

关键词 沙漠区 近地表 Q 吸收 Q 值估算 Q 吸收补偿

1 引言

沙漠地貌对地震数据的影响可以粗略地归纳为“时差”、“吸收”和“次生干扰”三方面。时差问题,也就是静校正问题,经过前人多年的努力,无论是在野外采集方面还是室内处理方面,都已经得到了很好的解决。对沙层的吸收及次生干扰问题,也一直受到人们的关注^[1~4]。

随着油气勘探的目标逐步转向深层、对地质目标描述的要求更为精细,人们对地震数据的分辨率,特别是数据处理过程的保真度提出了更高的要求。因此,人们转而重新审视长期主要起着提高地震数据分辨率作用的常规统计性反褶积技术。与统计性反褶积相比,由于对地震子波和反射系数无假设、具有更明确的物理意义等诸多优点, Q 吸收补偿技术再度受到人们的关注。对于塔里木沙漠区地震数据,由于常常见到数据品质与地形(沙丘的起伏)呈明显的相关性,所以人们往往直观上将其与松软的沙层联系,进而认为沙层 Q 吸收是造成这种地震数据品质变化的主要原因,并希望通过 Q 吸收补偿来减小或消除这种与地形相关的地震数据品质差异。

到底什么是造成地震数据品质与地形相关性的主要原因?实际应用中,针对沙层的 Q 吸收补偿技

术(包括 Q 值估算)会面临哪些问题? Q 吸收补偿能在多大程度上对与地形相关的地震数据品质差异进行补偿或校正?本文从塔里木沙漠区的两条二维地震测线入手,结合同一地区对地表沙层 Q 吸收的野外观测数据及其理论模拟,对此问题开展了较为深入的分析。研究结果表明:①沙层 Q 吸收不是造成地震数据品质与地形相关性的主要原因;②现有的 Q 值估算方法,在针对沙层的 Q 值估算中都面临很强的干扰;③ Q 吸收补偿只能在一定程度上减小这种与地形相关的数据品质差异。

2 问题的提出

图1是1997年在塔里木沙漠A区采集的一条二维地震测线的叠加剖面,采用组合方式激发,井深4~8m不等(均在潜水面之上)。图2是2005年在塔里木沙漠B区采集的一条二维地震测线的叠加剖面,均在潜水面之下激发。两图上方的曲线均为地形线,曲线的起、伏对应于沙丘的高、低变化。虽然程度不同,但从两条剖面上都可以看到地震数据品质与地形呈明显的相关性。造成这种相关性的主要原因是什么?为什么两条测线数据品质与地形的相关程度不同?近地表沙层的 Q 吸收与这种差异的关系有多大?下面就这些问题展开分析。

* 河北省涿州市东方地球物理公司物探技术研究中心,072751

本文于2009年8月25日收到。

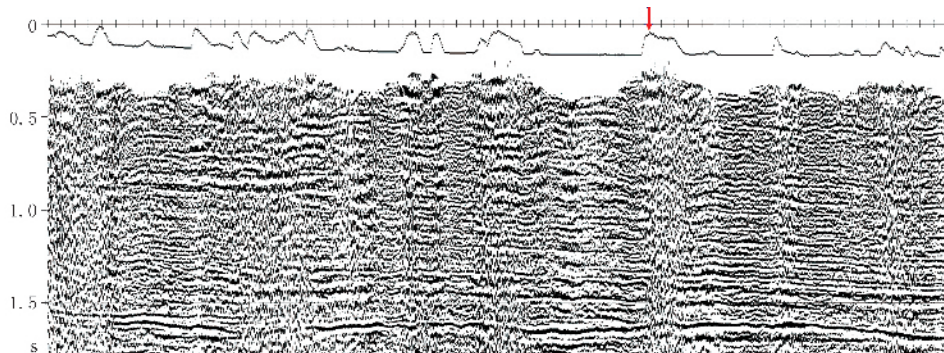


图 1 塔里木沙漠 A 区一条二维地震测线的原始数据叠加剖面

图上方曲线是地形(沙丘)线,注意数据品质与地形的相关性

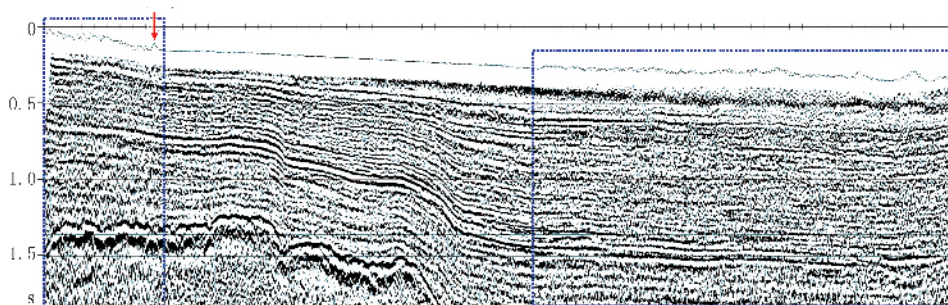


图 2 塔里木沙漠 B 区一条二维地震测线的原始数据叠加剖面

图上方曲线是地形(沙丘)线,注意数据品质与地形的相关性及虚线框中数据品质与地形的对应关系

3 数据品质与 Q 吸收关系分析

3.1 数据品质与地形相关性成因分析

图 3 是从图 1 中箭头附近选出的激发点分别位于沙丘下和沙丘上的两个共激发点记录,图最上方的曲线是地形(沙丘)线,紧随其下的是潜水面。由于两个激发点相距很近(800m,相当于 16 个接收道间隔),所以除排列两端少数几道不重叠外,两个共激发点记录具有相同的接收点和相同的地下反射段,可见两个记录中的差异主要源于激发点间的差异。分析图 3 可以清晰地看到:第一,沙丘上(在潜水面之上)激发的记录中存在很强的与初至波视速度相近的线性能量,这些能量主要是初至能量在沙层中(地表与潜水面之间)产生的多次反射,文献[2]称这种多次反射为沙丘鸣震。为方便起见,下文也称其为鸣震(在能量离开震源传入地下前产生的多次反射称为激发点鸣震,在能量到达接收点前产生的多次反射称为接收点鸣震。在不同类型的道集上,激发点鸣震和接收点鸣震的表现不同。在共激发点道集上,激发点鸣震的传播时间不随地形改变,

而接收点鸣震的传播时间随地形而变;而在共接收点道集上情况正好相反。另外,由于离激发点越近能量越强,所以激发点鸣震一般都比接收点鸣震能量强)。第二,根据含鸣震类型的不同,可将图 3 划分为四个不同的排列段,图 3a 的左排列段不含鸣震能量,而右排列段只含接收点鸣震能量;图 3b 的左排列段只含激发点鸣震能量,而右排列段既包含激发点鸣震又含接收点鸣震。第三,上述四个不同的排列段也正好经历了不同的沙层 Q 吸收。图 3a 左排列段数据未经历沙层 Q 吸收,图 3a 的右排列段只经历接收点沙层 Q 吸收;图 3b 的左排列段只经历激发点沙层 Q 吸收,而右排列段既经历了激发点沙层 Q 吸收,又经历了接收点沙层 Q 吸收。很显然,沙丘上、下激发的两个记录间的差异主要由激发点鸣震干扰所致,而非沙层的 Q 吸收。另外,两个共激发点记录间的震源子波也会有一定的差异。

从上述分析可知,造成四个排列段地震数据品质差异的原因有三个:鸣震干扰、震源子波差异和沙层 Q 吸收(注:激发过程中的沙层吸收可以导致震源子波的差异,但这种吸收不属于 Q 吸收,因为 Q 吸收是波在黏弹性介质中的传播过程中发生的,

而激发过程中介质发生的不是弹性形变,也不存在震源子波的传播)。显然,沙层Q吸收不是导致地震数据品质差异的主要原因。

图4是与图3相同位置上的两个共接收点记录。从图4可以看到与图3类似的现象,只是在共接收点记录上激发点鸣震干扰更为明显,加上不同激发点间的差异大于接收点间的差异(接收组合产生一定的平滑作用),因而与图3相比,图4的信噪比略显低一些。

图3和图4的数据均是在潜水面下激发的,所以既存在接收点鸣震,也存在激发点鸣震。若在潜水面下激发,情况又当如何?

图5是从图2中箭头所指位置附近选出的两个共激发点记录,激发点分别位于沙丘上和沙丘下。图最上方的曲线是地形(沙丘)线,紧随其下的是潜水面;两个激发点相距40个道间隔,直线距离约1200m。分析该图可以看到,两个共激发点记录之间,地震数据品质差异很小,且主要是缘于激发点附

近地形差异带来的次生干扰;由于在潜水面下激发,两记录间不存在激发点处沙层Q吸收造成的差异,记录中也未见明显的激发点鸣震能量(潜水面下激发不易产生在地表与潜水面间回荡的能量)。虽然在潜水面下激发可避免激发点的鸣震,但由于传入地下的能量增强,因而会产生相对更强的接收点鸣震(初至附近与地形相关的条带状强能量)。

图6是与图5相同位置上的两个共接收点记录。两个记录数据品质迥异,虽然两个接收点间沙层Q吸收差异也是造成这种差异的原因之一,但不是主要原因。显然,接收点鸣震才是造成这种差异的主要原因。

综合上述分析可知,造成沙漠区地震数据品质与地形呈相关性的主要原因不是沙层Q吸收,而是沙层鸣震干扰;并且在潜水面下激发时,由于激发点鸣震能量大大减弱,数据品质与地形的相关性也相应减弱。图1和图2中数据品质与地形相关性的差异主要是由潜水面下、下激发所致。

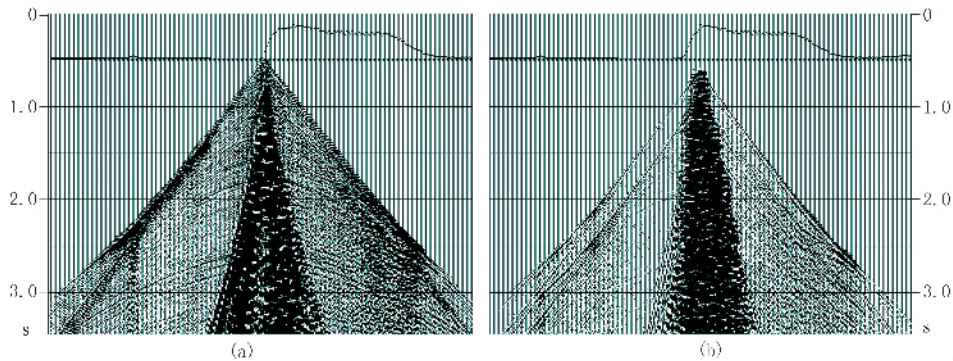


图3 从图1箭头附近选出的分别位于沙丘下(a)和沙丘上(b)的两个共激发点记录

图上方曲线是地形(沙丘)线,紧随其下的是潜水面(与0.5s时间线重叠);图3a地表与潜水面间的高差为5m,图3b为112m。除做了检波点静校正和固定线性时变增益外,数据未做其他处理

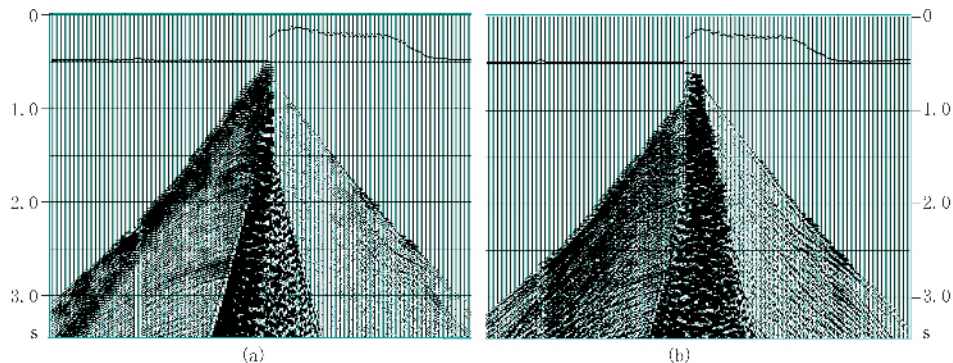


图4 从图1箭头附近选出的分别位于沙丘下(a)和沙丘上(b)的两个共接收点记录

图上方曲线是地形(沙丘)线,紧随其下的是潜水面(与0.5s时间线重叠);图4a中地表与潜水面间的高差为5m,图4b为112m。除做了激发点静校正和固定线性时变增益外,数据未做其他处理

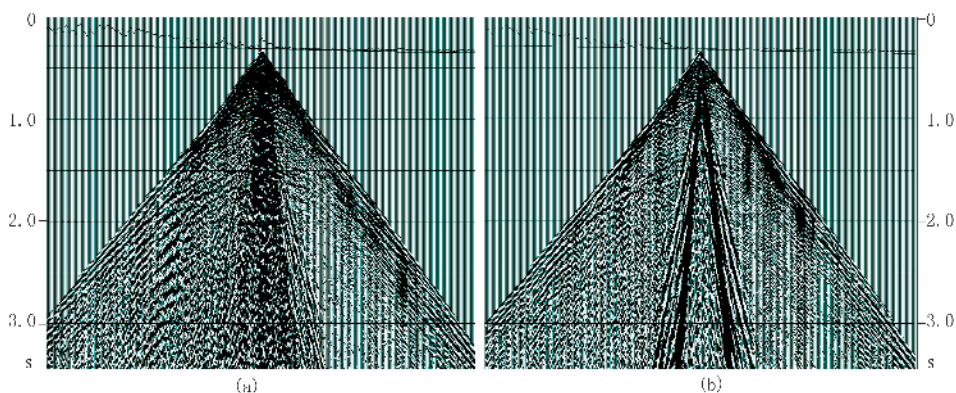


图 5 从图 2 箭头附近的沙丘上(a)、下(b)分别选出的两个共激发点记录
图上方曲线是地形(沙丘)线,紧随其下的是潜水面;图 5a 地表与潜水面间的高差为 23m,图 5b 为 3m。
除做了检波点静校正和固定线性时变增益外,数据未做其他处理

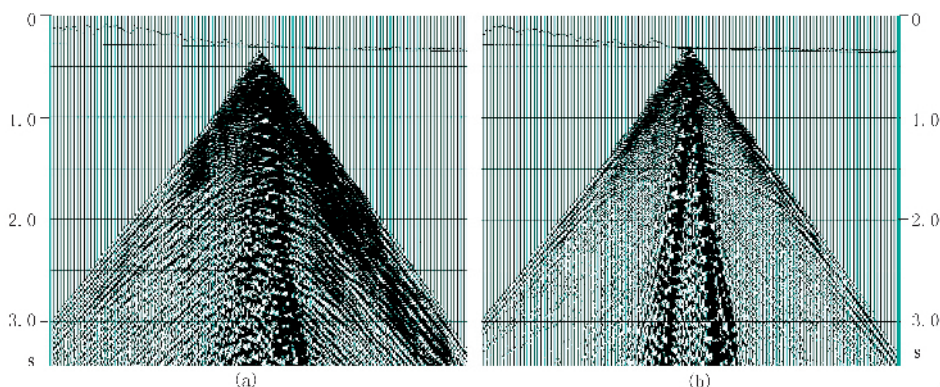


图 6 从图 2 箭头附近的沙丘上(a)、下(b)分别选出的两个共接收点记录
图上方曲线是地形(沙丘)线,紧随其下的是潜水面;图 6a 地表与潜水面间的高差为 23m,图 6b 为 3m。
除做了激发点静校正和固定线性时变增益外,数据未做其他处理

3.2 沙层对地震数据的 Q 吸收及 Q 吸收补偿

沙层 Q 吸收虽不是造成地震数据品质差异的主要原因,但对地震数据的影响毕竟存在。由于目前在地震数据处理中对保真度的要求不断提高,因此仍然有必要研究沙层 Q 吸收对地震数据品质的影响程度及补偿方法。

为方便分析,先简要介绍 Q 吸收的基本原理。根据 Futterman^[5]模型,体波在介质中传播时要经历与波本身(频率)和介质性质有关的能量衰减,同时伴随波散。也就是说,Q 吸收会导致体波的能量衰减和波散,其数学表达式为

$$\begin{cases} A(f, t) = A(f, 0)e^{-\frac{\pi t}{Q}} \\ \frac{V(f)}{V(f_c)} = \left(1 + \frac{1}{\pi Q} \ln \frac{f}{f_c}\right) & f < f_c \\ V(f) = \text{常量} & f \geq f_c \end{cases} \quad (1)$$

式中:Q 代表介质的品质因子;f 代表单频波的频率;A(f, 0) 和 A(f, t) 分别代表频率为 f 的单频波

在 0 时刻的振幅和在品质因子为 Q 的介质中传播 t 秒后的振幅;V(f) 和 V(f_c) 分别代表频率为 f 和频率为 f_c 的单频波的相速度;f_c 称为介质的特征频率。

式(1)中第一个式子表示地层 Q 吸收导致的振幅衰减关系,后两个式子表示与振幅衰减相伴随的频散关系。本文的重点在于讨论振幅衰减,所以主要关注式(1)中的第一式。

由式(1)可知,Q 吸收导致的振幅衰减,除与地层品质因子和地震波的频率有关外,还与传播路径的长度有关(由于各频率分量通过自己的速度传播,传播路径可以表示为传播时间,加上实际地震数据都是时间域的,所以常用传播时间的大小代替传播路径的长度来讨论 Q 吸收,为方便起见,下文也将如此)。对给定的地层,同一频率的单频波,传播时间越短 Q 吸收越弱,传播时间为零则不产生 Q 吸收。为了更为准确地认识各种针对沙层的 Q 值调

查技术和方法所面临的干扰强度以及针对沙层的Q吸收补偿所能发挥的作用,需要直观、定量地了解沙层Q吸收对地震数据的影响程度。为此,有必要进行沙层Q吸收的数值模拟。

根据以往的经验,塔里木沙漠区沙层的Q值约为10,纵波传播速度约为670m/s,地震数据浅层的主频约为50Hz。图7给出了用50Hz雷克子波在上述参数的介质中传播10,20,⋯,60m时的波形、振幅谱以及能量变化的模拟结果。从中可以看出:

- ①沙层的Q吸收确实对地震数据造成明显的影响;
- ②Q吸收对地震数据的总体作用随地震数据高频分量的减小呈指数关系递减。

3.2.1 沙层Q值估算

Q吸收的作用导致传播了不同距离的各子波间在能量或频带上产生差异,这是所有Q值估算技术或方法的基本依据。这种“有效”差异越大,估算过程的抗干扰能力越强,反之亦然。而在实际采集的地震数据中,存在对这种差异构成干扰的许多其他因素,如不同震源子波或接收点耦合因素(图8),子波求取时引入的误差等。因此,在实际的Q值估算中,应该分析有效差异和干扰差异,尽可能增大有效差异(如增加激发信号的高频成分),降低干扰差异的影响,以提高估算质量。

图8展示了一个针对沙层Q吸收的野外实测数据。图8a为共激发点道集(接收点在地表,激发点在地下30m处),图8b为共接收点道集(接收点在铅直激发井的井口;激发点在铅直激发井中从潜水面下往上,间隔为2m)。接收使用的是同批次的单个检波器,激发药量同为6个雷管。可以看出,该数据环境干扰很弱,在共激发点记录中造成初至波

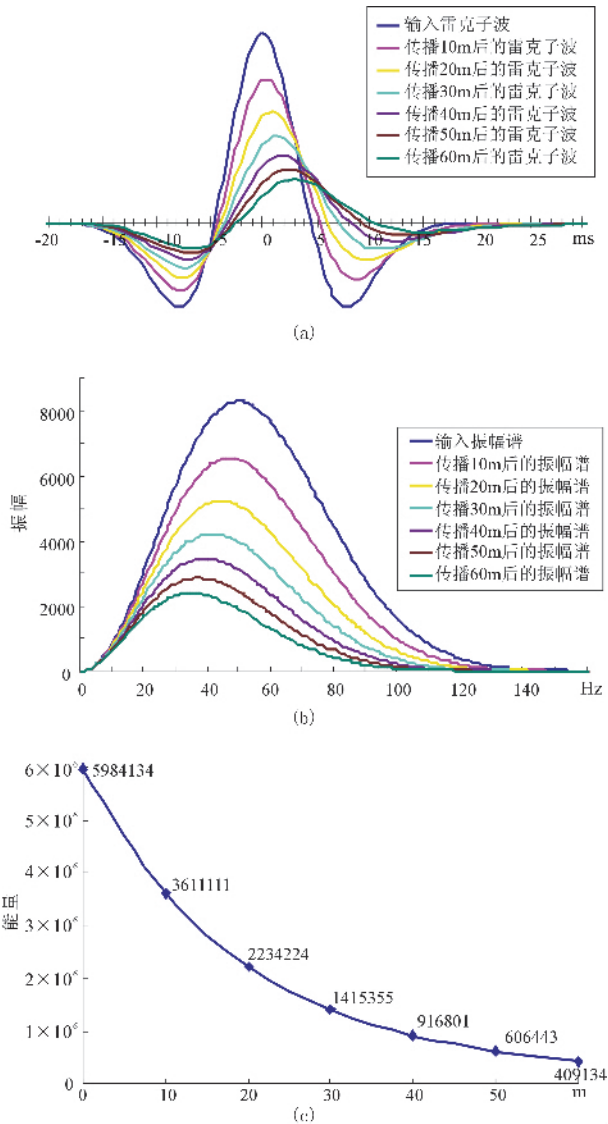


图7 数值模拟在沙层中传播的地震信号
(a)波形随传播距离的变化;(b)振幅谱随传播距离的变化;(c)信号能量随传播距离的变化。沙层介质Q值为10,雷克子波主频为50Hz

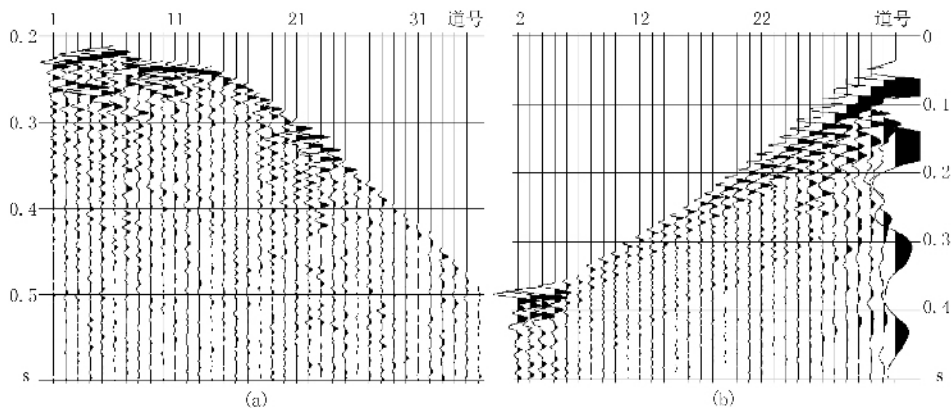


图8 在图2测线上所做的沙漠区近地表吸收野外调查数据
(a)共激发点记录;(b)共接收点记录。数据未经任何处理,图中所标时间为实际传播时间放大4倍

之间差异的因素应当只有 Q 吸收和接收点耦合;而在共接收点记录中造成初至波之间差异的因素应当只有 Q 吸收和震源子波差异。显然,该数据中缘于接收点耦合或震源子波的干扰差异远远大于缘于 Q 吸收的有效差异。用这样的数据进行沙层 Q 值估算,将面临很大的困难。

3.2.2 沙层的 Q 吸收补偿

上文对实际数据的分析表明,Q 吸收不是造成数据品质与地形相关的主要原因,所以不能期望通过 Q 吸收补偿来消除或明显减小沙丘上、下地震数据品质的差异。此外,沙层一般相对较薄,地震波在其中传播的时间很短,Q 吸收对地震数据的影响十分有限,且常规处理中的能量均衡和频带拓宽类处理,特别是地表一致性反褶积和振幅补偿,也可以部分补偿这种作用。所以,通过针对沙层的 Q 吸收补偿,难以得到明显好于常规处理的结果。图 9 给出了图 2 测线右端浅层应用针对沙层的 Q 吸收补偿

前、后的对比剖面,从中可以看到,Q 吸收补偿发挥了一定的作用,但不十分明显,且与地形相关的数据品质差异仍然明显存在,这验证了前文有关地震数据品质与地形相关性成因以及针对沙层的 Q 吸收补偿的分析和认识。尽管沙层 Q 吸收作用有限(因而相应的补偿作用也有限),针对沙层的 Q 吸收补偿相对常规处理的改进余地不大,但这并不能否定针对沙层的 Q 吸收补偿作用,更不能否定针对表层之下地层的 Q 吸收补偿作用。因为与常规统计性反褶积相比,同为提高分辨率技术的 Q 吸收补偿具有更好的振幅保真性,在对数据保真度要求较高的情况下(如振幅解释、地震反演等),建议尝试 Q 吸收补偿。图 10 所示是图 2 测线右半部分应用包括风化层(沙层)及浅、中层 Q 吸收补偿的效果对比,箭头所指的弱同相轴在不同处理结果中有差异,体现了 Q 吸收补偿在信息保真方面相对于常规统计性反褶积的优势。

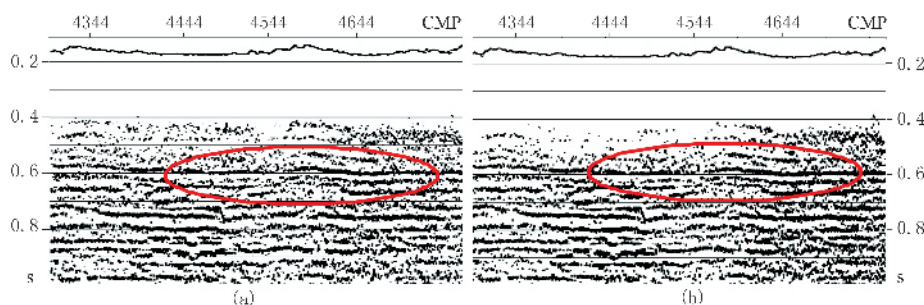


图 9 针对风化层(沙层)的 Q 吸收补偿效果对比

(a)未应用(叠前)Q 吸收补偿的叠加剖面;(b)应用(叠前)Q 吸收补偿后的叠加剖面。图上方曲线是地形(沙丘)线

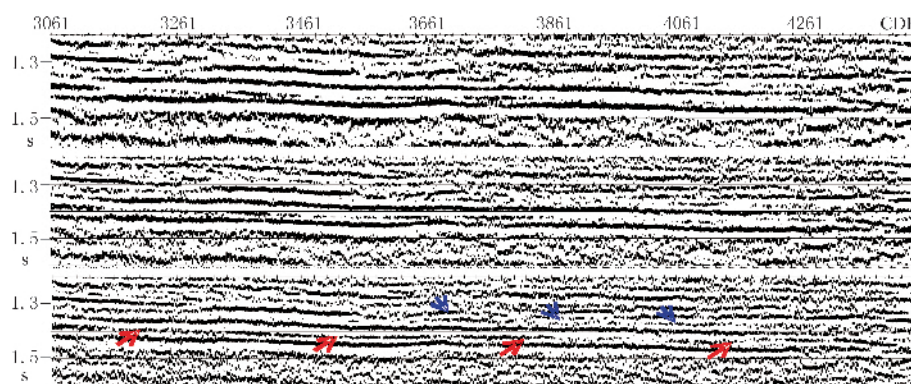


图 10 包括风化层(沙层)及浅、中层的 Q 吸收补偿效果对比

(上)原始数据的叠加剖面;(中)原始数据经地表一致性反褶积后的叠加剖面;(下)原始数据经叠前 Q 吸收补偿的叠加剖面

4 结论

(1)造成塔里木沙漠区地震数据品质与地形相

关的可能原因包括沙丘鸣震干扰、震源子波差异和沙层 Q 吸收等三方面。主要原因是沙丘鸣震干扰,且干扰程度与采集方式(如激发深度与潜水面的关系)以及地形等有关,沙层 Q 吸收不是主要原因。

(2) 针对沙层的 Q 值估算面临震源子波差异、接收点耦合差异等诸多干扰。为获得可靠估算结果, 需要从降低干扰差异和增加因 Q 吸收引起的差异两方面入手。增加激发信号的高频成分、加大对比信号的传播距离差等, 都可以增加 Q 吸收引起的有效差异。

(3) 沙层 Q 吸收对地震数据产生明显的吸收作用, 且总体作用与沙层厚度有关; 但由于沙层一般相对较薄, 所以总体作用有限, 针对沙层的 Q 吸收补偿一般难以得到明显好于常规处理的结果。

本文通过塔里木沙漠区两条实际二维地震测线数据和一个沙层 Q 吸收调查实测数据, 围绕“地震数据品质与沙层 Q 吸收”的问题进行了分析、研究, 目的在于抛砖引玉, 引发同行的思考。随着油气勘探对地震数据要求的不断提高, 地震数据处理面临的问题在不断增多, 而要合理有效地解决这些问题, 弄清楚问题的成因是基础。但本文所用实际数据局限于塔里木沙漠区, 而塔里木沙漠区有其特殊性, 如平缓、稳定的潜水面, 沙层含水量很小等等。对其他沙漠或不同表层条件的探区, 情况可能有所变化,

所以, 实际应用中要具体问题具体分析。

本文使用的实际数据得到了塔里木油田公司、东方地球物理公司塔里木前线指挥部及 219 队等单位的大力支持; 在本文的成文过程中, 周兴元先生提出了很好的建议, 在此一并深表感谢!

参考文献

- [1] 凌云, 高军, 张汝杰. 基于一维弹性阻尼波动理论的沙丘 Q 吸收补偿. 石油地球物理勘探, 1997, 32(6): 795~803, 841
- [2] 凌云, 高军, 张汝杰. 地表一致性变预测步长反褶积与沙丘鸣震的压制. 石油地球物理勘探, 1998, 33(1): 23~34
- [3] 凌云. 大地吸收衰减分析. 石油地球物理勘探, 2001, 36(1): 1~8
- [4] 石战结, 田钢. 西部大沙漠区近地表地震波衰减及高频补偿技术研究. 石油地球物理勘探, 2007, 42(4): 392~395
- [5] Futterman W I. Dispersive body waves. *Geophysics Reprint Series*, 1962, 405~417

(本文编辑: 冯小球)

(上接第 9 页)

5 结论

通过对 VSP 旅行时速度反演方法的分析和对实际资料的处理实践, 得到下列认识和结论:

(1) 在讨论传统的雅可比矩阵的求解方法的基础上, 提出了新的计算雅可比矩阵的方法, 使反演能够更快地收敛;

(2) 新方法对初始速度的取值无严格限制, 只需赋予初始速度的大致范围, 反演即可较快地收敛;

(3) 新方法反演速度快, 算法稳定, 且适用于大面积三维数据体的成像。

另外, 对本文提出的新方法稍作修改, 即可直接用于反射波和转换波的速度反演。

中国石油集团东方地球物理公司提供了本项目所需数据, 马志霞、孙文博、蔡露露、陈建江等同学及其他同事在项目进展中提出了很好的建议或提供了大力帮助, 在此一并感谢。

参考文献

- [1] Lines L R, Bourgeois A and Covey J D. Traveltime inversion of offset vertical seismic profiles-A feasibility study. *Geophysics*, 1984, 49(3): 250~264
- [2] Salo Edward L and Schster Gerard T. Traveltime inversion of both direct and reflected arrivals in vertical seismic profile data. *Geophysics*, 1989, 54(1): 49~56
- [3] 朱键, 王永昌. 利用上行波进行 VSP 数据旅行时反演. 西安工程学院学报, 1999, 21(3): 44~48
- [4] 田玥, 陈晓非. 水平层状介质中的快速两点间射线追踪方法. 地震学报, 2005, 27(2): 147~154

(本文编辑: 朱汉东)