青藏高原羌塘盆地中央隆起近地表速度结构的初至波层析成像试验

侯贺晟, 高 锐, 卢占武, 贺日政, 李秋生, 管 烨, 李朋武, 熊小松
HOU He-sheng, GAO Rui, LU Zhan-wu, HE Ri-zheng,
LI Qiu-sheng, GUAN Ye, LI Peng-wu, XIONG Xiao-song

中国地质科学院地质研究所岩石圈中心, 北京 100037
Lithosphere Research Centre, Institute of Geology , Chinese Academy of Geological Sciences , Beijing 100037, *China*

摘要: 利用 2 条衔接并横过青藏高原羌塘盆地中央隆起的反射地震剖面探测数据, 进行了初至波层析成像试验, 以揭示羌塘中央隆起的表层结构特征。研究结果表明, 大药量的反射地震单炮记录初至清晰, 长排列接收丰富了浅表构造趋势特征的信息, 层析走时射线密度随地下构造的复杂程度而变化。层析反演得到的速度结构显示了高速层起伏剧烈的变化特征, 其厚度与地表出露地层的年代负相关。深反射地震初至波走时层析成像可以提供丰富的地壳近地表结构信息。

关键词: 青藏高原; 羌塘盆地; 中央隆起; 深反射地震; 初至波走时; 近地表速度结构; 层析成像
中图分类号: P631.4 **文献标志码**: A **文章编号**: 1671-2552(2009)06-0738-08

Hou H S, Gao R, Lu Z W, He R Z, Li Q S, Guan Y, Li P W, Xiong X S. First arrival seismic tomographic imaging test of the near-surface velocity structure of central uplift in the Qiangtang basin, Qinghai-Tibet Plateau. ***Geological Bulletin of China,*** **2009, 28(6):738-745**

Abstract: In 2007 and 2008 two reflection seismic profiles that linking up and crossing the central uplift of the Qiangtang basin were acquired in Tibetan Plateau. The aim of this paper is to take advantage of these probe data and test the first arrival tomographic method to image the near-surface velocity structure of the central uplift in the Qiangtang. The results indicate that the first arrivals are clear in the recordings of high dynamite shots, and the detailed shallow structure trend emerges at long array receivers. The tomographic travel-rays assemble where the structure is complex underground. The tomographic image reveals the undulate character of the high velocity structure both vertical and horizontal. The thickness of the high velocity structure has negative correlation with the age of the outcrop. All the research testifies that The first arrival seismic tomographic imaging method can provide more detailed near-surface velocity structure information.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; Qiangtang basin; central uplift; deep seismic reflection; first break travel-time; near-surface velocity structure; tomographic imaging

位于青藏高原腹地的羌塘盆地, 南北宽 300km, 东西长近 640 km, 面积约(16~18)×10^{4}km^2, 目前已查明侏罗系是盆地内发育最全、分布最广泛的海相沉积层系[1-3]。盆地夹持于可可西里-金沙江缝合带和班公湖-怒江缝合带之间, 总体呈现"两坳夹一隆"的构造格架[2], 而盆地中央隆起区可能是研究印

收稿日期: 2009-03-02; **修订日期**: 2009-03-10
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(批准号: 40830316)、科技部国际合作重点项目(编号: 2006DFA21340)、国土资源部油气选区项目(编号: XQ2004-06)和国家专项深部探测技术实验与集成项目(编号: SinoProbe-02)资助
作者简介: 侯贺晟(1980-), 男, 博士, 从事地震层析成像与静校正研究。E-mail:hesheng.hou@126.com
通讯作者: 高锐(1950-), 男, 研究员, 博士生导师, 从事青藏高原岩石圈与地球动力学研究。E-mail:gaorui@cags.net.cn
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

度板块与欧亚板块碰撞的关键部位[4]。羌塘中央隆起区出露地层最全、构造变形机制复杂,从而成为了解整个盆地发育与演化的一个重要窗口(图 1),并与羌塘盆地的油气勘探具有密切的关系[5]。

然而,多期的构造作用致使岩性横向变化剧烈、新老地层交替出现,加剧了表层横向速度结构的变化,加之青藏高原特有的冻土层分布的变化问题[8],都对近地表结构产生了较大的影响。因此,羌塘盆地地震勘探技术攻关的重点应围绕近地表展开,搞清该区域近地表结构是提高地震剖面质量、认清深部构造的基本保障。

自 20 世纪 70 年代 CT(Computer Tomography)技术进入地学研究领域以来,层析成像在石油勘探[9-10]、金属矿床调查[11-12]、地热资源勘探、灾害防治等领域得到了广泛的研究[13],并在岩石圈速度结构研究中得到快速的发展[14-16]。国内外众多学者利用固定台站或流动台阵观测到天然地震波资料[17-20],应用层析成像技术得到青藏高原及周缘深部构造的成像结果,揭示了岩石圈深部过程及动力背景[18,21-22]。然而,这些依据被动源地震波资料的反演结果对于认识青藏高原岩石圈表层的精细速度结构贡献不大。

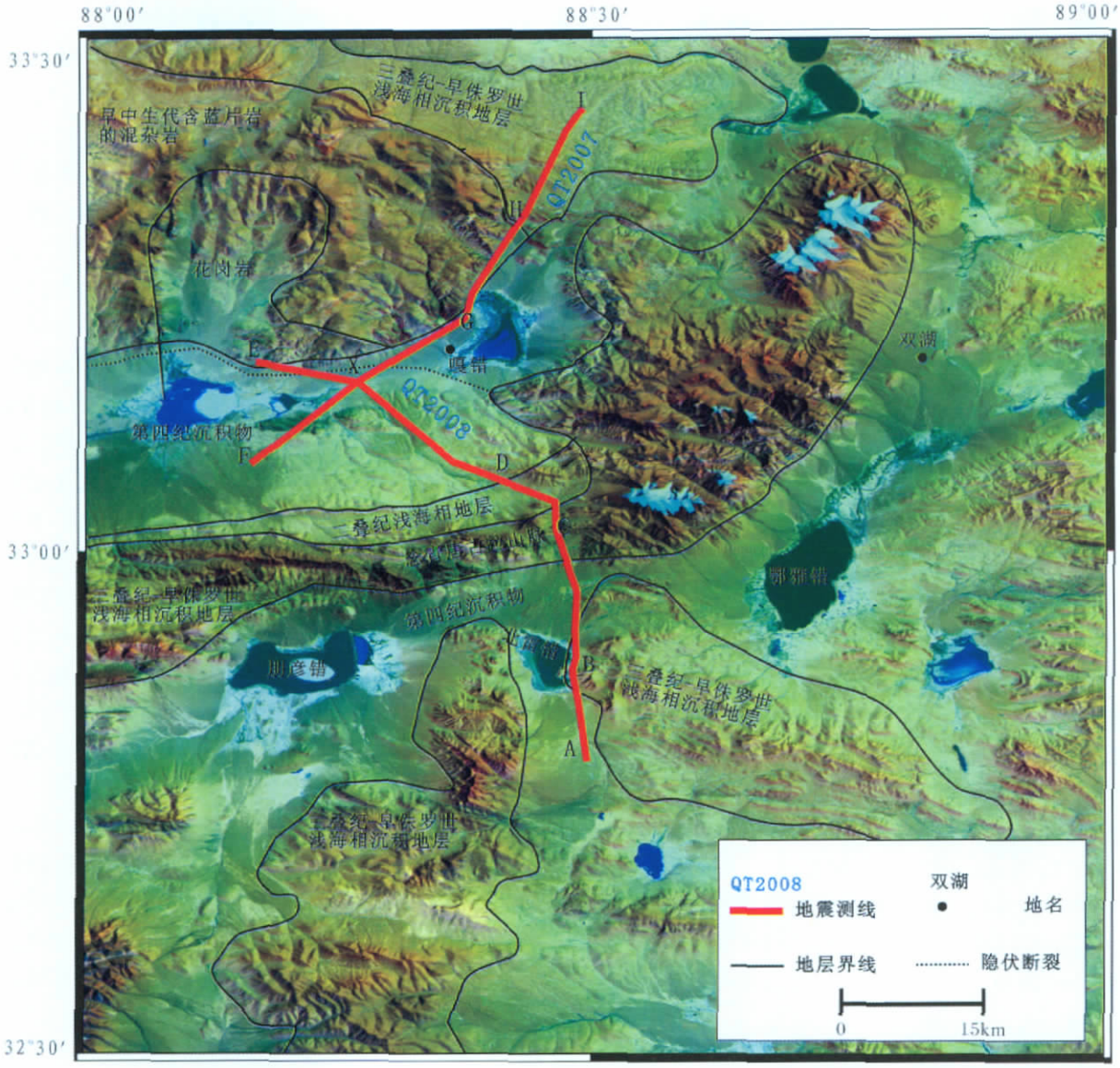

图 1　羌塘盆地中央隆起地震反射测线位置和地质简图[6-7]

Fig. 1　Seismic reflection survey lines deploying on the central uplift in the Qiangtang basin

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

以炸药爆破等形式的主动源深反射地震技术[23],采集周期短、探测深度大,能获得高精度的深部结构信息[24-25]。近年来对羌塘盆地的勘探实践表明,合理地加大接收排列,采用有效的深井、药量,添加适当的大炮、适当延长记录长度等措施能够获得较丰富的地下反射信息[26]。因此,笔者利用 2 条衔接并横过羌塘盆地中央隆起的深反射地震测线初至波走时数据,进行了近地表速度结构的层析成像试验,目的是充分挖掘地震反射数据中蕴涵的浅表信息,积累总结地壳浅表建模的经验。

1 初至波走时层析成像方法简介

地震初至波层析反演是利用地震记录中的初至旅行时求取介质的速度分布。将地下划分成速度网格,用网格单元的速度分布来模拟复杂的速度结构,根据走时场计算出射线的路径,然后根据走时方程计算各网格单元内的速度分布。初至旅行时可以表示为

$$T=\sum_{i=1}^{N} P_i d_i \qquad (1)$$

式中:T 为震源到检波器的旅行时;P_i 为第 i 个像素的慢度值(速度的倒数);d_i 为第 i 个像素的射线路径长度;N 为射线通过像素的数目。在实际应用中,因为有多条射线(炮-检对),所以式(1)为超大型线性方程组。通过求解该线性方程组就可以求出各个网格的速度值,据此便可以得到地下速度的结构。

初至波层析反演不仅能利用折射时间,还可以利用直达波、回折波、折射波、透射波等更多的地球物理信息,因此得到的结果也更加可靠。网格大小的划分通常以地震采集的道距为参考标准,以长方形最佳,能够提高地下垂直方向的分辨率。因此,层析建模方法可以适应地表起伏剧烈,速度横向、纵向变化大的地区,甚至用于存在高速夹层的情况[27-28]。笔者使用石油地震勘探处理中比较完善的层析建模与校正系统“Tomodel”,对羌塘盆地中央隆起 2 条地震反射剖面进行近地表建模试验研究。该系统采用非线性的反演算法,保证得到全局最优解,使得反演结果不依赖于初始速度模型,从而使得反演适用于复杂的近地表地区[29]。

2 数据介绍及层析反演过程

2004 年至 2008 年国土资源部中国地质调查局对羌塘盆地进行地震勘探方法试验。研究表明,羌塘盆地特殊的地质条件决定了地震勘探的难度,特别是表层结构多变性对地震波传播的影响有待更深入的研究。针对青藏高原羌塘盆地复杂的地质条件,2007 年度、2008 年度笔者在科技部和国家基金委重点项目资助下,分别在羌塘盆地中央隆起北缘与南缘进行了二维反射地震剖面试验(简称 QT2007、QT2008,见图 1 中的红线),进行了深井大药量激发、长排列接收实验。

野外施工采用炸药激发,2 条测线共计 913 炮,其中药量为 12~26 kg 的炮 881 个,药量大于 96 kg 的炮 32 个。数据采集时,除了测线两端分别为单边接收(图 2-a、c)外,其余为中间放炮、两边接收(图 2-b),最多接收 1700 道。QT2007 线包含了 20 m、40m 的 2 种道距和 100 m、160 m 的 2 种炮距,QT2008 线的道距与炮距分别为 40 m 与 120 m。2 条地震测线中最小偏移距为 10 m,最大偏移距为 23980 m。利用如此大范围内的偏移距接收排列信息进行近地表速度结构层析成像研究还不多见,需要获取精确的初至波到时信息和进行大量的测试研究工作。

初至波到时采用计算机智能与手工修改相结合的方式拾取,大药量单炮记录(图 2-a、b,药量 96kg)相对于小药量单炮记录(图 2-c,药量 20kg)能量强、初至清晰,初至不清晰和较远偏移距的初至走时不参与反演计算。进行层析反演时总是假定所有炮点和检波点分布在一条直线上,实际上野外地震测线为弯线施工采集,炮、检点排列并非总是一直线,这就需要进行坐标变换,将所有炮点、检波点投影变换到一条直线上。文中投影点选取 2 条地震测线相交的检波点位置,在最小二乘的意义下,用所有炮、检点拟合出一条直线,然后将所有炮、检点投影到该直线上,并以经向确定新的坐标的正负号。

投影变换后的炮、检点最大距离为 22000 m,根据走时与变换后相对投影点的距离关系,建立横、纵向为 20 m×10 m的初始模型,经初至波走时信息多次迭代,进行了小偏移距(15~4500 m)、中偏移距(15~9000 m)、大偏移距(15~18000 m)范围内的层析反演试验。

以 QT2007 线为例,5 次迭代后大、中长度的炮检距走时拟合残差(均方根)由初始的 0.2 s 降为 0.03 s,继续迭代则无明显改善。经原始记录走时与反演

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

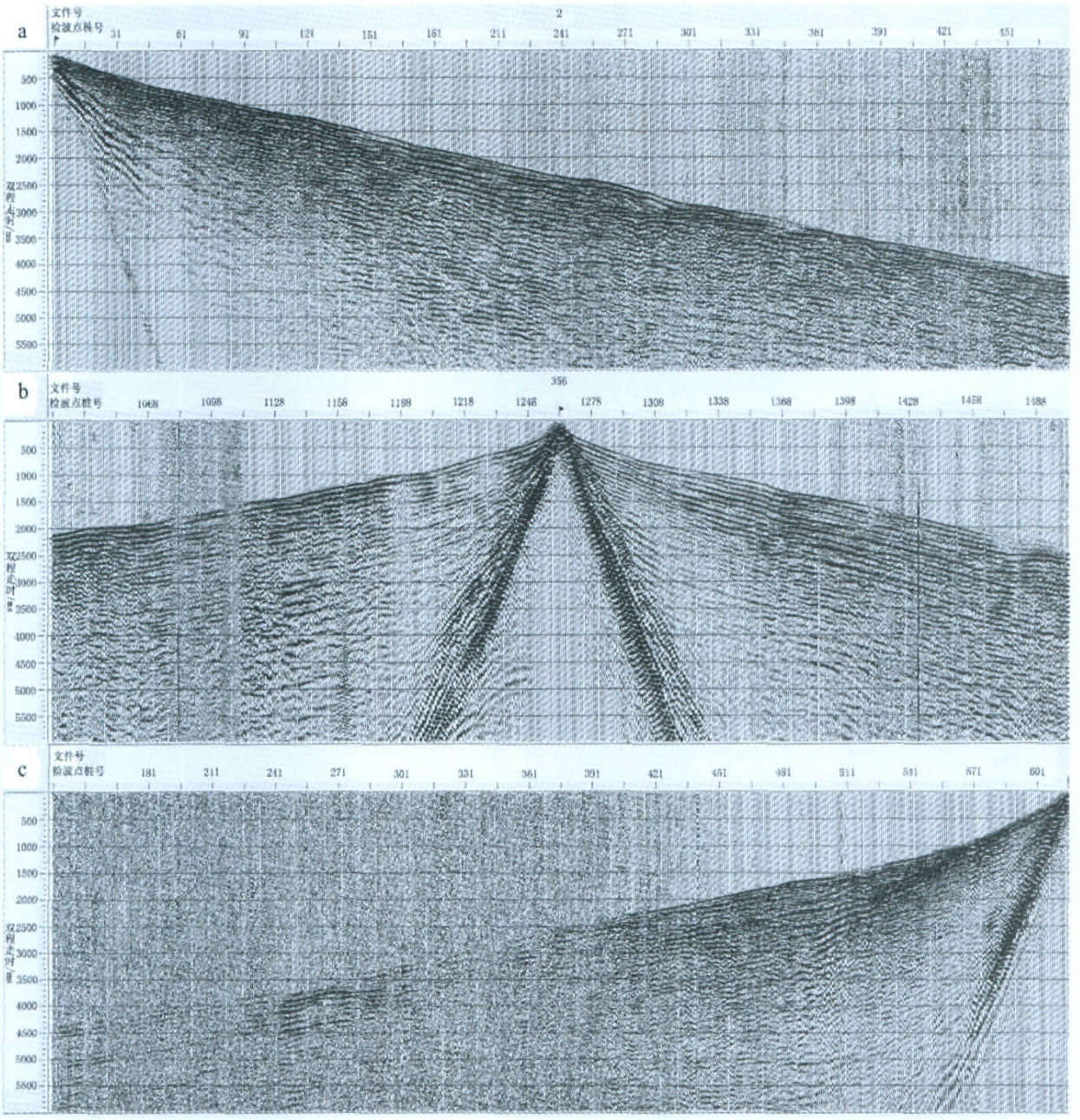

图 2　羌塘盆地中央隆起南部(a)、中部(b)和北部(c)单炮记录

Fig. 2　Field shot records of the southern part, middle part and northern part of the central uplift in the Qiangtang basin

后的合成走时对比(图 3-a),认为此误差来源于部分参与计算的大炮检距初至波走时，但并不是所有大炮检距的初至波走时，而是位于嘎错乡西北的 X—G 之间的炮点，这些炮点的远偏记录正好进入QT2007 拐点，并且结合野外观察及遥感图像(图1),这些走时恰好进入花岗岩区。因此产生这种误差的根本原因是观测系统和地下构造的变化,导致射线路径变得复杂。

试验研究中还发现，以小偏移距初至走时数据计算的模型拟合残差低(0.02 s),但随着参与计算偏移距长度范围的增加,射线穿透的深度增大,大偏移距层析反演得到的模型的深层趋势变化特征更清晰。因此,限于篇幅,文中只给出了大偏移距范围初至信息层析结果。经测试,2 条测线大偏移距的初至走时层析反演射线穿透的深度最大为 3000 m。因此,为了模型计算精度及显示的需要,定义初始模型

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

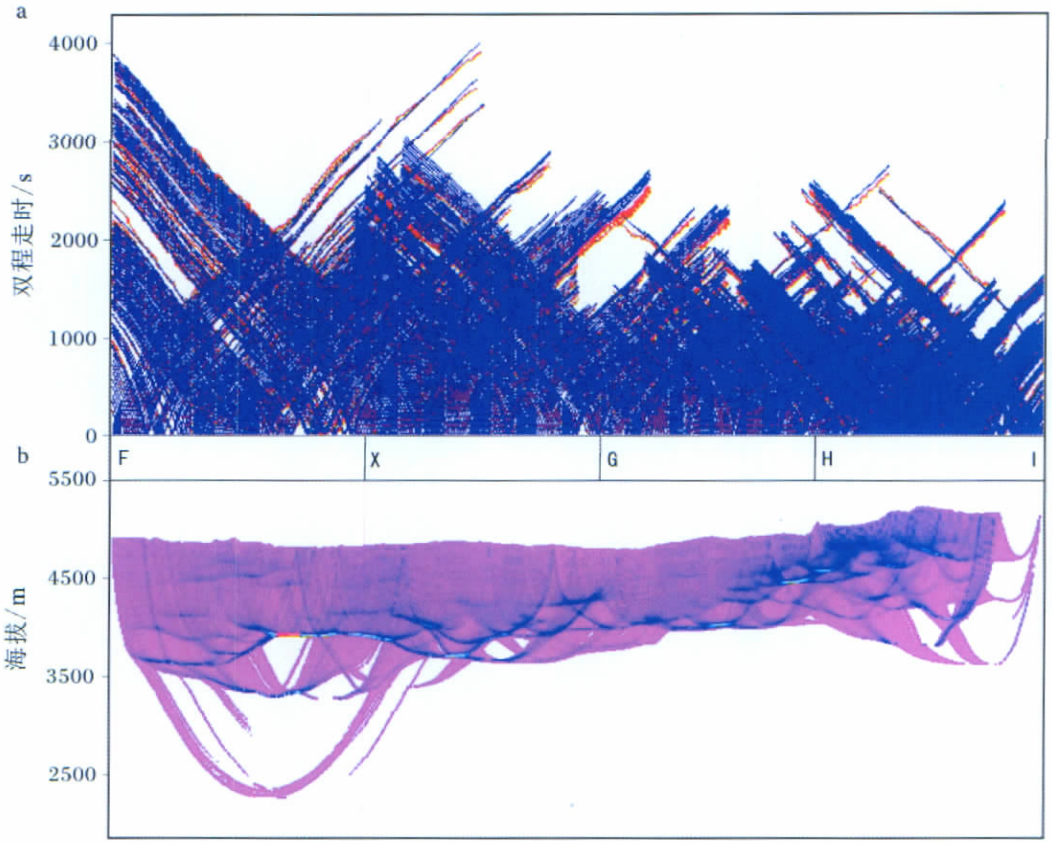

图 3 QT2007 线初至波走时(a 中的红色)、层析反演后的结果(a 中的蓝色)及其射线路径(b)

Fig. 3 First arrival travel-time (red in a) compared with the tomographic results (blue in a) and the ray path (b) of QT2007 seismic survey line

最深一层的厚度为 4000 m,而层析反演得到的速度结构,在射线底界面(Ray base)以下的速度结果有误差,但底界面以上的层析结果是比较有效的近地表速度。2 条测线中海拔最高点为 5227 m,文中选取 5500 m 作为基准面,QT2007 线射线路径图(图 3-b)、QT2008 速度结构图(图 4-a)和 QT2007 速度结构图(图 4-b)纵横比约为 5:1,连线速度结构图(图 4-c)纵横比约为 6:1。

3 初至波走时层析成像结果的特征

从羌塘中央隆起北部地震测线初至波走时射线路径图(图 3-b)可以看出,测线北部射线密,近炮点处射线密集,远炮点处射线相对稀疏。这种不均匀的射线覆盖,一种原因是与采集因素有关,即 QT2007 线北部采用 100 炮距激发、20 m 道距的排列接收,并且弯线观测系统炮、检点分布不均匀,使得炮间距与道间距随着测线的弯曲度而变化,致使不同炮集的偏移距范围不同;另一方面,可能是羌塘盆地中央隆起区地下介质的横向非均一性变化,由此产生速度非均匀性,可能使得射线在速度横向变化大的地方聚集、在速度横向变化小的地方发散。

因此,射线的聚散变化反映了地下构造的复杂程度,2 条地震测线近地表速度结构层析反演结果(图 4-a、b)显示了这种近地表速度结构纵、横方向上的变化特征。图中灰色线为层析射线密度的底界面(Ray base),投影到速度模型上,其上的速度有效,而射线密度底界以下的速度则仅供参考。

3.1 不同地表岩性下的近地表速度结构特征

中央隆起南部 QT2008 线,地表穿过 3 种类型的地质单元。其中,测线在北雷错东的 B 处与过念青唐古拉山脉的 C 处地表覆盖为三叠纪—早侏罗世浅海相沉积地层,嘎错乡以西的 E 处为花岗岩出

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

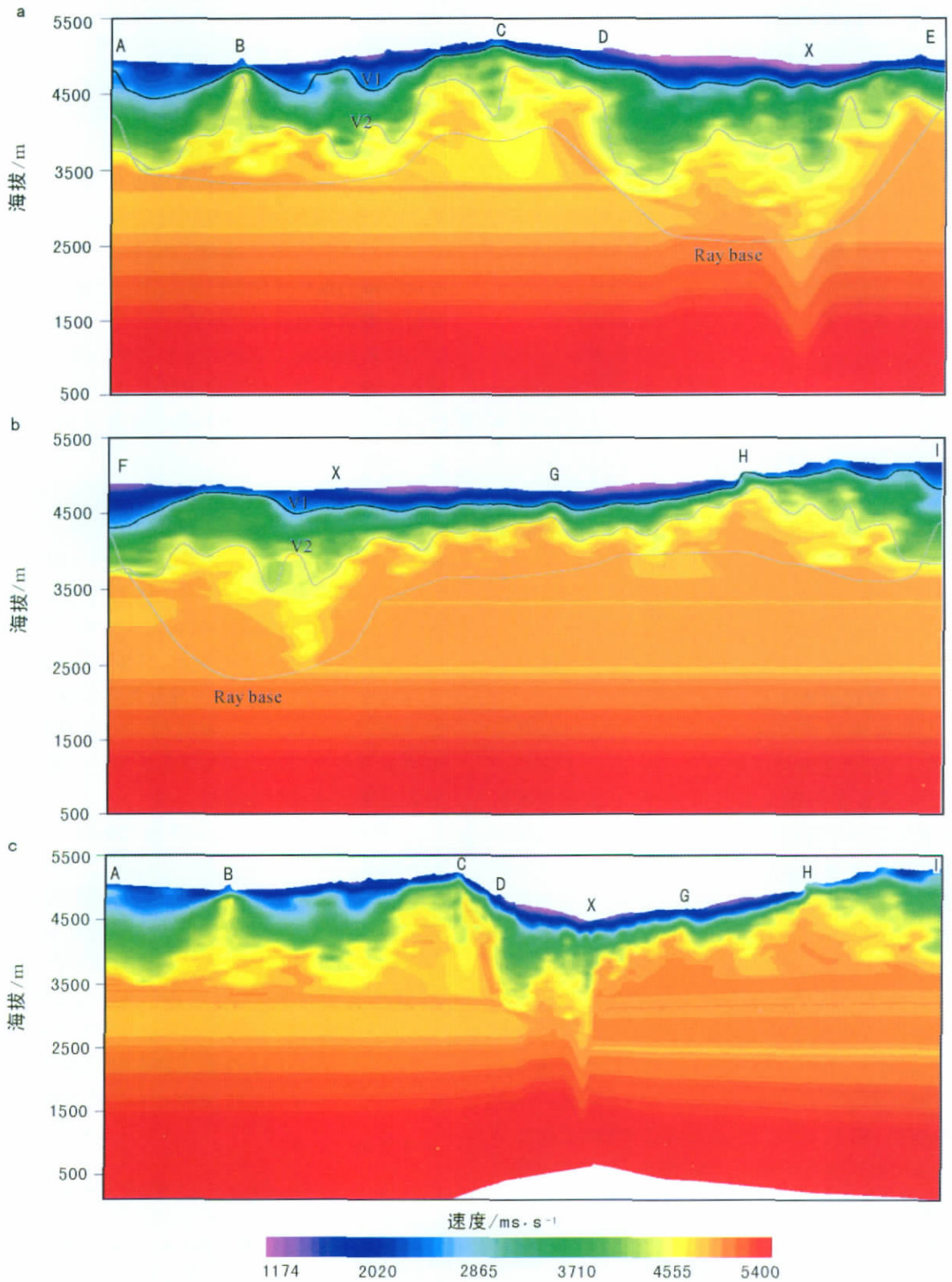

图 4　QT2008 线(a)、QT2007(b)及连线(c)层析反演近地表速度结构图

(图中地形线上的字母在测线中代表的位置见图 1)

Fig. 4　Tomographic near-surface velocity structure of QT2008, QT2007 and their connecting

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

露区,层析结果显示(图 4-a),这些区域地下高速层较薄,测线穿过的其余地方高速层较厚。中央隆起北部 QT2007 线与QT2008 线相交于 X 处,QT2007 线 XF 段与 QT2008 线 XD 段、CB 段中部同处于第四纪沉积物中,对比两处的层析速度结构也可看出相似之处,即低、降速层较厚,并且高速层起伏变化较大。

3.2 断裂构造在层析结果中的显示

地面地质调查表明,断裂活动是羌塘盆地内新生代构造运动的主要表现形式[30]。中央隆起带断层非常发育,2 条地震测线经过的近地表速度结构均显示(图 4-a、b),V1 与 V2 之间就是本区域的高速层分布范围,并且层析成像结果显示,2 条测线交点 X 处地下,是 2 条地震测线初至波走时层析反演射线穿透最深的高速层最厚的部位,有明显的速度异常,似乎指示一条近乎垂直的断裂构造的存在,然而受地表第四系沉积覆盖,该断裂并未出露地表。那么,在层析结构上看到的速度异常,是否就是 Kapp 等[7]指出的双湖以西存在隐伏的冈玛错-双湖(Gangma Co-Shuang Hu)逆冲断裂(图 1),还需反射地震剖面的进一步证实。

3.3 中央隆起近地表速度结构特征

2 条地震测线经过的近地表速度结构均显示(图 4-a、b),中央隆起区存在着 2800 m/s 与 4500m/s 的 2 个速度分界面(分别称为 V1 和 V2),即为本区域高速层的顶界面与底界面。为了得到横过羌塘中央隆起的近地表速度结构,笔者以 V1(图 4-a、b 中的黑线)作为该区高速层的顶界面速度,将相交的地震测线 QT2007 与 QT2008 经闭合处理后,形成了横过羌塘中央隆起的近地表速度结构截面图(图 4-c)。结果显示,纵向上羌塘中央隆起近地表可分为 3 层,第一层是厚 0~100 m、速度为 1100 m/s 的风化层,最薄处在中央隆起北部(HI 段),念青唐古拉山两侧沼泽地带分布较厚;第二层为厚 100~300 m 的降速层,覆于 V1 之上,速度为 2000 m/s,在念青唐古拉山脉两侧(CB 段与 CH)较厚,并在中央隆起北部(HI 段)出露较浅;第三层是高速层,介于 V1 和 V2 之间,速度为 3700 m/s,该层起伏最剧烈,厚度范围 100~1800 m,受表层地质构造单元的控制,在老地层出露处(B、C、D、E、G、H)最薄,地质单元内部(AB、BC、D-X-G、GH、HI)沉积较厚,即高速层的厚度与地表出露岩性的年代呈负相关。

4 几点认识

在复杂地表条件和低信噪比的地区,反射信号往往不清楚,而折射波初至的信噪比是较高的。反射地震中的折射波走时包含着地下浅层的速度信息,是求取表层速度的有效途径。有了近地表的速度分布,就可以在此基础上进行有依据速度场的静校正、波动方程基准面校正和起伏地形叠前深度偏移,并可进行速度各向异性研究[31-33]。限于青藏高原羌塘盆地特殊的地理环境和气候条件,采集到的人工深反射地震信息显得尤为珍贵。

笔者运用石油勘探近地表层析建模工具,利用横过羌塘中央隆起的反射地震数据的初至波走时信息,进行了近地表速度结构层析成像试验研究,得到以下初步认识。

(1)羌塘中央隆起区二维地震测线层析射线密度随地下复杂构造的程度而变化,层析反演得到的速度结构与地表结构存在着良好的对应关系,高速层的厚度与地表出露岩性的年代呈负相关。

(2)近地表结构建模的基础是地震数据,为了得到合理的地震射线分布空间,二维地震测线尽量减少弯线施工。鉴于羌塘中央隆起复杂的地表结构,还应考虑在该区域进行小规模的三维地震勘探试验,以捕捉更多方位角的初至波走时信息,获得更精确的近地表三维速度场结构。

(3)随着地震勘探在深部探测中的广泛应用,利用大药量激发、长排列接收到的深反射地震波初至信息,进行近地表速度结构的层析反演,可以得到丰富的近地表的构造信息。

致谢:中国地质调查局成都地质矿产研究所王剑、谭富文研究员对本研究给予指导与支持,华东石油局第六物探大队为本研究提供了宝贵资料,西南油气勘探开发院德阳分院黄玉静高级工程师在层析建模方面给予指导与帮助,在此一并表示诚挚的谢意。

参考文献

[1]黄继钧.藏北羌塘盆地构造特征及演化[J].中国区域地质,2001,20(2):178-186.

[2]赵政璋,李永铁,王岫岩,等.羌塘盆地南部海相侏罗系古油藏例析[J].海相油气地质,2002,7(3):34-36.

[3]黄继钧,伊海生,林金辉.羌塘盆地构造特征及油气远景初步分析[J].地质科学,2003,39(1):1-10.

[4]Gao R, Lu Z W, Li Q S, et al. Geophysical survey and geodynamic

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

study of crust and upper mantle in the Qinhai－Tibet Plateau [J]. Episodes,2005,28(4):263－273.

[5]方立敏,鲁兵,刘池阳,等.羌塘盆地中部隆起的演化及其在油气勘探中的意义[J].地质评论,2002,48(3):279－283.

[6]Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan－Tibetan orogen[J]. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 2000, 28:211－280.

[7]Kapp Paul, Yin An, Harrison T Mark, et al. Cretaceous－Tertiary shortening, basin development, and volcanism in central Tibet[J].Geological Society of America,2005,117(7/8):865－878.

[8]程国栋,赵林.青藏高原开发中的冻土问题[J].第四纪研究,2000,20(6):521－531.

[9]林伯香,孙晶梅,刘清林.层析成像低速带速度反演和静校正方法[J].石油物探,2002,41(2):136－140.

[10]宋桂桥,尹天奎,刘连升.关于塔里木沙漠区低速带调查重新定位的思考[J].石油物探,2008,47(4):372－375.

[11]常旭,王辉.地震法隐伏矿脉空间定位研究[J].地球物理学报,1998,41(3):408－415.

[12]史大年,吕庆田,徐明才,等.铜陵矿集区地壳浅表结构的地震层析研究[J].矿床地质,2004,23(3):383－389.

[13]冯锐,李晓芹,陶裕录,等.电阻率层析成像用于水文地质勘探[J].地震学报,1997,19(6):655－663.

[14]Andersion D L. Seismic tomography of the Earth′s interior [J]. American Scientist, 1984, 172: 345－359.

[15]Zhao D, Hasegawa A, Horiuchi S. Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath north eastern Japan[J]. J. Geophys. Res.,1992 ,97 :19909－19928.

[16]Zhao D, Hasegawa A, Kanamori H. Deep structure of Japan subduction zones derived from local regional and teleseismic events[J]. J. Geophys. Res. ,1994, 99(B11) :22313－22329.

[17]吴建平,明跃红,叶太兰,等.体波波形反演对青藏高原上地幔速度结构的研究[J].地球物理学报,1998,41(增刊) :15－25.

[18]吕庆田,姜枚,许志琴,等.印度板块俯冲仅到特提斯喜马拉雅之下的地震层析证据[J].科学通报,1998,43(12):1308－1311.

[19]朱介寿,蔡学林,曹家敏,等.中国及相邻区域岩石圈结构及动力学意义[J].中国地质,2006,33(4) :793－803.

[20]郑洪伟,李廷栋,高锐,等.印度板块岩石圈地幔向北俯冲到羌塘地体之下的远震 P 波层析成像证据[J].地球物理学报,2007,50(5):1418－1426.

[21]张雪梅,孙若昧,滕吉文.青藏高原及其邻区地壳、岩石圈和软流层厚度研究[J].科学通报,2007,52(3):332－338.

[22]朱介寿.汶川地震的岩石圈深部结构与动力学背景[J].成都理工大学学报(自然科学版),2008,35(4):348－356.

[23]王海燕,高锐,卢占武,等.地球深部探测的先锋——深地震反射方法的发展与应用[J].勘探地球物理进展,2006,29(1):7－13,19.

[24]Gao R,Li P W, Li Q S, et al. Deep process of the collision and deformation in the northern margin of the Tibetan Plateau?:Revelation from investigation of the deep seismic profiles [J].Science in China (Series D),2001,44(Supp):71－78.

[25]高锐,肖序常,高弘,等.西昆仑－塔里木－天山岩石圈深地震探测综述[J].地质通报,2002,21(1):11－18.

[26]卢占武,高锐,匡朝阳,等.青藏高原羌塘盆地二维地震数据采集方法试验研究[J].地学前缘,2006,13(5):382－389.

[27]张继国,刘连升.复杂区初至层析反演静校正[J].石油地球物理勘探,2006,41(4):382－385,395.

[28]高星.地震层析成像研究的回顾与展望[J].地球物理学进展,2000,15(4):41－45.

[29]薛为平,宋阳,刘居文,等.准噶尔盆地石南地区静校正方法应用研究[J].石油勘探,2006,45(6):615－618.

[30]赵政璋,李永铁,叶和飞,等.青藏高原羌塘盆地石油地质[M].北京:科学出版社,2001.

[31]李家康,余钦范.高陡山区近地表速度的求取[J].石油勘探与开发,2000,27(2):60－64.

[32]张中杰.地震各向异性研究进展[J].地球物理学进展,2002,17(2):281－293.

[33]成谷,马在田,张宝金,等.地震层析成像中存在的主要问题及应对策略[J].地球物理学进展,2003,18(3):512－518.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net