

# 青藏高原北部巴颜喀拉构造带 基底隆起的地震学证据

李秋生<sup>1,2</sup>, 彭苏萍<sup>1</sup>, 高 锐<sup>2</sup>, 范景义<sup>3</sup>

(1.中国矿业大学(北京校区),北京 100083 2.中国地质科学院地质研究所,北京 100037;

3.国土资源部实物地质资料中心,河北 三河 065201)

**摘要** 过去曾笼统地认为巴颜喀拉构造带上万米的堆积主要是三叠系的复理石沉积。通过对沱沱河-格尔木深地震剖面资料的再认识发现,巴颜喀拉构造带的结晶基底埋深仅 5 km 左右,比金沙江断裂带以南的羌塘地块北缘和昆仑山南缘的基底埋藏深度都要浅。进一步对青藏公路以东横穿巴颜喀拉构造带的几条深地震测深剖面进行分析,发现该基底隆起一直顺构造走向延伸,向东贯穿了整个构造带,推测它是扬子古陆块的残余。

**关键词** 青海东南部;巴颜喀拉构造带;基底隆起;地震证据;古陆块

中图分类号:P54.P315.2

文献标识码:A

文章编号:1671-255X(2003)12-0782-07

对巴颜喀拉地体的基底性质争议较大,因此被关注较多。但是对其沉积盖层厚度(基底埋藏深度),过去的认识似乎颇为一致,多数学者笼统地认为上万米的堆积主要是三叠系的复理石沉积。对地体内部基底的起伏变化未给予足够注意。在国家重点基础规划项目“青藏高原形成、演化及其环境、资源效应”(973)的资助下,作者对沱沱河-格尔木深地震测深剖面的资料重新分析,并与相邻的玉树-共和剖面等3条剖面的研究结果进行了横向对比,发现巴颜喀拉地体中、北部的结晶基底顶面相对隆起,与过去的认识不尽一致。沿构造走向追踪,似乎该相对隆起部分在整个地体内形成一个隆起带。本文报道其资料证据,并对其构造意义作简要分析。

## 1 地质构造背景

在青藏高原北部的东昆仑造山带与羌塘地块之间夹持着一个构造带(图1),其北界为阿尼玛卿-昆仑-木孜塔格缝合带(图1,F4),即阿尼玛卿-博卡雷克塔格断裂带<sup>[1]</sup>或木孜塔格-玛沁断裂带<sup>[2]</sup>,或昆仑

山南缘断裂;南界为金沙江断裂带<sup>[3-7]</sup>(图1-F5)。其西部延伸被阿尔金断裂带(图1-ALF)截断<sup>[8]</sup>,东部以龙门山断裂(图1-LMSF)为界与四川盆地相邻,整个构造带的形态呈西部狭长、东部张开的三角形。被称为松潘-甘孜造山带<sup>[2]</sup>或巴颜喀拉地体<sup>[9]</sup>,或松潘-甘孜-可可西里地体<sup>[10]</sup>。巴颜喀拉地体以广泛分布的厚的深海三叠系沉积序列为特点<sup>[11-14]</sup>。地质研究认为,巴颜喀拉地体沉积序列主要形成于中、晚三叠世。晚三叠世以后,全区褶皱升起,沉积发育很少,仅在西段祁漫塔格之南和可可西里山一带发育范围较大的内陆沉积。普遍认为巴颜喀拉三叠系沉积厚度较大,具体说法不一,至少万米以上<sup>[15]</sup>、至少几千米<sup>[10]</sup>等,可能与所指的具体观察地点不同有关。

中生代以前的地层仅出露于其东部和南部边缘地带。Sengor<sup>[16]</sup>提出其下缺失大陆基底,三叠系复理石直接沉积在洋壳之上。中国学者近年在该地体南北两侧曾找到一些震旦纪和下古生代地层,其沉积相和生物组合面貌与扬子地台边缘有一定相似性<sup>[17]</sup>,表明其基底可能属于古扬子陆块的一部分。

收稿日期:2003-07-28;修订日期:2003-10-14

科研项目:国家重点基础研究发展规划项目(编号:G1998040800)资助。

作者简介:李秋生(1958-),男,在读博士,研究员,从事深部地球物理研究。

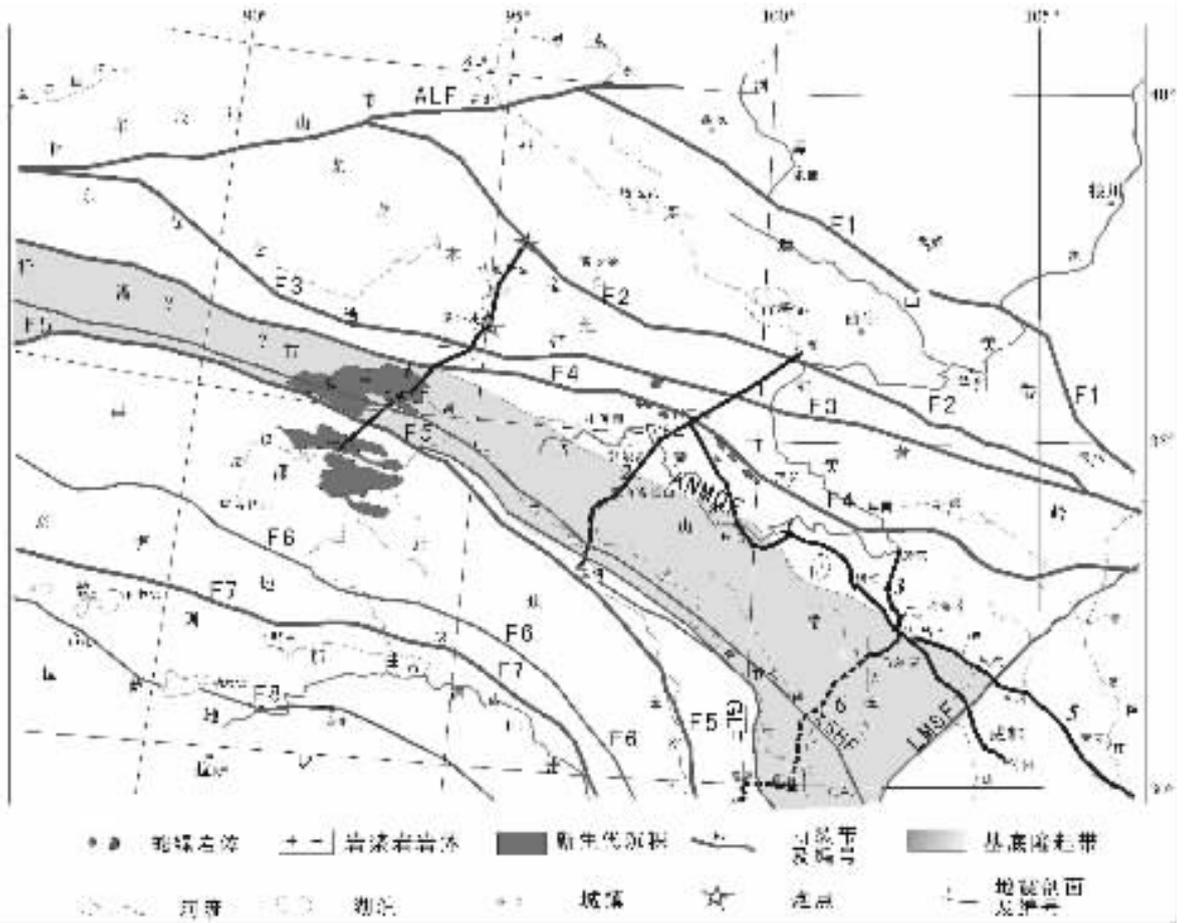


图1 地质构造背景及地震测线位置(底图据参考文献[2])

Fig. 1 Tectonic setting and location of seismic profile

F1—北祁连山缝合带 F2—柴达木北缘缝合带 F3—昆仑中央断裂带 F4—木孜塔格-玛沁断裂带 F5—金沙江缝合带；  
 F6—唐古拉山断裂？ F7—班公湖-怒江缝合带 F8—措勤-嘉黎断裂带 ALF—阿尔金断裂 LMSF—龙门山断裂；  
 1—沱沱河-格尔木剖面(1983) 2—共和-玉树剖面(1998) 3—金川-唐克支线(花石峡-简阳剖面,1987)；  
 4—花石峡-简阳剖面(1987) 5—黑水-邵阳剖面西段 6—奔子栏-唐克剖面(2001)；  
 XSHF鲜水河(炉霍-道孚)断裂带 ANMQF—阿尼玛卿山南断裂？ GLF—甘孜-理塘断裂

## 2 资料与分析

本文主要利用沱沱河-格尔木深地震测深剖面的Pg波资料。涉及沱沱河、楚玛尔和格尔木3幅记录剖面。该剖面原始资料采集于1983年,由中国地质科学院实验地震队完成<sup>[18,49]</sup>。本文的分析主要用到楚玛尔炮向南和向北观测的记录剖面。

楚玛尔炮向两侧接收距离都不大于160 km,所以没有记录到莫霍反射震相,但初至波能量强,震相清晰(图2,上)。楚玛尔炮点两侧的初至波的性质相当复杂,时距曲线形态、视速度变化和能量(振幅)衰减等特点表明它不是单一的Pg波。

早期的解释已经注意到楚玛尔炮点两侧初至波的特殊性,卢德源等<sup>[18]</sup>描述道:“t<sub>1</sub>波组是地壳表层沉积盖层与结晶基底之间界面的回折波,即Pg波……在速度随深度连续变化的介质条件下,Pg波振幅曲线50~70 km范围将出现极大值,在距信号源100 km左右处,其振幅将衰减一个数量级。但本测线观测到的t<sub>1</sub>波组特征与上述研究结果不符。”在最初的一维速度结构模型中,楚玛尔两侧的沉积层厚度为4~5 km。结晶基底层速度为5.9~5.95 km/s,南侧层厚12 km,北侧层厚6~12 km<sup>[18]</sup>。但当时及后来的文献中作者都没有强调巴颜喀拉带中央结晶基底埋藏浅的问题,所以也未引起注意。

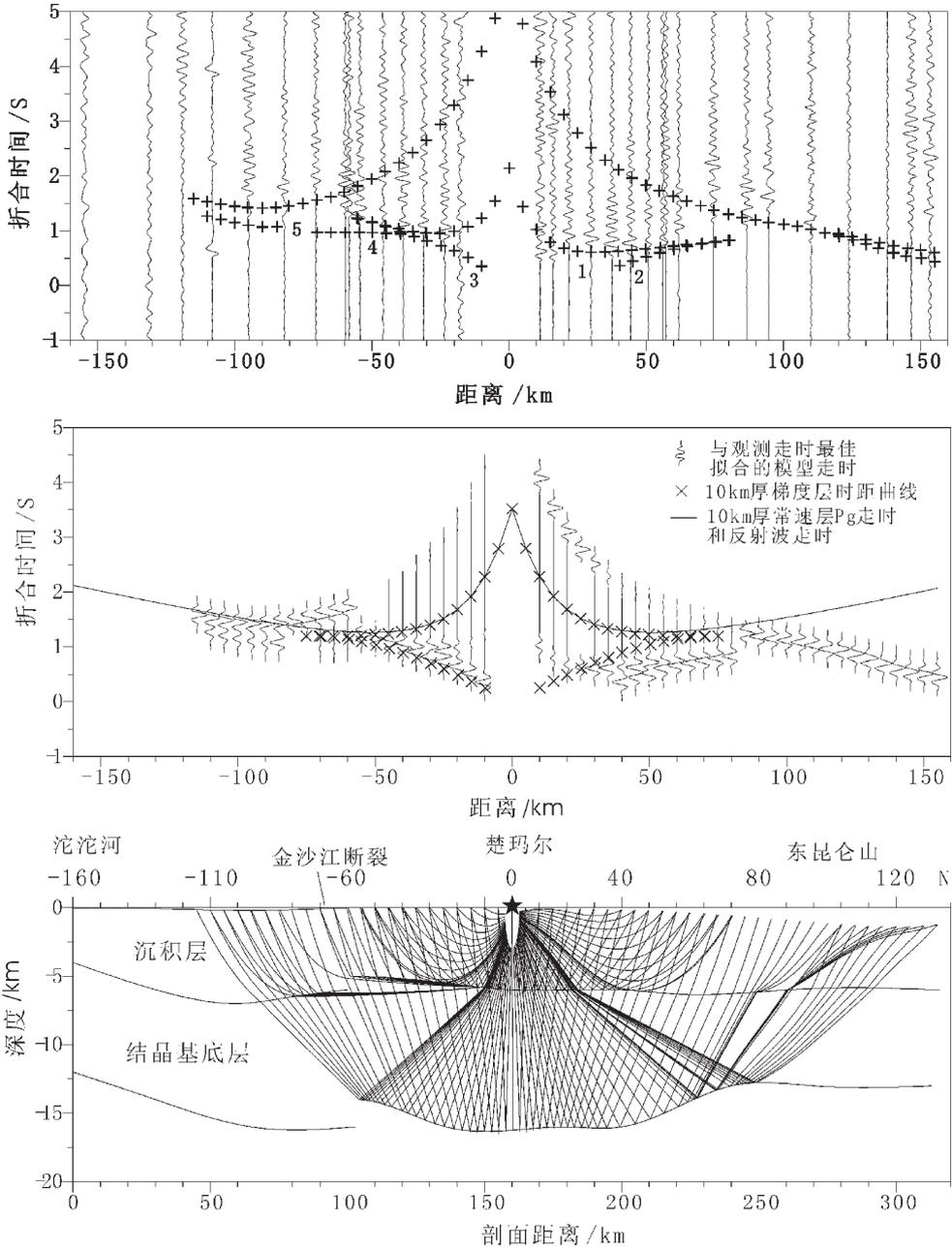


图2 楚玛尔炮记录剖面与射线追踪拟合

Fig. 2 Fitting of the shot recording profile and ray tracing

上图:楚玛尔炮记录剖面;“+”为下图的模型计算的理论走时;中图:由下图模型计算的理论地震图(与实测走时拟合最佳),其中细实线代表10 km厚、层速度5.6 km/s的常速度模型计算的折合走时,明显大于实测走时;“x”代表10 km厚、顶面(地表)速度5.2 km/s、底面速度6.1 km/s的梯度层模型计算的走时,仅炮点左侧与实测数据接近,右侧明显大于实测结果

实际上楚玛尔炮点北侧的初至波折合走时小是非常明显的,其最大值也不超过1s,基本在0.1~0.7s之间,正如稍后的正演拟合所证实的,这样小的折合走时无论如何也无法与10 km厚的沉积层匹配。

楚玛尔炮点北侧的初至波由 $P_1$ 反射波(近炮点0~30 km)(图2上,用1标记)和距炮点40 km后出现并与 $P_1$ 反射波相切的回折波(图2上,用2标记)组成。楚玛尔炮点南侧的初至波更复杂些,由近炮点

的Pg波(图2上,用3标记)、P<sub>1</sub>反射波(图2上,用4标记)和折射波(图2上,用5标记)构成。

沱沱河炮的初至波形态与楚玛尔炮北侧的时距曲线相似,开始是视速度较大的反射波(只有2道记录),紧接视速度小的回折波(P<sub>g</sub>)和第一层反射波,可追踪距离接近100 km。

格尔木炮的初至波由视速度很低的Pg波和一条可追踪距离长达160 km、振幅基本保持恒定的震相构成。振幅长距离保持一定数值以及6.15 km/s的视速度值意味着射线路径上的介质速度较高。卢德源等<sup>[18,19]</sup>认为格尔木炮记录剖面上的初至波组“……是罕见的,在100 km处t<sub>1</sub>波组的到时仅为0.4 s,这也是少有的现象。”他对该现象的解释是射线穿过了高速介质,与我们的看法是一致的。

如果暂不论初至波的成分,一个基本的事实是:楚玛尔炮点初至波折合走时最大值不超过1 s,而沱沱河炮和格尔木炮的初至波折合走时最大值明显都大于1 s。由于未见沉积层速度明显差异,这意味着楚玛尔附近的沉积层厚度要比其南侧的沱沱河地区和北侧的格尔木地区薄。

实际上对初至波进行了细致的区分后,基本上可以确定速度的横向变化不是造成初至波走时的主要原因,初至波提前更多地是受基底相对抬升(意味着上覆的沉积层厚度减薄)的影响。

### 3 计算与结果

我们的最初模型设沉积层平均速度5.6 km/s,结晶基底顶面埋深10 km,但计算的走时曲线明显大于实测值(如图2中的细实线所示)。接着测试了沉积层厚度10 km、速度垂向梯度变化(5.0~6.1 km/s)的一维模型,其模型计算走时在炮点以南与实测值接近,但炮点以北明显偏大(如图2中“×”所示)。经过多次修改模型、反复计算,最终以一个结晶基底顶面埋深6 km左右的二维速度模型(图2下)与实际观测资料达到了最佳拟合(图2上)。模型的理论地震图如图2中的波形图所示,其走时(图2上的“+”)和振幅特点都与实测资料最近似。

### 4 结果与讨论

在我们的模型(图3,剖面1)中,结晶基底顶面埋深明显小于过去认为的深度。其产状是南浅北深,平均5 km,略显北倾。其南端似乎向沱沱河盆地超

覆,北端潜没于东昆仑基底之下(限于篇幅,原始记录和射线追踪拟合图没有给出)。

我们的结果得到重力和航磁资料的佐证:在重力异常图上,巴颜喀拉地体为异常缓变区,异常值介于 $-450 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2 \sim -550 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 之间,平均值为 $-480 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。在重力异常与高程的相关关系统计图上,为一片散点区,既不为负相关(正常)关系,也不是正相关关系<sup>[20]</sup>。我们认为这是基底隆起的反映。在航磁异常图上,巴颜喀拉地体以平缓的正弱磁异常为特征,异常值0~-75 nT。

由图3剖面1的速度等值线分布可见基底之上的沉积层产状相当平缓,受扰动不大,推测该微北倾的基底隆起代表了一个中生代以前的古陆块的残余。实际上沿构造走向可以追踪它的踪迹。

共和-玉树剖面。钱辉等<sup>[21]</sup>的接收函数结果(图3,剖面2),显示巴颜喀拉地区以没有明显的沉积层区别于共和盆地、花石峡和玉树地区。巴颜喀拉山下近地表存在隆起的高密度带(图3,剖面2标有字母B、C),其几何形态与楚玛尔剖面的结果非常接近。XUE Guangqi<sup>[22]</sup>的层析成像结果与接收函数结果基本吻合。作者认为与深部高速体有关。在同一位置的广角地震剖面上,王有学等<sup>[23]</sup>给出的结晶基底顶面埋深却与接收函数和层析成像的结果不尽一致,他给出的结晶基底顶面埋深在巴颜喀拉地块为10 km左右,与过去认为的一致。但是他只提供了沿金沙江缝合带布置的LINE5(近东西向)记录剖面,没有提供横穿巴颜喀拉地体的LINE1(北东向)记录剖面,无法得知实测的Pg波走时如何。但我们注意到王的北东向横剖面的正演模型中给巴颜喀拉一带的沉积层赋予了5.8 km/s的速度值,明显高于两侧沉积层的速度值5.3 km/s。因为介质速度和层厚度是耦合在一起影响地震波走时的,介质速度调整到正常值,结晶基底埋深可能会变浅。

金川-唐克支测线。花石峡-简阳剖面的金川-唐克支测线近南北向布置,与构造走向近于垂直(图1,剖面3)。在速度等值线剖面图上(图3,剖面3),壤口以南,6.0 km/s的速度等值线逐渐向地表抬升,在马尔康-金川一带很浅<sup>[15]</sup>。壤口以北至红原,6.0 km/s速度等值线向下弯曲,与若尔盖地块南缘的深断裂或厚的沉积有关。支测线的北端(唐克)已经进入“若尔盖地块”,那里的结晶基底埋藏很浅。

在花石峡-简阳剖面,北段(花石峡-达日)与构

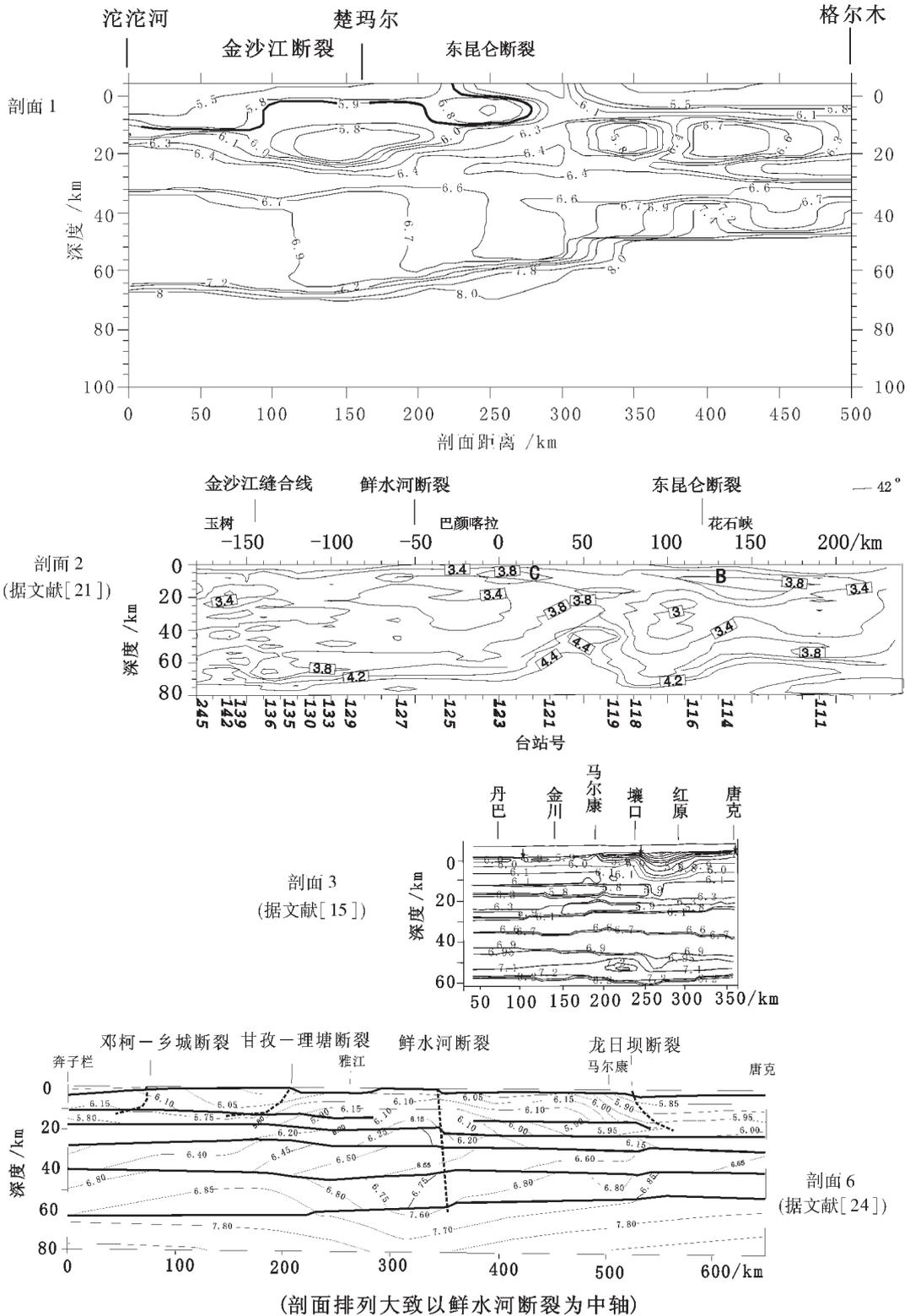


图3 4条垂直构造走向的地震剖面控制的结晶基底起伏状态

剖面1 沱沱河-格尔木剖面的结晶基底顶部深度及起伏状态；  
 剖面2 中法合作共和-玉树剖面接收函数剖面；剖面3 花石峡-简阳剖面金川-唐克支测线的速度等值线剖面；剖面6 奔子栏-唐克剖面地壳结构模型。文中提及的剖面4和剖面5是顺构造走向的测线，此略。各剖面位置见图1

造走向斜交,南段基本沿着构造走向但是有弯曲。崔作舟等<sup>[15]</sup>给出的速度等值线剖面显示,达日西北大约50 km范围代表结晶基底顶面的等值线接近地表。再向北(剖面左为北)存在一个基底凹陷与阿尼玛卿构造带空间位置相对应。崔作舟等<sup>[15]</sup>推测达日以北近地表宽约40 km的高速体与附近隐伏的花岗岩体存在有关。达日东南由于测线向北东方向弯曲,经过“若尔盖地块”南缘,分别在东塔、阿坝和壤口附近之下存在较浅或较深的基底凹陷,与金川—唐克支测线显示的壤口以北至红原的基底凹陷空间位置吻合。再向东到测线的黑水—汶川段,基底抬升,在汶川一带可能出露地表。黑水—邵阳剖面的西段与花石峡—简阳剖面于黑水—汶川段重叠,也显示该段基底隆起。将上述几条地震剖面资料联系起来分析即可发现,各个剖面上的基底隆起不是孤立的、局部的构造现象,它们随构造走向呈带状分布。

奔子栏—唐克测线。奔子栏—唐克剖面<sup>[24]</sup>(图3,剖面4)北段与金川—唐克支测线重合,向南穿过鲜水河断裂和甘孜—理塘断裂,终止在金沙江断裂南侧。该剖面的二维速度结构模型显示,在甘孜—理塘断裂与龙日坝断裂之间,代表结晶基底的速度等值线(6.00~6.10 km/s)几乎接近地表,在两断裂的外侧则明显变深。鲜水河断裂没有限制浅基底向南的发展,而是近垂直切断了基底,说明断裂发生在基底形成之后。

结合区域地球物理资料综合分析后我们认为,巴颜喀拉地体可能存在一个结晶基底相对隆起带(图1中的阴影带)。在沱沱河—格尔木剖面上,上覆的中、新生代沉积层厚度平均5 km左右,楚玛尔炮点以南略厚,至多7 km。巨厚(10 km或更大)的三叠系沉积仅分布于该隆起带的南、北两侧(南沿金沙江断裂,如玉树;北沿阿尼玛卿断裂,如花石峡)。在共和—玉树剖面上,该隆起可能不太显著。但是越接近地体的东部边界龙门山断裂,基底的抬升越显著。这从金川—唐克剖面及与其斜交的花石峡—简阳剖面和黑水—邵阳剖面地段的资料得到证实。该隆起带的结晶基底速度值沿构造走向有一定的横向变化,大体上是由西向东速度呈增大趋势:在楚玛尔炮点附近仅5.8~6.0 km/s,属于结晶程度不高、发育不成熟的基底;在地体的东部,速度值达到6.0~6.1 km/s,为正常的陆壳基底;共和—玉树剖面介于两者之间。由此可见,基底层速度值与洋壳的典型速

度值(7.0 km/s以上)相差甚远,故我们认为,上述结晶基底相对隆起带解释为代表一个古陆块(扬子—华南古陆?)的残余较为合适。

青藏公路以西目前尚无资料,还不知道该基底隆起带是否向西延伸到可可西里腹地。

#### 参考文献:

- [1] 许志琴,杨经绥,陈方远. 阿尼玛卿缝合带及“俯冲—碰撞”动力学[A] 见:张旗主编. 蛇绿岩与地球动力学研究[C]北京:地质出版社,1996.185~189.
- [2] 任纪舜,王作勋,陈炳蔚,等. 中国及邻区大地构造图[M]北京:地质出版社,1997.
- [3] Li C Y, Wang Q, Liu X, et al. Explanatory Notes to the Tectonic Map of Asia [M] Geographical Publishing House, Beijing, 1982.
- [4] Molnar P, Burchfiel B C, Zhao Z, et al. Geologic Evolution of Northern Tibet: Results of an expedition to Ulugh Muztagh [J] Science, 1987, 23: 299~305.
- [5] Burchfiel B C, Molnar P, Zhao Z, et al. Geology of the Ulugh Muztagh area, northern Tibet [J] Earth Planet. Sci. Lett., 1989, 94: 57~70.
- [6] Dewey J F, Shackelton R M, Chang C, et al. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau [J] Phil. Trans. R. Soc. Lond., 1988, A327: 379~413.
- [7] Deng W. The ophiolites of the geotraversers from Yecheng to Shiquanhe [A] In: Pan Yusheng ed. Geological Evolution of the Karakorum and Kunlun Mountains [C] Seismological Press, Beijing, 1996.51~93.
- [8] Pan Y. Regional geologic evolution and conclusion [A] In: Pan Yusheng ed. Geological Evolution of the Karakorum and Kunlun Mountains [C] Seismological Press, Beijing, 1996.263~288.
- [9] 李廷栋,肖序常. 青藏高原地体构造分析 [A] 见:中国地质科学院岩石圈研究中心、地质矿产部地质研究所著. 地质专报五:构造地质地质力学第20号,亚东—格尔木岩石圈地质断面综合研究——青藏高原岩石圈结构构造和形成演化 [C]北京:地质出版社,1996.6~20.
- [10] An Yin, Mark Harrison T. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen [J] Annu. Earth Planet. Sci., 2000, 28: 211~80.
- [11] Rao R, Xu J, Chen Y, et al. The Triassic System of the Qinghai-Xizang Plateau [M] Geological Publishing House, Beijing, 1987.
- [12] Qinghai BGMR (Qinghai Bureau of Geology and Mineral Resources). Regional Geology of Qinghai Province [M] Geological Publishing House, Beijing, 1991.
- [13] Gu X X. Geochemical characteristics of the Triassic Tethys-turbidites in northwestern Sichuan, China: Implications for provenance and interpretation of the tectonic setting [J]

Geochim. Cosmochim. Acta, 1994, 58: 4615~4631.

- [14] Nie S, Yin A, Rowley D, et al. Exhumation of the Dabie shan ultra-high pressure rocks and accumulation of the Songpan-Ganzi flysch sequence, central China[J] *Geology*, 1994, 22: 999~1002.
- [15] 崔作舟, 陈纪平, 吴琴. 花石峡—邵阳深部地壳的结构和构造 [M] 北京: 地质出版社, 1996.
- [16] Sengor A M C. The Cimmerides Orogenic System and the Tectonic of Eurasia[M] *geol. Soc. Amer. spec. paper*, 1984. 198.
- [17] 陈炳蔚, 王恺元, 刘万熏, 等. 怒江—澜沧江—金沙江地区大地构造 [M] 北京: 地质出版社, 1987.
- [18] 卢德源, 陈纪平. 青藏高原北部沱沱河—格尔木一带地壳深部结构 [J] *地质论评*, 1987, 33(2): 122~128.
- [19] 卢德源, 王香泾. 青藏高原北部沱沱河—格尔木地区的地壳结构和深部作用过程 [J] *中国地质科学院院报*, 1990, 21: 227~237.
- [20] 孟令顺. 地壳的重力构造 [A] 见: 中国地质科学院岩石圈中心、地质矿产部地质研究所著. 青藏高原岩石圈结构构造与形成演化 [C] 北京: 地质出版社, 1996. 83~93.
- [21] 钱辉, 姜枚, 薛光琦, 等. 天然地震接收函数揭示的青藏高原东部地壳结构 [J] *地震学报*, 2001, 23(1): 103~108.
- [22] XUE Guangqi, QIAN Hui, JIANG Mei. Studies on the Velocity Structure of Crust-Upper Mantle Beneath Qinghai-Tibet Plateau Using seismic Tomography [J] *Continental Dynamics*, 1999, 4(2): 79~85.
- [23] 王有学, 钱辉. 青海东部地壳速度结构特征研究 [J] *地学前缘*, 2000, 7(4): 568~579.
- [24] 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): 229~241.

## Seismic evidence of the basement uplift in the Bayan Har tectonic belt, Qinghai, and its tectonic significance

LI Qiusheng<sup>1,2</sup>, PENG Suping<sup>1</sup>, GAO Rui<sup>2</sup>, FAN Jingyi<sup>3</sup>

(1. China University of Mining (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

3. Center of Material Geological Data, Ministry of Land and Resources, Sanhe 065201, Hebei, China)

**Abstract:** In the past it is generally thought that the up to 10000 m thick deposits in the Bayan Har tectonic belt are mainly Triassic flysch deposits. A further study of the data from the Tuotuo River-Golmud deep seismic profile reveals that the burial depth of the crystalline basement of the Bayan Har tectonic belt is only ~ 5 km, shallower than that of the basement of the northern margin of the Qiangtang and the southern margin of the Kunlun Mountains south of the Jinsha River fault. In combination of several deep seismic sounding profiles traversing the Bayan Har tectonic belt east of the Qinghai-Tibet Highway, it is found that the basement uplift might extend along the tectonic strike and eastward go through the whole tectonic belt. It is inferred that it represents remains of a ancient continental block.

**Key words:** southeast Qinghai; Bayan Har tectonic belt; basement uplift; seismic evidence; ancient continental block