

赵文津, Mechie J, 冯梅, 等. 祁连山造山作用与岩石圈地幔的特型结构构造[J]. 中国地质, 2014, 41(5): 1411–1423.  
Zhao Wenjin, Mechie J, Feng Mei, et al. Cenozoic orogenesis of the Qilian Mountain and the lithosphere mantle tectonic framework beneath it[J]. Geology in China, 2014, 41(5): 1411–1423(in Chinese with English abstract).

# 祁连山造山作用与岩石圈地幔的特型结构构造

赵文津<sup>1</sup> Mechie J<sup>2</sup> 冯梅<sup>3</sup> 史大年<sup>4</sup> 薛光琪<sup>4</sup>

宿和平<sup>4</sup> 宋洋<sup>1</sup> 杨宏伟<sup>1</sup> 刘志伟<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 德国地球科学研究中心(GFZ); 3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100037; 4. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

**摘要:**本文探讨了祁连山地壳增厚与造山机制。提出新生代以来,由于印度地块向北推进,其延迟的远程效应使祁连地块内 4 条断裂再次活动,特别是 23 Ma 以来,分阶段的活动使上地壳缩短了 30%, 40 km 厚的祁连地壳增加到 57 km 厚;并通过柴达木地块下地壳物质的挤入,使祁连地块地壳厚度增加到现今的 60~74 km;地壳质量基本平衡表明其下部地壳物质横向迁移较小,即走滑断裂带走的地壳物质较少。依据 INDEPTH-V 新的宽频地震调查成果,提出祁连地块下岩石圈地幔的复杂结构,南部来的昆仑岩石圈地幔(双层结构)与北部向南俯冲的阿拉善地块下的亚洲岩石圈地幔在祁连地块深部相碰撞,而柴达木—祁连岩石圈地幔则被保存在昆仑岩石圈与亚洲岩石圈地幔碰撞带之上,共形成一倒三角汇聚区;在柴北缘与中祁连北缘岩石圈地幔各出现一条北倾和南倾的正转换震相,可能是老俯冲带残存岩片的显示;在祁连地块岩石圈地幔的两端地壳底部还出现有“双“莫霍”现象”,地表见有多条榴辉岩带。以上结果构成了高原最具特色的构造区。

**关键词:**祁连地块;地壳增厚;岩石圈地幔;“双莫霍”;倒三角结构

中图分类号:P552;P542 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2014)05-1411-13

## 1 问题的提出

祁连山地区位于青藏高原最北部。北邻河西走廊及阿拉善地块,海拔约 1500 m,南邻祁连山主峰海拔 5547 m,高差达 4000 m 以上(图 1 中红线范围)。

分布在柴达木盆地北缘与河西走廊之间的祁连地块,平均宽度约 250 km,东西走向长约 600 km。地表普遍出露元古宙至早古生代的老地层及古造山作用的构造堆积体。地震测深方法求得的现今地壳厚度在 60~70 km,较地球的 PREM 模型

(即“初步参考地球模型”,见《地学大辞典》)给出的大陆地壳平均厚度增厚了近 1 倍。现今 GPS 观测结果表明,垂直祁连山走向祁连地块地壳每年缩短仅为  $(5.5 \pm 1.5) \text{mm}^{\text{a}}$ ,仅是藏南地区的 1/10。祁连山是一个古生代晚泥盆世形成的陆-陆碰撞造山带,现今为新生代青藏高原的北部边缘大山,新生代以来它抬升了没有? 如果抬升了,是何时抬升的? 地壳增厚的时间、方式与机制? 在地壳缩短过程中青藏高原及亚洲的岩石圈地幔的走向? 这些问题与高原北部地区大地震的活动有关。本文就这些问

收稿日期:2014-04-16;改回日期:2014-07-18

基金项目:中国地质调查局项目“青藏高原深部结构探测与地壳活动特征”(1212010511809)及“青藏高原深部过程与资源环境效应研究”(1212011220903)资助。

作者简介:赵文津,男,1931 年生,研究员,中国工程院院士,从事勘探地球物理和深部探测研究;E-mail: xzwzwj@sina.com。

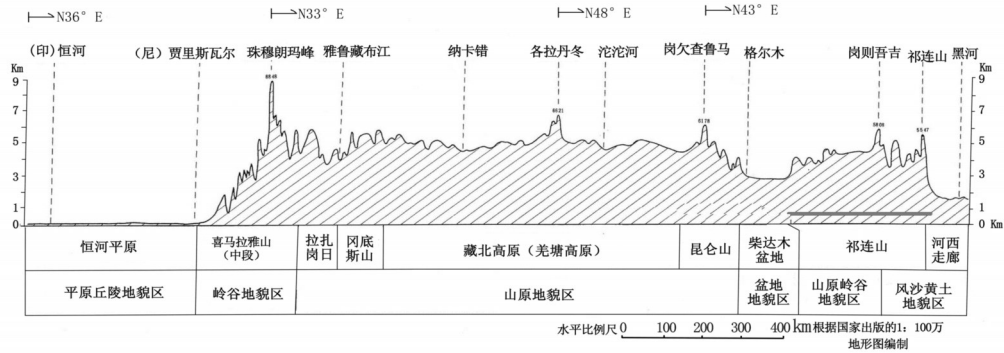


图1 青藏高原(恒河平原—河西走廊)地势剖面图  
Fig.1 The relief section of the Tibetan Plateau (Ganges R. Plain—the Hexi Corridor)

题进行探讨,欢迎同行给予赐教。

## 2 祁连地块的基本地质构造格架

图2和图3分别为许志琴等编制的祁连山地质构造平面图与剖面图<sup>[2]</sup>。图中北祁连俯冲杂岩带沿北祁

连南缘托莱山一线分布,包括有蛇绿岩、混杂堆积及高压变质带。蛇绿岩套中辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 533 ~ 568 Ma<sup>[3]</sup>,分为上岩片(基性超基性岩)及下岩片(奥陶纪火山岩),由北向南推覆,是始特提斯大洋岩石圈向南仰冲所致。

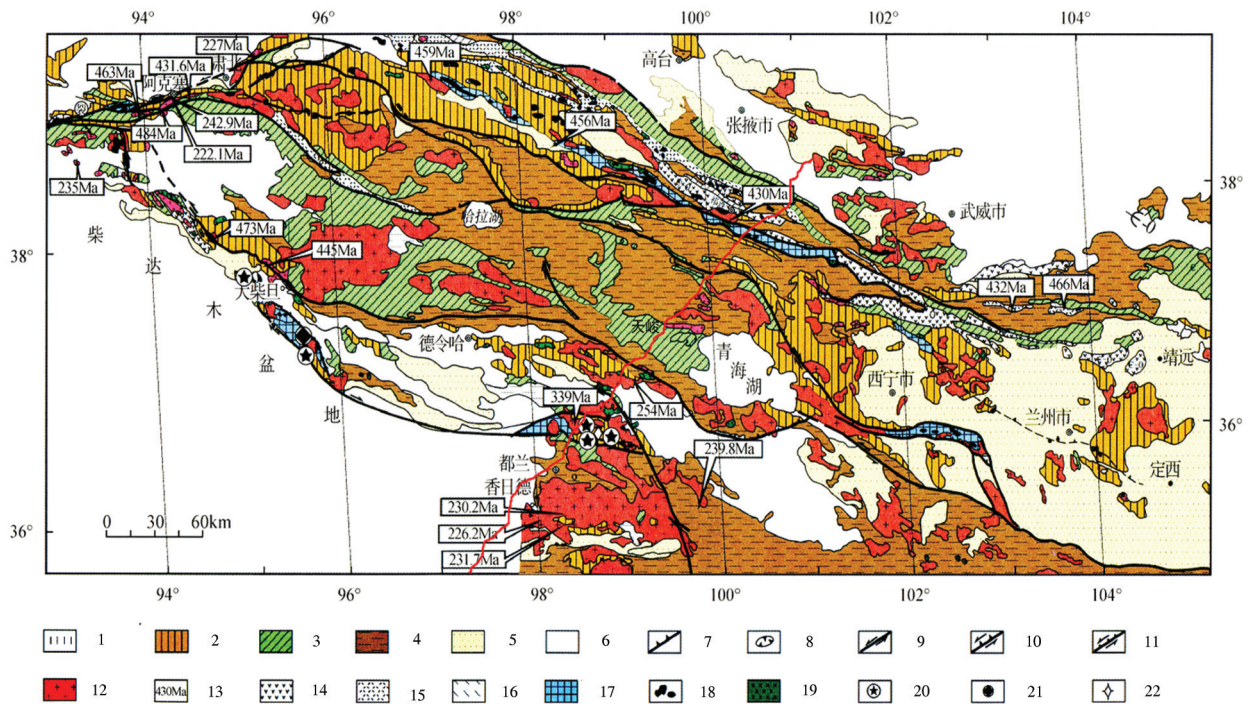


图2 祁连山带构造地质平面图<sup>[2]</sup>  
1—太古宙构造层;2—元古宙构造层;3—早古生代构造层;4—泥盆纪—三叠纪构造层;5—侏罗纪—新近纪构造层;6—第四系;7—逆冲断层;8—推覆体;9—平移断层;10—挤压转换断层;11—伸展转换带;12—花岗岩;13—同位素年龄;14—寒武纪—奥陶纪火山弧;15—奥陶纪弧后盆地;16—志留纪残留盆地;17—俯冲杂岩带;18—超基性岩;19—辉长岩;20—榴辉岩;21—石榴子石橄榄岩;22—柯石英

Fig.2 Tectonic geological map of the Qilian Mountain<sup>[1]</sup>

1—Ar Syntem; 2—Pr, Syntem; 3—Pz, Syntem; 4—D-T Syntem; 5—J-R Syntem; 6—Quaternary; 7—Thrust; 8—Nappe; 9—Strike-slip fault; 10—Pressure transform fault; 11—Extensional transform belt; 12—Granites; 13—Isotopic age; 14—c-O volcanic arc; 15—O back-arc basin; 16—S residual basin; 17—Subducting complex; 18—Ultrabasic rocks; 19—Gabbro; 20—Eclogite; 21—Garnet peridotite; 22—Coesite

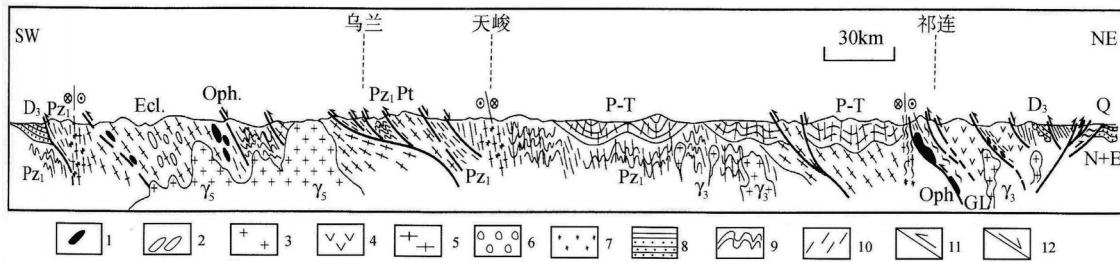


图3 祁连山带构造剖面图<sup>[3]</sup>(剖面位于图2中NE-SW向红色线条)

1—超基性岩;2—榴辉岩;3—花岗岩;4—岛弧火山岩;5—片麻岩;6—泥盆纪磨拉石;7—糜棱岩;  
8—砂页岩;9—褶皱;10—劈理;11—逆断层;12—正断层

Fig.3 The tectonic section across the Qilian Mountain<sup>[3]</sup>

1—Ultrabasic rock;2—Eclogite;3—Granite;4—Island arc volcanic rock;5—Gneiss;6—Devonian molasse;7—Mylonite;8—Sandstone-shale;9—Fold;  
10—Cleavage;11—Thrust;12—Normal fault

中祁连亚地块分布有大面积的三叠纪地层。

南祁连亚地块则以大面积早古生代地层分布为特征,并有同碰撞造山及后造山S型花岗岩侵入,柴达木大花岗岩体年龄为444 Ma(SHRIMP U-Pb法测定结果)。在北祁连南缘、中祁连南缘及柴北缘分别存在1条蛇绿岩带,都是4亿年以前的老缝合带残留。新生代沉积仅在局部存在。

肖序常等(2000)<sup>[3]</sup>将祁连地区从北向南划分为10个构造单元(图2):

(1)河西走廊过渡带。为北山阿拉善地块的一部分;(2)祁连山前断裂。又称昌马断裂,或称北祁连北缘逆掩断层。(3)北祁连构造带。带内出露大面积前寒武纪变质结晶基底,上覆有震旦系浅变质岩系,并有洋、陆壳残块的混杂堆积带和兰片岩和蛇绿混杂岩出现。(4)北祁连缝合带(或称中祁连北缘断裂)。有超基性岩、基性岩、放射虫硅质岩及深海复理石层,为早古生代大陆俯冲混杂岩块堆积带。(5)中祁连亚地块。前寒武系结晶基底及早古生代晚期花岗岩体分布在野马南山—疏勒南山—煌源一带,上有寒武系—奥陶系、志留系复理石岩系沉积,以及上古生界至三叠系沉积。(6)中祁连南缘断裂。沿断裂有基性、超基性岩零星地分布。它主要在早古生代发生和活动,晚古生代时继续活动,并控制着哈拉湖—青海湖一带的沉积,早中生代时出现由北向南的逆冲的片理化和挤压破碎现象。(7)南祁连亚地块。有早古生代中酸性侵入体大量分布,也有早中生代花岗岩类侵入。古生代奥陶系与志留系广泛分布,不整合地超覆于东部

前寒武系之上;物源来自为柴达木、阿尔金及塔里木。(8)南祁连南缘断裂(SQLS,或称宗务隆山断裂)。为祁连地块与柴达木盆地的分界线,可能发生在中生代早期,韧性剪切带先为向北陡倾斜的逆冲断裂,后变为右行平移走滑。(9)欧龙布鲁克断块。位于南祁连南缘断裂与柴北缘断裂之间。古元古界结晶基底(达肯大板群)广泛出露,上为稳定型的震旦系—寒武系,下、中奥陶统海相碎屑岩、碳酸盐岩组合,上泥盆统为红色砂砾岩夹中酸性火山岩,不整合于下古生界之上。石炭系为海陆交互相含煤沉积。中生界及新生界为陆相碎屑岩。许志琴<sup>[1]</sup>将其分成两部分,北部为欧龙布鲁克地块归为祁连地块,南部为柴北缘早古生代火山岛弧带及俯冲杂岩带。(10)柴北缘断裂。沿赛什腾山、绿梁山、锡铁山南侧分布,由多条断裂组成,有基性、超基性岩分布,K-Ar法测定年代为490 Ma。柴北缘为早古生代火山岛弧带及俯冲杂岩带。此外,沿柴北缘大柴旦、鱼卡、锡铁山、都兰带等还有早古生代榴辉岩体分布。

### 3 关于祁连地块新生代构造活动及地壳缩短量的讨论

Andrew Zuza,尹安等<sup>[4]</sup>横穿祁连山中部沿哈拉湖—河西走廊北东走向作了一条地质剖面(1:50,000,图4),以研究新生代以来祁连—南山地块地壳的缩短情况。揭示了本区内新生代的断层主要是北倾的逆冲断裂,走滑运动量很小。逆冲断裂将高级变质基底和奥陶纪陆缘弧糜棱岩推到古生代—新生

代地层之上。利用石炭系与基底岩层之间的一个区域性不整合面,做为岩层构造恢复的标志,通过区域平衡剖面法,作者估算了上部地层最小缩短量在30%。

张培震等<sup>[1]</sup>利用GPS测量的结果,提出跨越祁连山沿NNE-SSW方向地壳发生缩短,速率仅为5.5 mm/a;这样,从6 Ma或8 Ma开始隆升计算,祁连山地壳缩短量分别为33 km和44 km。而An Z.S.等<sup>[9]</sup>估算的横跨祁连地块地壳缩短量为32~35 km,它与6 Ma以来地壳缩短量是一致的。按照祁连地块西部宽度为300 km计算,缩短32~44 km,相当于缩短了10%~15%。与上述尹安等估计的新生代以来缩短量小了50%。另外的50%缩短量应是从古近纪初到6 Ma B.P.的缩短量。

张培震等<sup>[1]</sup>提出祁连地区在新生代的早、中期已经开始隆起成山,6~8 Ma的缩短仅仅是最新一期构造变形。

笔者引证了George等<sup>[6]</sup>在祁连山西端用磷灰石裂变径迹热年代学方法的研究结果,认为冷却事件(构造隆升)发生在10~20 Ma B.P.; Wang<sup>[7]</sup>、Yue等<sup>[8]</sup>根据沉积地层的制约,提出祁连山在14~16 Ma B.P.时开始隆升; M Divier等<sup>[9]</sup>根据柴达木盆地和河西走廊盆地沉积速率的加快,认为祁连山在8~10 Ma B.P.开始隆升;袁道阳<sup>[10]</sup>则强调北部变形是从印度大陆与欧亚大陆碰撞时开始的,在15 Ma时变形加快,也可能是从20 Ma开始的。这些认识均表明20~6 Ma期间地壳已经缩短了。

袁道阳等<sup>[11]</sup>给出祁连地块内第四纪构造平面及剖面图(图5~6),在北东向区域构造应力作用下,地壳发生了NE向挤压缩短、右行走滑及左行走滑构造活动,并导致一些地块向SEE方向的挤出构造活动,但没有对挤压缩短量做出估计;认为第四纪断裂是在老断裂的基础上再活化形成的。

从崔作舟、李秋生等给出的祁连地块地壳速度

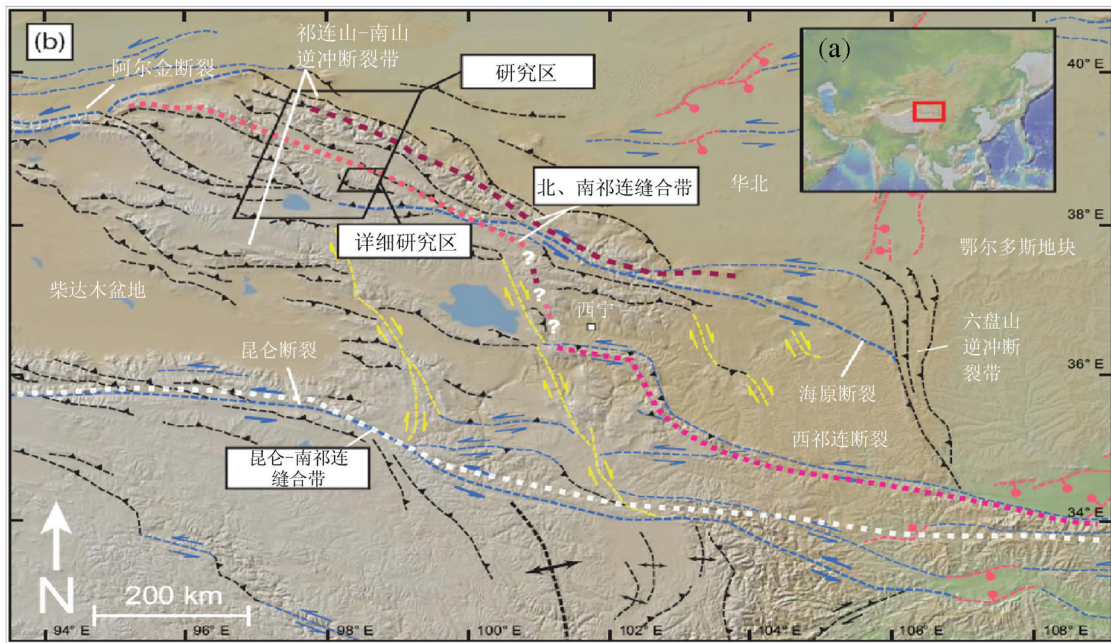


图4 祁连地区新生代活动构造图

断裂系分3组:黑色线条代表逆冲断裂,其中北祁连北缘逆冲断裂西为向南倾斜,其他多为向北倾斜;蓝色线条近EW向为左行走滑断裂为主,黄色线条代表了NW走向右行断裂;赭色和红色道画线代表了祁连地块北部的北、南2条蛇绿岩缝合带,并认为有1条右行走滑断裂,将南部蛇绿岩缝合带的东段向南错开到青海湖的东南部

Fig.4 The Cenozoic structural map of the Qilian Mountain region

Fault system is divided into three groups: Black lines represent the thrusts, in which the west of the northern margin of the North Qilian thrust tilts southward, the others mostly dip northward. Blue lines in nearly EW direction are sinistral strike-slip faults, and yellow lines represent the NW-striking right-slip faults. The other and red lines represent north and south ophiolite suture zone of the North Qilian block. There is a dextral strike-slip fault, and the eastern part of the southern ophiolite suture shifted southward to the southeast of the Qinghai Lake

结构剖面<sup>[12]</sup>(图7)可以解读出以下几个问题:

(1)北山—阿拉善地块地壳厚度为46 km,为3层结构:表层,4.0~5.0 km/s, 5.9~6.3 km/s及6.5~6.75 km/s。其中6.75~8.1 km为很窄的梯度层;按照前新生代祁连、北山、阿拉善地块都处于长期被剥蚀状况看,这一地块的厚度可以作为祁连地块前新生代的厚度。

(2)北祁连地块,包括北祁连活动陆缘增生带及俯冲杂岩带,速度剖面上显示地壳厚度为50~60 km,北浅南深;表层为4.0~5.0 km/s层,约6 km

厚;第二层为6.2 km/s速度层,厚度约为12 km,南厚北薄;第三层为低速层,速度为6.1 km/s均速层,厚度为11 km;第四层为6.35~6.6 km/s,厚度为11~12 km/s,第五层速度为6.6~6.8 km/s,厚度为20 km。6.9~8.1 km/s梯度层很薄。地壳总厚度达60 km。

(3)中南祁连地块的特点是,除表层为4.0~5.0 km/s一层,约6 km厚,第二层和第三层,即从4~30 km深,速度为5.9~6.1 km/s,属相对低速区,向南北伸展可达100 km,按速度为典型花岗质岩浆岩体及

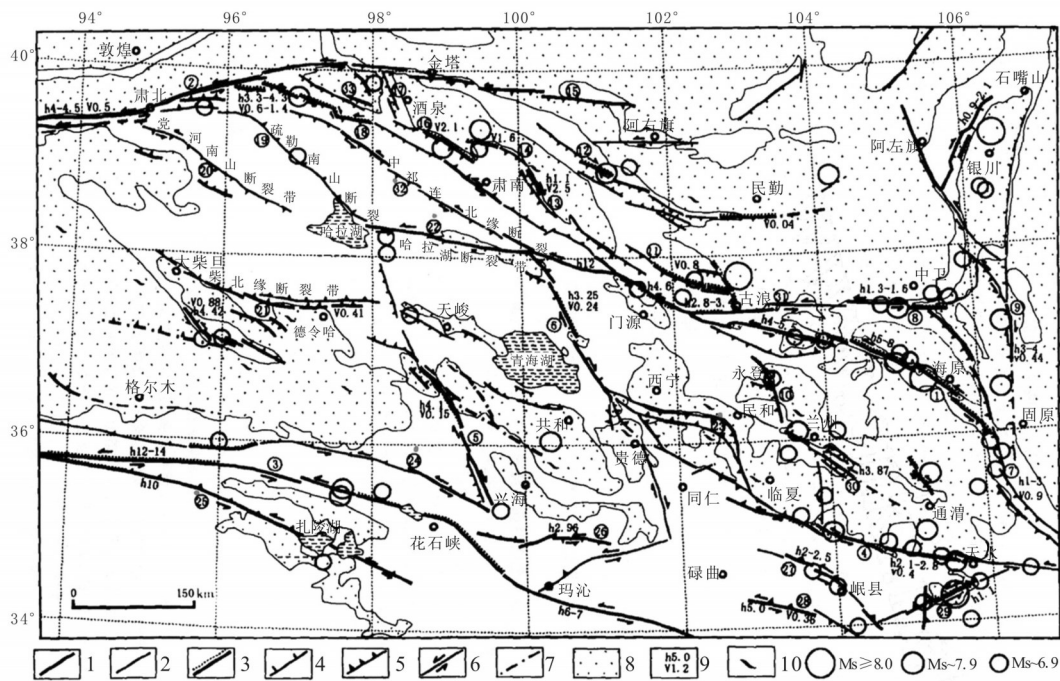


图5 祁连地区第四纪活动构造平面图<sup>[11]</sup>

- 1—全新世断裂;2—晚更新世断裂;3—地震破裂带;4—正断裂;5—逆断裂;6—走滑断裂;7—隐伏断裂;8—新近纪—第四纪盆地;9—水平和垂直滑动速率;10—活动褶皱;①—海原—祁连山断裂带;②—阿尔金断裂带;③—东昆仑断裂带;④—西秦岭北缘断裂带;⑤—鄂拉山断裂带;⑥—热水—日月山断裂带;⑦—六盘山东麓断裂带;⑧—香山—天景山断裂带;⑨—罗山东麓断裂带;⑩—庄浪河断裂带;⑪—皇城—双塔断裂带;⑫—龙首山北缘断裂带;⑬—榆木山东缘断裂带;⑭—榆木山北缘断裂带;⑮—北大山断裂带;⑯—佛洞庙—红崖子断裂带;⑰—嘉峪关断裂带;⑱—昌马断裂带;⑲—疏勒南山断裂带;⑳—党河南山断裂带;㉑—柴达木盆地北缘断裂带;㉒—哈拉湖断裂带;㉓—拉脊山断裂带;㉔—昆中断裂带;㉕—江错断裂带;㉖—中铁断裂带;㉗—临潭—宕昌断裂带;㉘—迭部舟曲断裂带;㉙—礼县—罗家堡断裂带;㉚—马街山北缘断裂带;㉛—天桥沟—黄羊川断裂;㉜—中祁连北缘断裂带;㉝—玉门断裂带

Fig.5 The Quaternary active tectonics map of the Qilian region<sup>[11]</sup>

- 1—Holocene fault; 2—Late Pleistocene fault; 3—Earthquake rupture zone; 4—Normal fault; 5—Thrust; 6—Strike-slip fault; 7—Buried fault; 8—Neogene-Quaternary Basin; 9—Horizontal and vertical slip rate; 10—Active fold; ①—Haiyuan-Qilian fault; ②—ATF; ③—East Kunlun fault; ④—Northern margin fault zone of the Western Qinling; ⑤—Ngola Mountain fault zone; ⑥—Reshui-Riyueshan fault zone; ⑦—Liupanshan Mountain fault zone; ⑧—Xiangshan-Tianjingshan fault zone; ⑨—Luoshan Mountain east fault zone; ⑩—Zhuanglang River active fault zone; ⑪—Huangcheng-Shuangta fault zone; ⑫—The north fringe of Longshou Mountain fault zone; ⑬—Elm eastern marginal fault zone; ⑭—Elm northern marginal fault zone; ⑮—Beida Mountain fault zone; ⑯—Fodon temple-Hongyazhi fault zone; ⑰—Jiayuguan fault zone; ⑱—Changma fault zone; ⑲—Shule Nanshan fault zone; ⑳—Danghenan Mountain fault zone; ㉑—Northern margin of Qaidam Basin fault zone; ㉒—Hara Lake fault zone; ㉓—Lajishan fault zone; ㉔—Middle Kunlun fault zone; ㉕—Jiang Cuo fault zone; ㉖—Zhong-Tie fault zone; ㉗—Lintan-Tanchang fault zone; ㉘—Diebu Zhouqu fault zone; ㉙—Lixian-Luo Jia Bao fault zone; ㉚—Northern margin of Maxianshan fault zone; ㉛—Tianqiaogou Huangyangchuan fault zone; ㉜—Northern margin of Middle Qilian fault; ㉝—Yumen fault

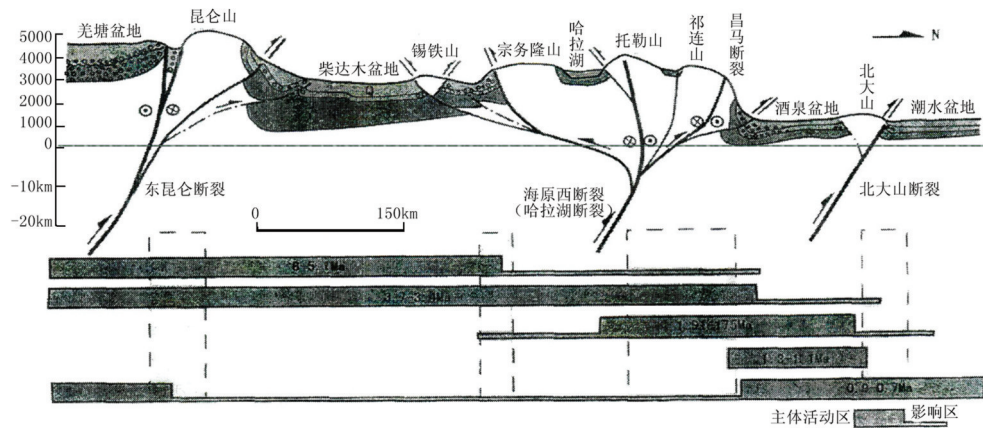


图6 祁连地区第四纪活动构造演化剖面图<sup>[11]</sup>

第四纪深部活动断裂主要有1条,即海原西断裂(或称哈拉湖断裂,深度在20~10 km);它向上形成5条逆冲活动断裂,其中向北2条(南倾),向南2条(中祁连南缘与南祁连南缘断裂,北倾),产出很陡,分布深度都在4000 m以内,将老地层都推到地表

Fig. 6 The Quaternary active tectonics evolution map of the Qilian region<sup>[11]</sup>

Major active Quaternary faults—West Haiyuan fault (or Hara lake fault, 10 ~ 20 km in depth). It thrusts upward to form five active faults, including the northward two faults (south-dipping) and other southward two faults (the south margin of middle Qilian and the south Qilian fault, dipping northward), very steep, and the distribution depth is within 4000 m, with the old strata being pushed to the surface

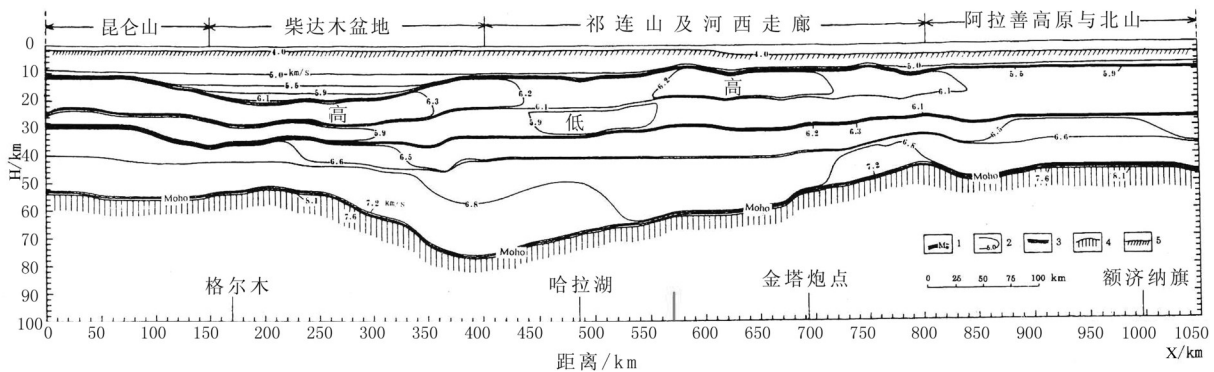


图7 格尔木—额济纳旗剖面地震测深(广角地震)速度结构图<sup>[12]</sup>

1—莫霍面;2—纵波速度等值线(km);3—地壳分层界线;4—上地幔盖层;5—地表低速层

Fig.7 The velocity structure map in Golmud – Ejin DSS section<sup>[12]</sup>

1—Moho;2—P-wave velocity contours (km); 3—Ayered crust boundary;4—The uppermost mantle;5—Lower velocity layer at the surface

老结晶基底的反映,地表见到的是柴达木大花岗岩体(年龄为444 Ma)及多个岩体分布,向东南断续出露;应为老花岗岩体的反映;在96°E~98°E与38°N南北为大片布格重力低(达 $-430 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ),表明这一地区地壳最厚;剩余重力异常则有正有负,大体上呈近东西向条带状分布。这里局部剩余正重力异常值得重视。崔作舟<sup>[12]</sup>将这一中地壳的低速区推测为部分熔融层的显示。

(4) 中南祁连地块下低速体两侧速度界限分明,

可能反映了2条深断层的存在,它们与图6中推测的宗务隆山与托勒山断裂相当,但深度加深,相互关系也不同。

按照上述分析,祁连地块地壳缩短30%,以原地壳厚度为40 km计,则地壳厚度应增加到60 km,现祁连地块地壳厚度为60~74 km,平均为67 km,这样还差约7 km厚的地壳。从速度层厚度变化趋势看,祁连地块中地壳的厚度相对稳定,而结晶基底以上地层及下地壳增厚明显,这样,短缺的7 km

地壳应当主要来自下地壳的增厚,并分布在柴北缘与南祁连南缘下面。

这里,祁连地块的下地壳分成两部分,南部为6.8~7.2 km/s速度物质,北部为6.6~6.8 km/s速度物质,前者与柴达木地块下地壳有关。

(5)关于柴达木地块与昆仑地块下20~30 km深度区间的5.9 km/s速度层,为相对低速层,与最新完成的INDEPTH-IV广角速度结构剖面<sup>[13]</sup>中的速度层十分一致,我们推测它代表了松潘—甘孜地块(或称可可西里,或称巴颜喀拉地块)下的洋壳残片堆积层。向北这一层收尾于柴北缘南部,没有向北伸展到祁连地块之下。

(6)40~52 km深度的下地壳层其速度分布横向上也分成四段,北祁连地块下为6.6~6.8 km/s,而中南祁连下为6.6~6.8及6.8~8.1 km/s两层,柴达木地块下则为6.8~8.1 km/s一层;下地壳从柴达木地块北部加厚,在柴北缘与南祁连区间达到最深达到70 km多,在北祁连也达到60 km。

## 4 祁连地块下的岩石圈地幔的厚度及其构造特征

为什么在柴北缘—南祁连南缘地带出现莫霍界面深凹?青藏、印度及亚洲三种岩石圈地幔在祁连山下是如何分布及其相互构造关系?下面将依据我们新做的接收函数成像结果并综合了其他研究成果探讨这些问题。

### 4.1 新的D-Z剖面

D-Z剖面位置见图8<sup>[14]</sup>,共24个地震台站。

由冯梅与P. Kumar等给出经不同滤波处理的PRF成像图及SRF成像图<sup>[14]</sup>。图9和图10为D-Z剖面经过>5.34 s和>1.34 s低通滤波的PRF成像结果。

这两张图由于滤波不同而呈现不同的特征。低通频率提高后,正、负转换震相显示更为清楚。

### 4.2 关于岩石圈地幔(LM)的厚度、结构与构造

(1)图10显示的莫霍层深度与前述广角地震、重力反演得出的莫霍层深度<sup>[12]</sup>是一致的。即在柴达木地块(QDM)下莫霍深度在50 km左右,在祁连地块(QL)下为60~70 km(南端),河西走廊下为<50 km。

(2)笔者<sup>[13]</sup>推断图11中黑色箭头所示的红色震相代表了亚洲岩石圈地幔(ALM)向南可伸展到36°

N,达到110 km深度。冯梅等认为红色震相是因为ALM上有一层5 km厚的各向异性层引起的(用模拟方法确定的),其下相应的蓝色震相为岩石圈与软流圈界面(LAB)。

(3)在36.6°N~36.9°N和38.0°N~38.4°N之间,莫霍震相上又有一条红色震相,深度为48 km左右,与雅鲁藏布江缝合带(YZS)上出现的“双莫霍”震相现象相类似。

(4)莫霍界面在昆仑地块(KL)下错动了20 km,在金沙江缝合带(JSS)之下有10 km错动。

(5)关于岩石圈地幔(LM)的厚度,按图11显示河西走廊为50 km,即莫霍界面与LAB界面间距,QL地块则为45 km。

由于图10中在50~150 km深度区间成像图案太复杂而难以确定LAB位置。为此,我们利用文献[15]的结果。它是穿过祁连地块的7个地震台站数据PRF及SRF成像结果,其中L1、L2剖面给出的柴达木与昆仑地块下莫霍界面及LAB界面均较清楚,L2与D-Z剖面位置基本一致,L1剖面位于L2之西。依此推论祁连地块下岩石圈地幔厚度为50 km左右,柴达木地块下为30 km或60 km(有2个蓝色震相),昆仑地块下为50 km左右。厚度估计误差在5 km左右。

(6)关于亚洲岩石圈地幔(ALM)向南俯冲延伸。

图12-b中33°N~36.5°N区间140 km深处出现的向南俯冲伸展的红色转换震相为文献[16,17]中ALM向南俯冲的证据。我们在文献[13]中已对其作了讨论,4点理由表明它是干扰波,而不是ALM存在的标志。

在文献[17]中的SRF成像图上也未见到这一震相,这进一步验证了我们的推断。

鉴于河西走廊的岩石圈地幔应从祁连山前断裂(QST),即相当于38.8°N而不是38.2°N处开始向南俯冲加深的,这样,冯梅等<sup>[14]</sup>原先解释为俯冲的亚洲岩石圈地幔(ALM)则应当另选更北部的一条红色震相。考虑到每个台站所能控制的范围,笔者选择了38.8°N处的一条红色震相作为ALM标志,它向南延伸到了37.2°N;38.2°N处则相当于中祁连北断裂,这一红色转换震相是否意味着这里深部还存在1条老的残存的LM俯冲带,值得进一步探讨。从图10看,这一老的俯冲岩石圈地幔可能仅仅保存

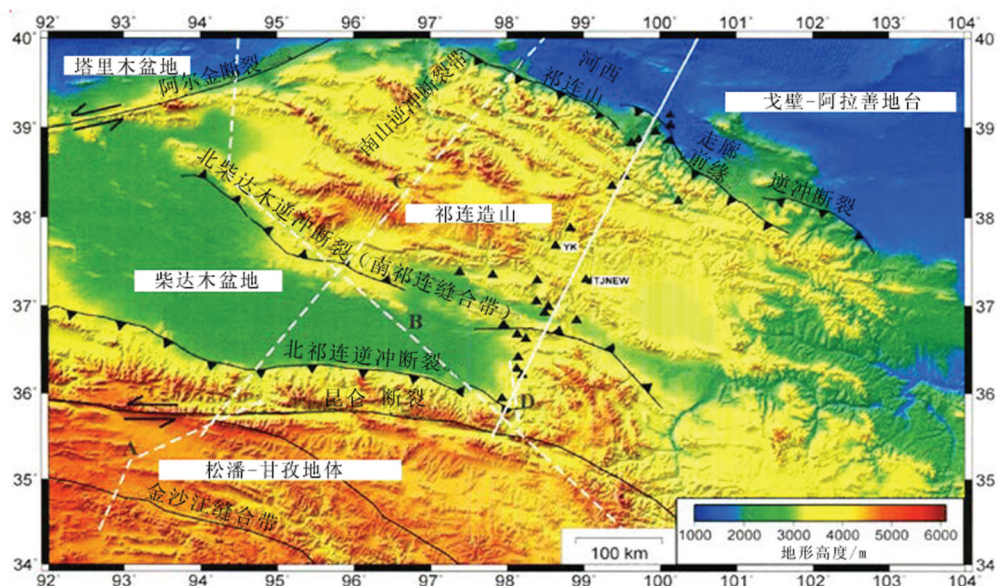


图8 都兰—天峻—张掖(D-Z)剖面位置  
 独立的黑三角星代表台站位置,台站共有24个,分布在98°E~100°E;  
 带黑三角的黑线代表了断裂,三角指向代表了断裂倾向

Fig.8 Location of the Dulan-Tianjun-Zhangye (D-Z) section

Single black triangle star represents station location. 24 stations, located between 98°E~100°E. Black line with black triangles represents the thrust, and the direction of triangle represents the fracture tendency

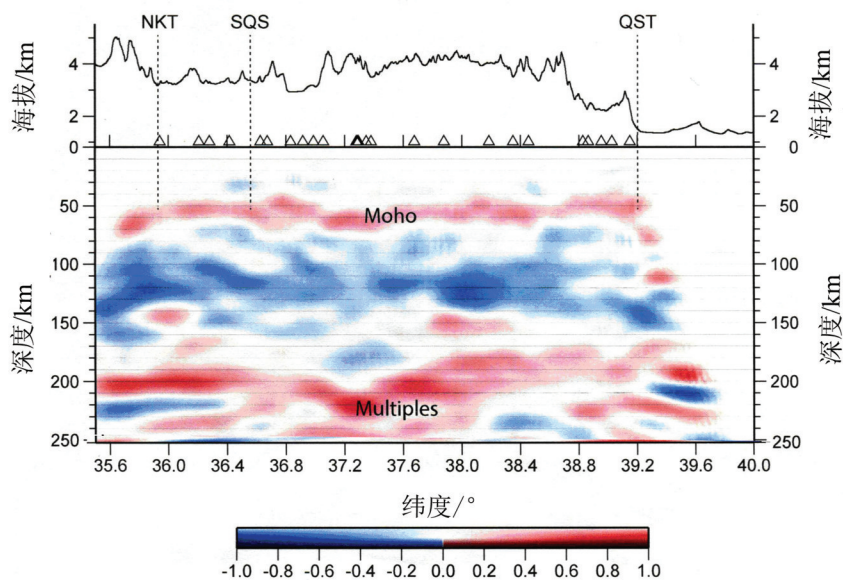


图9 都兰—天峻—张掖(D-Z)剖面的PRF偏移成像图<sup>[14]</sup>

用24个台站,1265条射线经低通(>5.34s周期)滤波后,以单点散射法及简化IASP91速度模型求得  
 SQS—南祁连断裂;QST—祁连山北缘断裂;NKT—北昆仑逆冲断裂

Fig.9 The PRF migration image of Dulan - Tianjun - Zhangye (D-Z) section<sup>[14]</sup>

The result is obtained from 24 stations, 1265-rays (low pass filtering > 5.34s), by using the method of a single point scattering and simplified velocity model

SQS-South Qilian fault;QST-Northern margin of the fracture in Qilian;NKT-North Kunlun thrust



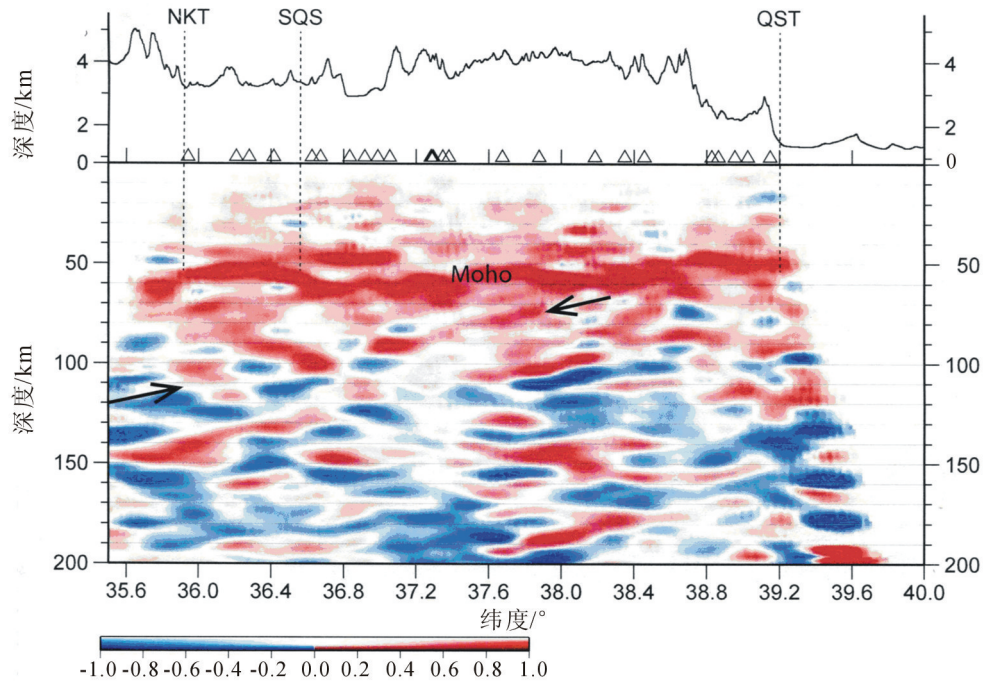


图10 都兰—天峻—张掖(D-Z)剖面的PRF偏移成像图<sup>[13]</sup>  
 经过低通(>1.34 s)滤波的PRF成像图,图中黑色箭头指示的红色转换震相,  
 推测为ALM顶部转换震相。其下100 km深处蓝色震相为LAB界面

Fig. 10 The imaging figure of PRF (low pass filtering > 1.34 s)

The black arrows indicate the red conversion phases. Presumed to be at the top ALM conversion phases, the blue phases under the depth of 100 km constitute LAB interface

在37°N, 85 km深处。河西走廊的亚洲岩石圈地幔的厚度在50 km以上,其下界面,即LAB的显示并不清楚。

此外,在柴北缘也存在一向北俯冲的红色转换震相,有一定长度,可能与38.2°N中祁连山向北俯冲的红色转换震相相似(即原冯梅等推测的ALM震相),也应是柴北缘老的向北俯冲带遗迹的显示。

(7)从柴达木地块南缘向北俯冲下去的2条红/蓝色震相的条带,即从35.6°N, 70 km深处向北俯冲下去的两对红/蓝色震相条带,各有20~30 km厚,达36.8°N,深度到120 km,并将向南俯冲的ALM截住,按照文献[13],这2条转换震相是经过昆仑地块下的印度岩石圈地幔(ILM),它截住了向南俯冲的亚洲岩石圈地幔(ALM),然后两者进入软流圈之内。

图10中也有同样现象。两条红/蓝色转换震相对(pairs)从昆仑山地块下伸展到柴达木盆地南缘后开始向北俯冲,这与昆仑山深部的LM两者在深度、总厚度,以及双层结构上都一致。图12-d展示了昆仑山LM厚度为60 km双层结构,它向北伸展到QDM之下,与图12的红/蓝色转换相位可能连接在一起。

Yue等<sup>[15]</sup>也发现昆仑地块莫霍震相之下几十km深处出现一条向北缓倾斜的连续的红色转换震相(图13),解释为俯冲的拉萨地块的岩石圈或者较早的沿班公—怒江缝合带俯冲下去的大洋岩石圈的残留岩片。笔者认为这一红色转换震相与图12-d中32°~36°N之间140 km深处出现的红色震相一致,再向北则与QDM南缘向北俯冲下去的两对红/蓝色震相条带相对接,它应当是从南部伸展过来的

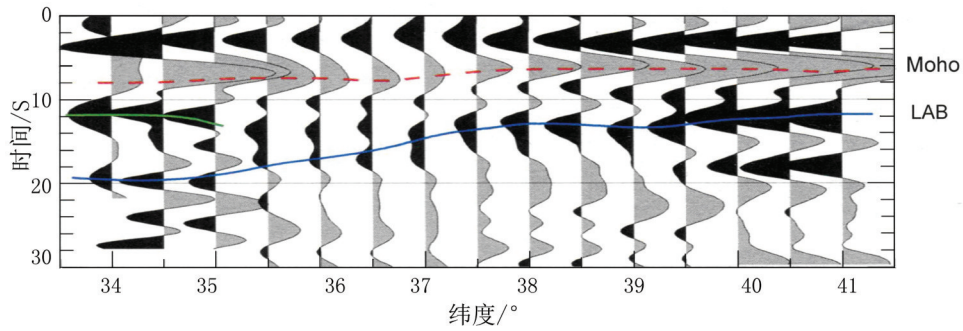


图 11 都兰—天峻—张掖(D-Z)剖面的SRF偏移成像图<sup>[13]</sup>  
应用了S与SKS波的513条射径。图中时深1s相当于7.92 km/s

Fig.11 The SRF migration image of Dulan-Tianjun-Zhangye (D-Z) section<sup>[13]</sup>  
513 radio paths of S and SKS waves were used. In the picture 1s of time-depth is equivalent to 7.92 km / s

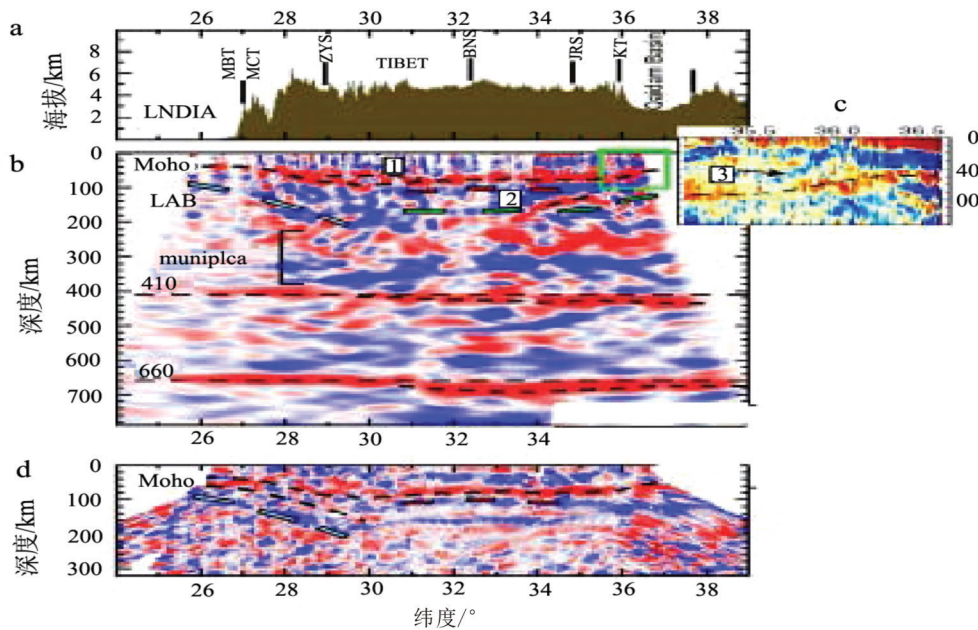


图 12 INDEPTH-IV的PRF与SRF成像结果<sup>[13,14]</sup>

a—剖面地形高程；b—PRF成像图；c—PRF局部放大图，  
b—右上角的绿色方框中上部红色转换震相代表了KL、QDM的莫霍界面；  
认为其下面粗绿色线条代表了亚洲地幔岩石圈，向南倾斜延伸到200 km深，  
d—图为SRF成像图，图中未见深部的红色震相，但高原下出现两个红/蓝震相对，代表了成双层结构的地幔岩石圈，  
从雅鲁藏布江缝合带向北伸展出去

Fig.12 The imaging of PRFs and SRF<sup>[13,14]</sup>

a— Terrain elevation; b— PRFs' imaging ; c—An enlarged view of part of the PRFs' imaging; d - SRFs' imaging; The red conversion phases in the upper right corner in Fig. b represent the KL, QDM s' Moho. The thick green line below represents another Moho, presumably Asian lithospheres' mantle, extending southward to the depth of 200 km. But there are no southward red phases in the SRF' imaging. There are two red/blue phase pairs, which may represent the lithospheric mantle under the Kunlun Block, extending northward

印度岩石圈地幔。

(8)柴达木地块下的LM,深度变浅,但向北有所加深,并在36.8°N达到最深,这是沿D-Z剖面的结果,而图7所示的地学大断面在其西北,LM最深

处则位于38°N,即居洪图与哈拉湖之间。祁连缝合带(SQS)应在大约37°N处加深。QDM地块下LM厚度为30 km或60 km(有两个蓝色震相),但从图10上,显示2层累计厚度也有60 km。

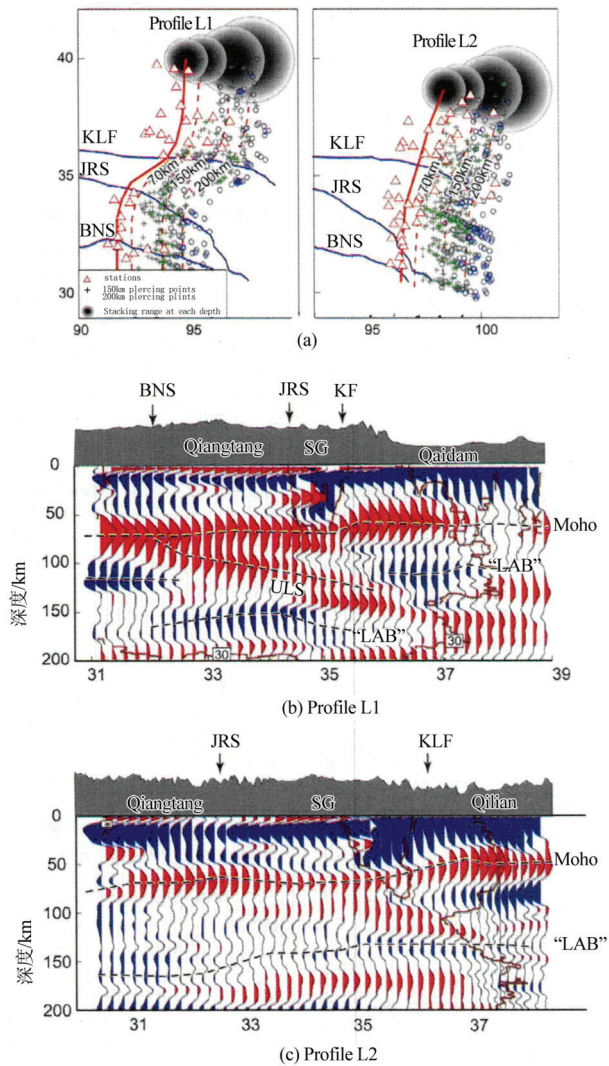


图 13 SRF 用地震射线穿过地壳的不同深度穿刺点及剖面 a—这些穿刺点都投影在两条 N-S 向东倾的剖面上,以使叠加数据最多。粗红线代表剖面在地表位置,细短道线代表在不同深度的剖面位置,上面的黑圆确定不同深度叠加高斯权重的范围;图 13-b 和图 13-c 分别为沿 L1 和 L2 剖面 SRF 共中点叠加剖面。棕色弯曲的边界线圈定了超过 30 条接收函数叠加的区域,可作为可靠性的指标;黑色点线表示莫霍的位置,大洋板片的残片顶部,或者是俯冲的拉萨地体的岩石圈板片(ULS),负的界面可能与岩石圈-软流圈(LAB)有关

Fig.13 Piercing points of S wave receiver functions at different depths

The piercing points were projected on two NS-trending east-dipping profiles to maximize the amount of stacked data(a). Thick red solid lines show the profile location at the surface and the thin dashed red lines show the profile position at various depths. The black circles determine the range for Gaussian weight stacking at different depths. (b and c) SRF CCP stacking results for the profiles L1 and L2. The brown curved boundary delineates the area where more than 30 receiver functions are stacked and serve as a reliability indicator. The black dotted lines show the location of Moho, the top of the remnant oceanic slab or the underthrust Lhasa terrane lithosphere slab (ULS), and the negative interface may be associated with the lithosphere-asthenosphere-boundary (LAB)

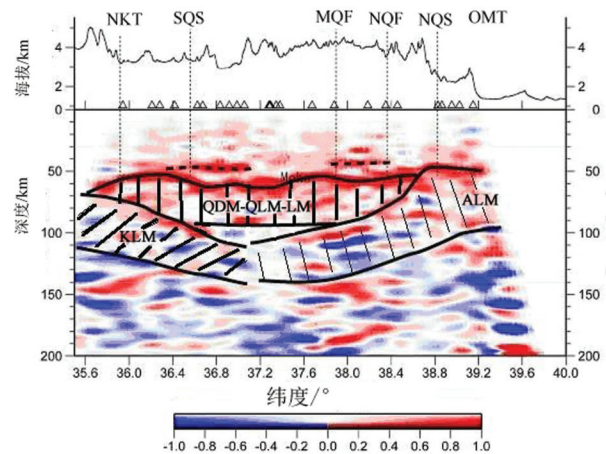


图 14 柴达木—祁连地块下岩石圈地幔结构与构造 KLM 结构是 2 条红色、2 条蓝色转换相位,与文献[16, 17]结果一致; ALM 是按照北山地区 ALM 为 50 km 厚,并考虑到相位特点绘制的,它显示了也是 2 条红色、2 条蓝色转换相位,但比 KLM 结构要复杂一些;柴达木—祁连地块下岩石圈地幔,上界面很清楚,下界面则考虑到其 LM 的厚度及其下的蓝色转换相位,但其内部结构更复杂,可能包括老的俯冲带残存结构;37.2°N、100 km 深度区间应是 KLM 与 ALM 碰撞带。100 km 以下属于软流圈的范围,红色和蓝色相位可能是其内部复杂结构的显示

Fig.14 The lithospheric mantle structure and tectonics of Qaidam-Qilian Block

KLM is two red and two blue conversion phases, consistent with the references[16,17]. ALM is 50 km in thickness that is drawn by taking into account the phase characteristics. The two are also two red and two blue conversion phases, having more complex structure than KLM. The interface is very obvious in the Qaidam - Qilian lithospheric mantle, but the lower interface is more complex and may include remnants of the old structure of subduction zones. It should be KLM and ALM collision zone at 37.2° N, 100 km depth interval, the asthenosphere is beneath 100 km or less. The red and blue phases may show the complex internal structure

(9)关于祁连地块下岩石圈地幔。从上述分析得出的厚度是 50 km 左右,祁连地块与柴达木地块下的岩石圈地幔应当处于印度岩石圈地幔(ILM)与亚洲岩石圈地幔(ALM)之上的区域,由于其间存在着 1 条老的祁连俯冲带而使成像复杂化。

(10)依据上述分析,笔者给出祁连—柴达木地块下岩石圈地幔的结构构造如图 14 所示。

## 5 结 论

(1)关于祁连地块地壳增厚了不到 1 倍。从宏观上看,祁连地块地壳与南部柴达木地块和北部北山地块地壳对比,祁连地壳厚度增加主要在上地壳层与下地壳层。推测新生代时地壳表层与上地壳缩短增厚 30%,其余增厚 20%应是在下地壳层,它应是

在新生代以后发生的。

(2) 祁连山地区岩石圈地幔的结构分3部分:南部的昆仑岩石圈地幔 KLM(或是印度岩石圈地幔 ILM)与北部的亚洲岩石圈地幔 ALM 于 37. 2°N、100 km 深度区间相会聚与碰撞;而柴达木与祁连地块的岩石圈地幔(4亿年以前老的俯冲带残存岩片结构)保留下来,三种岩石圈地幔一起形成一个倒三角的独特的岩石圈地幔结构;在亚洲岩石圈地幔三角区的两端地壳底部还出现“双莫霍现象”,即“双震相”现象,成为高原上最具有构造特色地区之一。在祁连地块南北的缝合带上部也出现了“双莫霍现象”与榴辉岩带。

(3) 区内的祁连地块地壳内部结构构造、速度变化调查工作还不足,浅层断裂产出还需要做进一步研究;岩石圈地幔内部分层现象比较突出,与残存的老的俯冲带岩片应进一步加以确认,这可能有利于研究前新生代以及更老的造山带结构。

**感谢:** 本文在成文过程中万天丰教授、胡道功研究员等专家给予了很好的建议,匿名审稿专家提出许多很好的修改意见,帮助提高本文质量,徐立、张景华二位同事在文字图件组织上作了很多工作,在此一并表示感谢。

### 参考文献(References):

- [1] 张培震,郑德文,尹功名,等. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论[J]. 第四纪研究, 2006, 26(1): 7-8.  
Zhang Peizhen, Zheng Dewen, Yin Gongming, et al. Discussion on Late Cenozoic Growth and Rise of Northeastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(1): 7-8 (in Chinese).
- [2] 许志琴,杨经绥,李海兵,等. 造山的高原——青藏高原的地体拼合、碰撞造山及隆升机制[M]. 北京:地质出版社, 2007.  
Xu Zhiqin, Yang Jinsui, Li Habing, et al. Orogenic Plateau-Terrane Amalgamation, Collision and Uplift in the Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007(in Chinese).
- [3] 肖序常,李廷栋,等. 青藏高原的构造演化与隆升机制[M]. 广州:广东科技出版社, 2000.  
Xiao Xuchang, Li Tingdong, et al. Tectonic Evolution and Uplift Mechanism of the Tibet Plateau[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2000(in Chinese).
- [4] Andrew Zuza, Robin reith, An Yin, et al. Structural and Tectonic Framework of the Qilian Shan-Nan Shan Thrust belt, Northeastern Tibetan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 84.
- [5] An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased up lift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene times[J]. Nature, 2001, 411:62-66.
- [6] George A D, Marshallsea S J, Wyrwoll K H, et al. Miocene cooling in the northern Qilian Shan, northeastern margin of the Tibetan Plateau, revealed by apatite fission-track and vitrinite-reflectance analysis[J]. Geology, 2001, 29 (10): 939-942.
- [7] Wang Erchie. Displacement and timing along the northern strand of Altyn Tagh Fault Zone, Northern Tibet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 150 (1/2): 55-64.
- [8] Yue Y, Ritts B D, Graham S A. Initiation and long-term slip history of the Altyn Tagh Fault. International Geology Review, 1999, 43: 1-7.
- [9] M Divier F, Gaudemer Y, Tapponnier P, et al. Northeastward growth of the Tibet Plateau deduced from balanced reconstruction of two depositional areas: The Qaidam and Hexi Corridor basin, China[J]. Tectonics, 1998, 17 (6): 823-842.
- [10] Yang Yuan dao, Ge Weipeng, Chen Zhenwei, et al. The growth of northeastern Tibet and its relevance to large-scale continental geodynamics: A review of recent studies[J]. Tectonics, 2013, 32: 1358-1370, doi:10.1002/tect.20081.
- [11] 袁道阳,张培震,刘百麓,等. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换[J].地质学报, 2004,78(2): 272.  
Yuan Daoyang, Zhang Peizhen, Liu Baichu, et al. Geometrical imagery and tectonic transformation of late Quaternary active tectonics in northeastern margin of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Acta Geological Sinica. 2004,78(2): 272(in Chinese).
- [12] 崔作舟,李秋生,孟令顺,等. 格尔木-额济纳旗岩石圈结构与深部构造[M]. 北京:地质出版社, 1999.  
Cui Zuozhou, Li Qiusheng, Meng Lingshun, et al. The Lithosphere and Deep Structure in the Golmud-Eji Qi [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999(in Chinese).
- [13] 赵文津,吴珍汉,史大年,等. 昆仑山深部结构与造山机制[J]. 中国地质, 2014, 41(1): 1-18.  
Zhao Wenjin, Wu Zhenhan, Shi Danian, et al. Deep structure and orogenic mechanism of Kunlun Mountains[J]. Geology in China, 2014, 41(1): 1-18(in Chinese with English abstract).
- [14] Feng M, Kumar, P Mechie, et al. Structure of the crust and mantle down to 700 km depth beneath the East Qaidam basin and Qilian Shan from P and S receiver functions[J]. GJI, 2014.
- [15] Han Yue, Y John Chen, Eric Sandvol. Lithospheric and upper mantle structure of the northeastern Tibetan Plateau[J]. J. G. R., 2012, 117, B05307, doi:10.1029/2011JB008545.
- [16] Kind R, Yuan X, Saul J, et al. Seismic images of crust and upper mantle beneath Tibet: Evidence for Eurasian plate subduction[J]. Science, 2002, 298:1219-1221.
- [17] Zhao W, P Kumar, J Mechie, et al. Tibetan plate overriding the Asian plate in central and northern Tibet[J]. Nature—Geoscience Letter Published Online: 30 October 2011, DOI: 10.1038/NGEO1309.

## Cenozoic orogenesis of the Qilian Mountain and the lithosphere mantle tectonic framework beneath it

ZHAO Wen-jin<sup>1</sup>, Mechie J<sup>2</sup>, FENG Mei<sup>3</sup>, SHI Da-nian<sup>4</sup>, XUE Guang-qi<sup>4</sup>, SU He-ping<sup>4</sup>,  
SONG Yang<sup>1</sup>, YANG Hong-wei<sup>1</sup>, LIU Zhi-wei<sup>1</sup>

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Deutsches GeoForschungsZentrum—GFZ, Sections “Geophysical Deep Sounding” and “Seismology”, Potsdam, Germany; 3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 4. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

**Abstract** : Based on the DSS (Deep Seismic Sounding) and BB (Broad Band Earthquake seismograms) research along the INDEPTH-IV line accomplished in 2013, the authors investigated the crustal thickening and orogenic mechanism of the Qilian Mountain, and revealed 4 faults in the block which was reactivated by the distant effect induced by the Indo-Asia collision since Cenozoic, especially since 23 Ma. The upper crust was shortened by about 30%, and hence Qilian crust 40km in thickness was thickened to 57 km. The lower crust was thickened by the intrusion of the Qaidam lower crust, which caused the variation of the crust thickness of Qilian Block from 57 km to the present 60 – 74 km. According to the P-wave receiver function (PRF) image, the authors obtained the Lithosphere Mantle (LM) Tectonic Framework beneath the Qilian Block, which comprises four parts: the southern part was from the southern Kunlun Block of 60km thickness with a two-layer structure and subducted northward, whereas the northern one was from Alxa Block with a thickness of 50 km and subducted southward. Both of them collided beneath the Qilian Block at the depth of 120 km. The other two parts are the Qaidam and Qilian blocks, with the relic texture of two old sutures. All of the four lithosphere mantle sections constructed a reverse delta structure. On the two old sutures (north fringe of the Qaidam Block and north fringe of the Middle Qilian Sub-Block), the authors found “two double phase” phenomenon, and also revealed two eclogite belts at the ground surface along the suture zones.

**Key words**: Qilian Block; active fault; crust thickening; Lithosphere Mantles Tectonic Framework; reverse delta structure

---

**About the first author**: ZHAO Wen-jin, male, born in 1931, senior researcher and academician, engages in the research on exploration geophysics and the survey of the Earth's deep interior; E-mail: xzwzwj@sina.com.