

青藏高原东北缘岩石圈缩短变形

——深地震反射剖面再处理提供的证据

高锐^{1,2)}, 王海燕^{1,2)}, 王成善³⁾, 尹安⁴⁾, 张玉修³⁾,
李秋生^{1,2)}, 郭彤楼⁵⁾, 李文辉^{1,2)}

1) 中国地质科学院地质研究所岩石圈中心, 北京 100037;

2) 中国地质科学院深部探测与地球动力学重点开放实验室, 北京 100037;

3) 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

4) 加州大学洛杉矶分校, 美国洛杉矶 90095-1567;

5) 中国石化南方勘探分公司, 四川成都 610041

摘要: 青藏高原是由印度板块和亚洲板块于 50~60 Ma 碰撞而形成的全球最高最大的高原, 已成为多数国内外学者的共识。然而, 关于它的岩石圈变形机制却是长期争论的问题。深地震反射剖面是精细揭示岩石圈结构、分辨变形样式的有效技术。重新处理的松潘地块-西秦岭造山带深地震反射剖面揭示出岩石圈变形的细节, 以地壳上部的双重逆冲构造、地壳中部一系列近水平拆离断层的叠置和地壳下部莫霍面的重叠为主要特征, 展现出青藏高原东北缘岩石圈变形以缩短变形为主要机制。横向上上千公里展布的大规模左旋走滑的昆仑断层, 自地表向下陡倾延伸到地壳中部的叠瓦状逆冲构造之上, 在埋深约 35 km 处被近水平的拆离层所截断。本次研究建立的岩石圈垂向构造图也展现出西秦岭造山带与若尔盖盆地岩石圈尺度的构造关系。

关键词: 青藏高原东北缘; 深地震反射剖面; 岩石圈缩短变形

中图分类号: P542.5; P631.425 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2011.05.01

Lithospheric Deformation Shortening of the Northeastern Tibetan Plateau: Evidence from Reprocessing of Deep Seismic Reflection Data

GAO Rui^{1,2)}, WANG Hai-yan^{1,2)}, WANG Cheng-shan³⁾, YIN An⁴⁾, ZHANG Yu-xiu³⁾,
LI Qiu-sheng^{1,2)}, GUO Tong-lou⁵⁾, LI Wen-hui^{1,2)}

1) *Lithosphere Research Center, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological sciences, Beijing 100037;*

2) *Key Laboratory of Earthprobe and Geodynamics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;*

3) *National Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083;*

4) *Department of Earth and Space and Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Los Angeles, California, USA 90095-1567;*

5) *Southern China Exploration Division, Sinopec Company, Chengdu, Sichuan 610041*

Abstract: Although most researchers both in China and abroad have agreed that the Tibetan plateau is the largest highland induced by the India-Asia collision over the past 60~50 Ma, its formation mechanism has long been a problem of controversy. Deep seismic reflection profiling is an effective technique for revealing the fine structure of the lithosphere and detecting the deformation style of the crust. The reprocessing of the deep seismic reflection

本文由国家自然科学基金项目(编号: 40830316)、国际科技合作项目(编号: 2006DFA21340)、国家地质调查项目(编号: 1212010711813)

和国家专项项目“深部探测技术与实验研究”(编号: SinoProbe-02)联合资助。获中国地质科学院 2010 年度十大科技进展第九名。

收稿日期: 2011-07-29; 改回日期: 2011-08-09。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 高锐, 男, 1950 年生。研究员, 博士生导师。长期从事中国大陆的地壳上地幔地球物理探测与地球动力学研究。通讯

地址: 100037, 北京市百万庄大街 26 号。电话: 010-68999730。E-mail: gaorui@cags.net.cn。

profile across Songpan block-West Qinling orogenic belt has revealed the details of lithosphere deformation. The superimposition of the thrust duplex structure in the upper crust and a sub-horizontal detachment in the middle crust and the vertical stacking of Moho at the bottom of the crust show that the lithospheric shortening deformation on the northeastern margin of the Tibetan Plateau was the main formation mechanism. The Kunlun fault 1000 km in length, one of the largest continental-scale strike-slip faults in Tibet, terminates at a sub-horizontal decollement with the depth of 35 km in the lowermost crust of Tibet. The study establishing the vertical structure of the lithosphere shows tectonic relationship between the western Qinling orogenic belt and the Zoige basin on the lithosphere scale.

Key words: northeastern Tibetan Plateau; deep seismic reflection profile; lithospheric deformation shortening

青藏高原是印度板块与亚洲板块于 50 ~ 60 Ma 碰撞形成的全球最高最大的高原, 已成为国内外多数学者的共识。然而, 其变形机制仍是长期争论的重要科学问题。目前争论的焦点主要围绕两个端元模型: (1) 青藏高原发展演化过程中, 岩石圈变形为垂向连贯的(England et al., 1982; Flesch et al., 2005); (2) 中地壳或下地壳中的侧向流体(如管道流)导致了变形随深度变化(Zhao et al., 1987; Clark et al., 2000; Bird, 1991; Royden et al., 1997)。这两种变形模型都提出了已有观测结果支持的证据: 如上地幔剪切波 SKS 分裂描述的各向异性方向和 GPS 记录的岩石圈位移方向的一致, 以及地表出露的大型走滑断裂带向下可能深达整个岩石圈的空间关系等, 支持岩石圈垂向连续变形的观点(Hirn et al., 1984; Wittlinger et al., 1998); 而青藏高原中、下地壳广泛分布的低速层似乎为管道流模型提供了证据(Nelson et al., 1996; Royden et al., 2008)。

青藏高原东北缘是检验上述两个极端模型的关键地区。管道流模型推测青藏高原东北缘是青藏高原管道流发育, 地壳向外流动的两个关键地区之一(另一个关键地区是在青藏高原的东南缘)。而横向上上千公里展布的大规模左旋走滑的昆仑断层(Yin et al., 2000), 横亘青藏高原东北缘。如果能精细探测到昆仑断层的深部延伸, 则可以检测岩石圈垂向连续变形模型。因此, 探测和揭露青藏高原东北缘精细结构可为检验上述两个极端模型, 建立青藏高原岩石圈变形机制提供证据。

为揭示青藏高原东北缘岩石圈精细结构, 分辨变形样式, 在中国国家自然科学基金委和中石化南方分公司的联合资助下, 我们于 2004 年完成一条跨越松潘地块和西秦岭造山带结合部位, 横过昆仑断层的高精度深地震反射剖面, 剖面长度约 260 km(高锐等, 2006a; 王海燕等, 2007)。为了更好地理解青藏高原东北缘岩石圈变形机制和盆山关系, 2008—2009 年, 在国家自然科学基金委、国家地质

调查局等的资助下, 又向北延伸完成了 140 km 长的深地震反射剖面, 完整跨越了西秦岭造山带。连接 2004 年原有剖面, 一起对深地震反射剖面数据进行了重新处理。重新处理成果剖面展示了青藏高原东北缘最大规模的地壳尺度走滑断裂——昆仑断层被地壳中部近水平的拆离层所截断。拆离层之上发育的左旋走滑断裂与其下的地壳变形样式明显不同, 拆离层之下发育迭瓦状逆冲推覆构造, 甚至莫霍面也参与了变形。我们的发现支持青藏高原主走滑断裂在变形过程中其地壳和上地幔之间存在变形解耦的观点(Burchfiel et al., 1989)。

1 地质背景

左旋走滑的昆仑断裂带约 1000 km 长, 形成于 8 ~ 15 Ma, 活动速率为 5 ~ 16 mm/yr, 总的位移量达到 65 ~ 120 km (Kidd et al., 1988; Van et al., 2002; Fu et al., 2007; Kirby et al., 2007; Harkins et al., 2008)。图 1 显示, 昆仑断裂带呈东西走向, 其西端终止于北西走向的祁曼塔格逆冲带, 东端终止于近南北向的龙门山逆冲带(Jolivet et al., 2003; Chen et al., 1994)。这种关系引起了长期的争论: 这种高原内主走滑断裂带性质是与压缩构造有关的地壳规模转换断层呢, 还是与大陆俯冲和横向挤压有关的岩石圈规模断层(Burchfiel et al., 1989; Kirby et al., 2007; Jolivet et al., 2003; Chen et al., 1994; Tapponnier et al., 2001)? 昆仑断裂带将松潘-甘孜地体和昆仑-柴达木地体隔为南北两块。昆仑-柴达木地体其北边界为南倾的临夏冲断层, 与临夏盆地相邻。与新生代盆地一起作为整个前陆盆地系统一部分的临夏盆地, 在 30 ~ 40 Ma 前开始形成演化(Fang et al., 2003; Horton et al., 2004)。昆仑-柴达木地体出露太古代结晶岩、元古代地层(碳酸盐岩为主)和三叠系复理石沉积。此外, 少量出露源于伸展构造的侏罗系和白垩系地层。昆仑断裂南侧的松潘-甘孜地体其西部发育一系列北西向的逆冲断层、三叠系和新生代的紧密褶皱

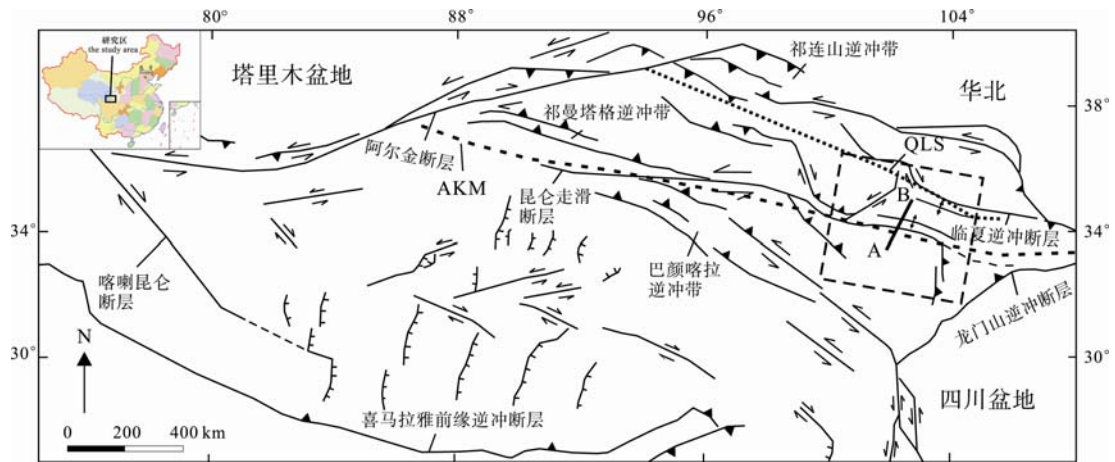


图 1 深地震反射剖面位置图和简要构造背景

Fig. 1 Location of the deep seismic reflection profile and simplified tectonic setting of Tibet
虚方框为本文重点讨论的地区; AB-深地震反射剖面位置; AKM-三叠纪阿尼玛卿-昆仑-木孜塔格缝合线;
OLS-早古生代祁连缝合线

This paper focuses on the study area in the virtual box; AB-location of the deep seismic reflection profile;
AKM-Triassic Animaqing-Kunlun-Muztag sutures; OLS-early Paleozoic Qilian suture

(<2 ~ 5 km), 东部发育元古代到古生代的宽缓褶皱。元古代和古生代地层应为华南板块西部大陆架的被动陆缘沉积(潘桂堂等, 2004)。

2 深地震反射剖面数据采集和再处理

深地震反射剖面是精细揭示岩石圈结构, 分辨变形样式的有效技术(高锐等, 2011; 董树文等, 2011)。2004年9月—2005年初, 我们分五段完成一条穿越松潘地块和西秦岭造山带的深地震反射剖面。剖面南起唐克乡, 北至合作, 全长 260 km。为提高地震成像分辨能力, 兼顾石油勘探和深部探测的共同需要, 使用了小、中、大三种尺度的井中爆破震源, 震源间距分别为 100 m、400 m、5000 m。使用 SN388 地震仪 480 道接收, 道间距 50 m, 记录长度 30 s, 获得 120 次以上的高覆盖次数的地震探测数据, 同时获得浅深兼顾的岩石圈结构丰富信息

(采集参数见表 1)。初步研究结果已在国内外报道(高锐等, 2006a, b; 王海燕等, 2007; Wang et al., 2009)。2008 年, 为了更好地理解青藏高原东北缘岩石圈变形机制和盆山关系, 在国家自然科学基金委、国土资源部中国地质调查局等资助下, 我们又向北延伸, 继续进行深地震反射剖面探测 140 km。连接原有剖面一起重新进行数据处理。采用了层析静校正、多域去噪、高精度速度分析和起伏地形叠前时间偏移等处理技术和图像识别处理解释技术, 获得了横过松潘地块-西秦岭造山带-临夏盆地的高精度深地震反射剖面。

3 深地震反射剖面解释

根据重新处理的结果剖面显示的反射特征, 对地震剖面进行了解释, 见图 2 ~ 图 4。首先对剖面上显示的主要反射层位进行了拾取和标识, 如图 2, 该

表 1 深地震反射剖面数据采集参数
Table 1 Data collection parameters of the deep seismic reflection profiling

	2004—2005	2008
震源/kg	16(小炮)、40(中炮)、200(大炮)	40(小炮)、840(中炮)、1000(大炮)
炮间距/m	100(小炮)、400(中炮)、5000(大炮)	250(小炮)、1000(中炮)、30000(大炮)
井深/m	20(小炮)、28(中炮)、50(大炮)	25(小炮)、35(中炮)、45(大炮)
采集系统	SN388	408XL
接收道数	480	720
记录长度/s	30	30(小炮和中炮)、50(大炮)
道间距/m	50	50
采样间隔/ms	2	2
覆盖次数/次	120(小炮)、30(中炮)	60

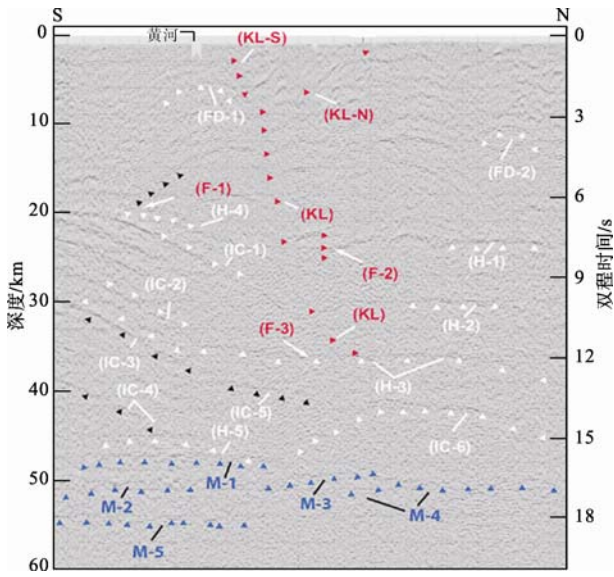


图 2 重新处理的深地震反射时间剖面 (位置示意于图 1 虚方框中的 AB 线段)

Fig. 2 Reprocessed deep seismic reflection time section (location shown by AB segment in Fig. 1)

图中岩性特征分布及其厚度来源于区域地质资料 (潘桂堂等, 2004)。地表追踪到的两条昆仑断层分支在地震剖面上有所显现, 断层向下连续截断一系列反射层(图 2 中 KL-S, KL-N 和 KL)。北部分支倾角向南, 约 $30^{\circ} \sim 35^{\circ}$, 在约 8 km 埋深处归并于断裂南部分支。南部分支倾角向北, 约为 $65^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 。两个分支之间是由逆冲构造和向北倾斜断层构成的断弯褶皱。两个断裂带分支的交汇处之下, 埋深约 8 ~ 30 km 昆仑断裂带以 80° 的倾角向北倾斜。随着深度增加, 断裂倾向变缓, 倾角约为 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 。昆仑断裂带主干的多个逆冲断层分支从向昆仑断层向两侧形成双重逆冲推覆构造体系(图 4)。上述构造形式代表了扭压构造体系下形成的走滑断裂典型的花状构造。

埋深约 35 km 处, 昆仑断裂带被近水平反射层(图 2 中 H-3。被称为上拆离层, 见图 3c)所截断。地震剖面显示反射层 H-3 为中地壳中的一个独立的韧性剪切带, 自它截切的昆仑断裂向南延伸约 40 km,

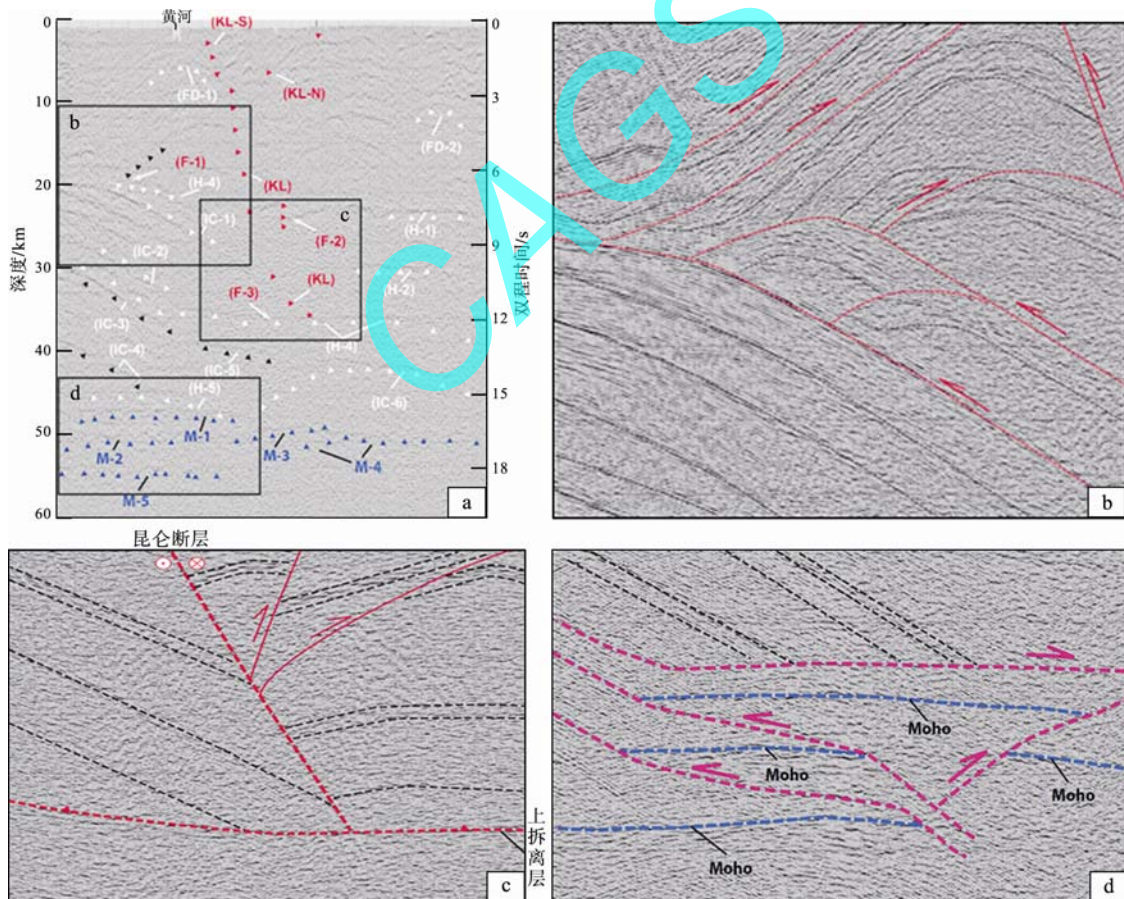


图 3 解释剖面局部举例

Fig. 3 Examples of the interpretation section

- a-重新处理的时间剖面; b-昆仑断层南部的逆冲构造; c-左旋走滑的昆仑断层向下倾斜地延伸, 终止在一近水平的上拆离层之上;
 - d-Moho 错断成近水平的逆冲断层, 形成双重逆冲系统
- a-time profile images of data reprocessing; b-thrust structure in the south of the Kunlun fault; c-left-slip Kunlun fault extending downward and terminating at a sub-horizontal decollement; d-multiple Moho offset by thrusts, forming a thrust duplex system

归并于剖面南部一系列北倾的反射层, 即截断了倾斜反射层 IC-1 和 IC-2(图 3a), 并展示出上盘断坡关系, 这种断坡关系要求存在向北的应力转换。

地震剖面显示上地壳(0~20 km)以褶皱(图 3a 中 FD-1 和 FD-2)和逆冲构造(如图 3a 中 F-1 和图 3b)为主要特征。上地壳 10 km 内褶皱两翼倾角 30°~50°, 随着深度加大向下俯冲角度变小(图 3)。根据上盘断坡关系, 许多小逆冲断层的上盘移向昆仑断裂(图 3)。虽然这些逆冲断层可能为早新生代构造, 被年轻昆仑断裂带切断, 但它们与同期昆仑构造的几何关系有力地表明, 大多数逆冲断层是沿昆仑断层的构造运动方向形成的。因此应该与昆仑断裂带的发展

演化是同期的。同样, 昆仑断裂带南部南倾的小断裂终止于昆仑断裂, 它们与昆仑断裂带的活动有关(图 3)。

深地震反射剖面探测结果让我们惊奇地发现: 在地壳中部 30~40 km 发育一组多层的壳内拆离断层(图 4 中的 UD, MD, LD, 表示上拆离断层、中拆离断层、下拆离断层), 累计厚度达 6~9 km。这组具有简单剪切性质的拆离断层截切了左旋走滑的昆仑断裂带的深部延伸。

深地震反射剖面还揭露出受昆仑断裂带影响莫霍面多次被错断。地震剖面显示莫霍面主要表现为—组强的水平的反射层(图 3a 中 M-1 到 M-5), 横向

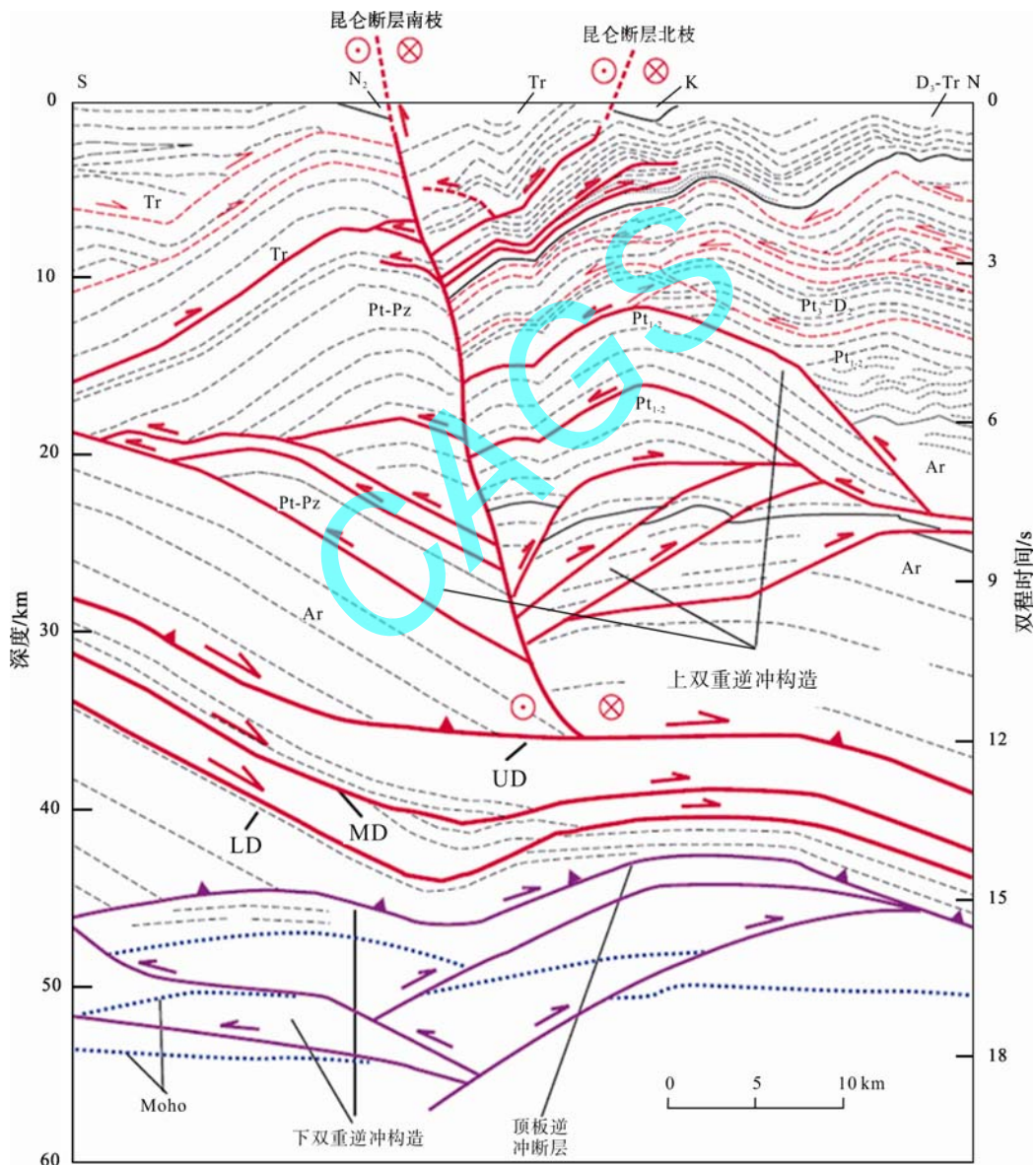


图 4 跨越昆仑左旋走滑断层的解释横剖面

(显示出岩石圈的变形样式; 位置示意如图 1 虚方框中的 AB 线段; UD, MD, LD 表示 上、中、下拆离断层, 解释见正文)

Fig. 4 An interpreted structural section across the left-slip Kunlun Fault based on this study

(It shows the deformation style of the lithosphere; location is indicated by AB segment in Fig. 1; UD, MD and LD represent upper, middle and lower detachment fault. For interpretation, see the text)

上的高度不连续, 在一些地方, 莫霍面表现为不连续的垂向上重叠(图 3d)。我们认为该种莫霍面强烈的变形是由于岩石圈上地幔被卷入进迭瓦状逆冲推覆构造所引起的。

关于莫霍面错断时间有三种可能: 首先, 可能发生在晚三叠世, 在此期间阿尼玛卿-昆仑-木孜塔格缝合带古特提斯洋闭合。因此, 莫霍面错断的位置标定了地壳-地幔深度的缝合带位置。第二, 莫霍面在新生代高原形成后期被错断, 其岩石圈地幔总的缩短量为 35 km(约 33%的缩短应变)。第三, 莫霍面的错断为三叠系板块俯冲和新生代岩石圈变形的综合影响。

根据卷入地幔岩石圈的下双重构造的顶板逆冲断层被褶皱变形(图 4), 我们认为莫霍面的错断发生在新生代高原岩石圈变形期间, 其几何形态与截断昆仑断裂带的拆离层相似(如图 4 中 UD)。剖面显示下双重构造体系同样截断了一系列北倾的反射层(图 3a 中 IC-4 和 IC-5)。

4 结论

昆仑断裂带被地壳拆离层截断以及拆离层之下有莫霍面卷入的迭瓦逆冲推覆构造表明, 青藏高原东北缘的地壳变形和岩石圈地幔变形是完全解耦的。对照来自深反射地震剖面解释的构造变形精细图像, 我们分析青藏高原岩石圈变形是与管道流模式(Royden et al., 2008), 还是与岩石圈地幔的俯冲有关(Yin et al., 2008)。第一种模式预测, 以近水平的反射层为主要反射特征的中下地壳是由于沿通道壁剪切形成的; 而第二种模式表明上地壳的缩短量比中、下地壳和岩石圈地幔的缩短量大(图 4)。在两个近平行的近水平的拆离断层之间存在的北倾的反射层(图 4 中 MD 和 LD)与管道流模式自相矛盾。相反, 上、下拆离层之上的上盘断坡表明存在向北的韧性剪切带, 该带向北与西秦岭向临夏盆地的逆冲有关。我们提出的构造模式表明青藏高原东北缘的隆起是由于岩石圈尺度的缩短作用形成的, 上地壳的双重逆冲构造与左旋走滑昆仑断裂带有关, 而莫霍面叠置的双重逆冲构造反映了地幔被卷入变形。

本文研究建立的岩石圈垂向构造图也生动地展现了西秦岭造山带与若尔盖盆地的岩石圈尺度构造关系。

参考文献:

董树文, 李廷栋. 2011. 揭开入地计划序幕[J]. 地球学报, 32(S1):

1-2.

高锐, 马永生, 李秋生, 朱铨, 张季生, 王海燕, 李鹏武, 卢占武, 管焯. 2006a. 松潘地块与西秦岭造山带下地壳的性质和关系——深地震反射剖面的揭露[J]. 地质通报, 25(12): 1361-1367.

高锐, 王海燕, 马永生, 朱铨, 李秋生, 李朋武, 匡朝阳, 卢占武. 2006b. 松潘地块若尔盖盆地与西秦岭造山带岩石圈尺度的构造关系——深地震反射剖面探测成果[J]. 地球学报, 27(5): 411-418.

高锐, 王海燕, 张忠杰, 李秋生, 陈凌, 金胜, 刘国兴, 贺日正, 张贵宾, 卢占武, 曾令森, 许惠平. 2011. 切开地壳上地幔, 揭露大陆深部结构与资源环境效应——深部探测技术实验与集成(Sinoprobe-02)项目简介与关键科学问题[J]. 地球学报, 32(S1): 34-38.

潘桂堂, 丁俊, 姚冬生, 王立全. 2004. 青藏高原及邻区地质图(1:1,500,000)[M]. 成都: 成都制图出版社.

王海燕, 高锐, 马永生, 朱铨, 李秋生, 匡朝阳, 李朋武, 卢占武. 2007. 若尔盖与西秦岭地震反射岩石圈结构和盆山耦合[J]. 地球物理学报, 50(2): 472-481.

References:

BIRD P. 1991. Lateral extrusion of lower crust from under high topography, in the isostatic limit[J]. J. Geophys. Res., 96 (B6): 10275-10286.

BURCHFIEL B C, DENG Q, MOLNAR P, ROYDEN L H, WANG Y, ZHANG P, ZHANG W. 1989. Intracrustal detachment with zones of continental deformation[J]. Geology, 17(8): 748-752.

CHEN S F, WILSON C J L, DENG Q D, ZHAO X L, LUO Z L. 1994. Active faulting and block movement associated with large earthquakes in the Min Shan and Longmen Mountains, northeastern Tibetan plateau[J]. J. Geophys. Res., 99(B12): 24025-24038.

CLARK M K, ROYDEN L H. 2000. Topographic ooze: building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow[J]. Geology, 28(8): 703-706.

DONG Shu-wen, LI Ting-dong. 2011. Opened into the plan[J]. Acta Geoscientica Sinica, 32(S1): 1-2(in Chinese with English abstract).

ENGLAND P, MCKENZIE D. 1982. A thin viscous sheet model for continental deformation[J]. Geophys. J. R. Astron. Soc., 70(2): 295-321.

FANG X M, GARZIONE C, VAN DER VOO R, LI J J, FAN M J.

2003. Flexural subsidence by 29 Ma on the NE edge of the Tibet from the magnetostratigraphy of the Linxia basin, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 210(3-4): 545-560.
- FLESCH L M, HOLT W E, SILVER P G, STEPHENSON M, WANG C Y, CHAN W W. 2005. Constraining the extent of crust upper mantle coupling in central Asia using GPS, geologic, and shear-wave splitting data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 238(1-2): 248-268. doi:10.1016/j.epsl.2005.06.023.
- FU B, AWATA Y. 2007. Displacement and timing of left-lateral faulting in the Kunlun Fault Zone, northern Tibet, inferred from geologic and geomorphic features[J]. *Asian Earth Sci.*, 29(2-3): 253-265.
- GAO Rui, MA Yong-sheng, LI Qiu-sheng, ZHU Xuan, ZHANG Ji-sheng, WANG Hai-yan, LI Peng-wu, LU Zhan-wu, GUAN Ye. 2006a. Tectonic relationships between the Zoige basin of the Song-Pan Block and the West Qinling orogen at lithosphere scale: Results of deep seismic reflection profiling[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(12): 1361-1367(in Chinese with English abstract).
- GAO Rui, WANG Hai-yan, MA Yong-sheng, ZHU Xuan, LI Qiu-sheng, LI Peng-wu, KUANG Chao-yang, LU Zhan-wu. 2006b. Tectonic relationships between the Zoige basin of the Song-Pan Block and the West Qinling orogen at lithosphere scale: Results of deep seismic reflection profiling[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 27(5): 411-418(in Chinese with English abstract).
- GAO Rui, WANG Hai-yan, ZHANG Zhong-jie, LI Qiu-sheng, CHEN Ling, JIN Sheng, LIU Guo-xing, HE Ri-zheng, ZHANG Gui-bin, LU Zhan-wu, ZENG Ling-sen, XU Hui-ping. 2011. "Cutting" the Crust and the Upper Mantle and Revealing the Deep Structure of the Continent with the Resource Effect: An Introduction to the Project SinoProbe-02 of Experimentation, Deep Probing Techniques and Integration and a Discussion on Key Science Problems[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(S1): 34-38(in Chinese with English abstract).
- HARKINS N, KIRBY E. 2008. Fluvial terrace riser degradation and determination of slip rates on strike-slip faults: an example from the Kunlun fault, China[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35: 6. doi: 10.1029/2007GL033073.
- HIRN A, LEPINE J-C, JOBERT G, SAPIN M, WITTLINGER G, ZHONG X, XU E Y, GAO X J, WANG J W, TENG S B, XIONG P M R, TATER J M. 1984. Crustal structure and variability of Himalayan border of Tibet[J]. *Nature*, 307: 23-25.
- HORTON B K, DUPONT-NIVET G, ZHOU J, WAANDERS G L, BUTLER R F, WANG J. 2004. Mesozoic-Cenozoic evolution of the Xining-Minhe and Dangchang basins, northeastern Tibetan Plateau: Magnetostratigraphic and biostratigraphic results[J]. *Journal of Geophysical Research*, 109(B4), 1-15. doi: 10.1029/2003JB002913.
- JOLIVET M, BRUNEL M, SEWARD D, XU Z, YANG J, MALAVIEILLE J, ROGER F, LEYRELOUP A, ARNAUD N, WU C. 2003. Neogene extension and volcanism in the Kunlun Fault Zone, northern Tibet: new constraints on the age of the Kunlun Fault[J]. *Tectonics*, 22: 1052. doi: 10.1029/2002TC001428.
- KIDD W S F, MOLNAR P. 1988. Quaternary and active faulting observed on the 1985 Academia Sinica-Royal Society Geotraverse of Tibet[J]. *Phil. Trans. Royal Society London, A*, 327: 337-363. doi:10.1098/rsta.1988.0133.
- KIRBY E, HARKINS N, WANG E Q, SHI X H, FAN C, BURBANK D. 2007. Slip rate gradients along the eastern Kunlun fault[J]. *Tectonics*, 26(2): 1-16. doi:10.1029/2006TC002033TC2010.
- NELSON K D, ZHAO W J, BROWN L D, KUO J, CHE J K, LIU X W, KLEMPERER S L, MAKOVSKY Y, MEISSNER R, MECHIE J, KIND R, WENZEL F, NI J, NABELEK J, LESHOU C, TAN H, WEI W, JONES A G, BOOKER J, UNSWORTH M, KIDD W, HAUCK M, ALSDORF D, ROSS A, COGAN M, WU C, SANDVOL E, EDWARDS M. 1996. Partially molten middle crust beneath southern Tibet: Synthesis of Project INDEPTH Results[J]. *Science*, 274(5293): 1684-1688.
- PAN Gui-tang, DING Jun, YAO Dong-sheng, WANG Li-quan. 2004. Geological Map of Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau and Adjacent Areas (1:1,500,000)[M]. Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing House(in Chinese).
- ROYDEN L H, BURCHFIEL B C, KING R W, WANG E, CHEN Z, SHEN F, YUPING L. 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet[J]. *Science*, 276(5313): 788-790.
- ROYDEN L H, BURCHFIEL B C, VAN DER HILST R D. 2008. The geological evolution of the Tibetan plateau[J]. *Science*, 321(5892): 1054-1058.
- TAPPONNIER P, XU Z Q, ROGER F, MEYER B, ARNAUD N, WITTLINGER G, YANG J S. 2001. Oblique Step Wise rise and

- Growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*, 294(5547): 1671-1677.
- VAN D W J, TAPPONNIER P, RYERSON F J, MERIAUX A S, MEYER B, GAUDEMER Y, FINKEL R C, CAFFEE M W, ZHAO G G, XU Z Q. 2002. Uniform postglacial slip-rate along the central 600 km of the Kunlun Fault (Tibet), from Al-26, Be-10, and C-14 dating of riser offsets, and climatic origin of the regional morphology[J]. *Geophys. J. Inter.*, 148(3): 356-388.
- WANG H Y, GAO R, LI Q S, ZHANG J S, LU Z W, HOU H S. 2009. Lithosphere structure of the west Qinling orogenic belt revealed by deep seismic reflection profile[J]. 2009AGU (American Geophysical Union) Fall Meeting, San Francisco, CA, T11B-1810.
- WANG Hai-yan, GAO Rui, MA Yong-sheng, ZHU Xuan, LI Qiu-sheng, KUANG Chao-yang, LI Peng-wu, LU Zhan-wu. 2007. Basin-range coupling and lithosphere structure between the Zoige and the west Qinling[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 50(2): 472-481(in Chinese with English abstract).
- WITTLINGER G, TAPPONNIER P, POUPINET G, JIANG M, SHI D, HERQUEL G, MASSON F. 1998. Tomographic evidence for localized lithospheric shear along the Altyn Tagh fault[J]. *Science*, 282(5386): 74-76.
- YIN A, DANG Y Q, ZHANG M, CHEN X H, MCRIVETTE M W. 2008. Cenozoic tectonic evolution of the Qaidam basin and its surrounding regions (Part 3): structural geology, sedimentation, and regional tectonic reconstruction[J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 120(7-8): 847-876.
- YIN A, HARRISON T M. 2000. Geological evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28: 211-280.
- ZHAO W, MORGAN W J. 1987. Injection of Indian crust into Tibet lower crust: A two-dimensional finite element model study[J]. *Tectonics*, 6(4): 489-504.

《地球学报》编辑部网站权威发布 OA 期刊网络版

经过历时 3 年的努力,《地球学报》OA(Open Access)期刊网络版于 2011 年 7 月底全部上传完毕,在《地球学报》编辑部网站正式权威发布。

《地球学报》编辑部自主发布的期刊网络版,包括了《地球学报》1979 年创刊以来的全部正刊,以及 2008 年以前的 3 种增刊和 2009 年以后的所有增刊。它在内容上保证了与期刊印刷版的高度一致,并建立了与之对应的中、英文检索数据库。《地球学报》编辑部网站的期刊网络版,无论是 PDF 文件还是中、英文检索项信息源,都是最准确、完整的权威发布。

《地球学报》编辑部网站自 2008 年底建成运行伊始,即设立了“过刊浏览”菜单项目,旨在为学者提供免费全文浏览及下载服务。《地球学报》编辑部之所以花费大量时间和人力物力制作自主网络版,是由于国内三大期刊网站虽然提供了《地球学报》的过刊服务,但与印刷版比较,存在不同程度的疏漏,且均为有偿使用,同时没有收录增刊。

《地球学报》期刊网络化工作,得到了中国地质科学院基本科研业务费项目(ywf060701、ywf0809 和 ywf0901)的经费支持。

本刊编辑部 报道