青藏高原北缘碰撞变形的深部过程*

——深地震探测成果之启示

高 锐 李朋武 李秋生 管 烨 史大年
(中国地质科学院地质研究所岩石圈研究中心, 北京 100037) (中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)
孔祥儒 刘宏兵
(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100101)

摘要 3 种深地震探测方法的调查结果, 揭示了青藏高原北缘碰撞变形的深部过程. 发现沿青藏高原北缘, 正在发生大陆岩石圈的会聚碰撞作用. 大陆岩石圈板块正向碰撞变形的深部过程不同于斜向碰撞变形的深部过程. 研究还发现, 青藏高原南、北两缘碰撞变形的深部过程有所不同.

关键词 青藏高原 碰撞变形 深部过程 深地震探测

近年来, 青藏高原北部的地壳上地幔结构情况引起国际地学界的广泛重视. 其原因是: 大陆的碰撞行为可能不仅发生在青藏高原的南部, 高原北部的大陆地块(塔里木-阿拉善地块)可能正在向高原下俯冲挤入, 发生碰撞[1~4], 但对其规模及内幕尚不十分了解. 显然, 调查高原北部碰撞边界的深部结构, 对于了解碰撞引起的陆内变形之深部过程, 有着特殊的意义.

1993 年以来, 沿青藏高原北缘, 横过山盆结合地带我们实施了深部地球物理探测, 包括多条深地震近垂直反射剖面和深地震宽角反射与折射剖面调查, 以及宽频地震台阵观测等, 揭示出青藏高原北缘不同构造部位的岩石圈结构与构造. 本文补充一些剖面细节和解释, 并综合研究这些资料, 通过 3 条解释横剖面(西昆仑-塔里木、阿尔金-塔里木和祁连山-阿拉善, 图 1)对比探讨青藏高原北缘碰撞变形的深部过程.

1 各解释剖面位置及研究区简要构造背景

(ⅰ) 祁连山-阿拉善剖面(简称: 北祁连剖面). 祁连山位于青藏高原的东北边缘, 山脉走向正交于高原主挤压应力方向(北东至南西方向), 处于正向碰撞部位, 遭受了强烈的挤压, 因而, 祁连山-河西走廊是研究青藏高原东北缘碰撞变形动力边界和深部过程的最佳地带. 1992~1993 年沿该剖面进行了深地震近垂直反射和深地震宽角反射与折射等多种深部地球物理方法调查[5,6], 其中深反射剖面横跨山盆结合部位, 剖面中段横过祁连山前断裂, 南段到达吊大坂山脚, 北段进入花海盆地, 全长 94 km.

2001-02-12 收稿, 2001-07-09 收修改稿
* 国家重点基础研究发展规划(G1998040800)、原地质矿产部(9501204)、国家新疆 305(96-915-07-03)和国家自然科学基金(批准号: F49734230)资助项目

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

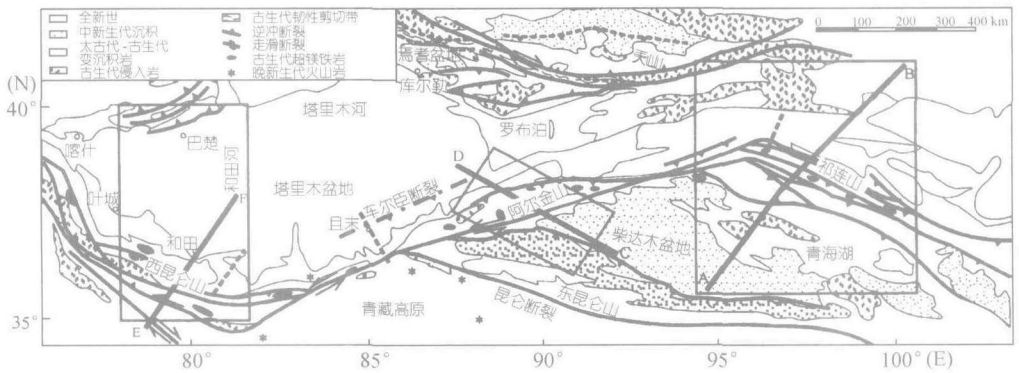

图 1　解释横剖面及研究区位置示意图

黑粗线: 解释横剖面位置; 虚线: 深地震反射剖面位置; 细框线: 研究区位置; 地质背景据文献[7]

(ⅱ) 阿尔金-塔里木剖面(简称: 阿尔金剖面). 阿尔金山走向北东东、斜交于高原主挤压应力方向. 沿阿尔金山发育着中亚规模巨大的剪切走滑断裂, 即阿尔金走滑断裂. 它犹如一条转换断层调整着塔里木盆地与青藏高原的接触关系. 该断裂由数条走滑逆冲断裂组成、形成一个系统. 主断裂位于阿尔金山南缘, 北支的车尔臣断裂隐伏于塔里木盆地中(图 1 中的点虚线). 1992 年完成了穿越阿尔金山的重力和磁力测量; 1995 年, 中法合作完成横过阿尔金山的宽频地震观测[8,9]; 1999 年、横过阿尔金断裂系实施了深地震反射剖面探测、反射剖面沿车尔臣河展布、南段跨过阿尔金主断裂, 进入山区 15 km. 北段跨过车尔臣断裂、进入沙漠 20 km, 剖面全长 140 km[10].

(ⅲ) 西昆仑-塔里木剖面(简称: 西昆仑剖面). 西昆仑山位于青藏高原的西北边缘、向北面对塔里木盆地、是探测和揭示青藏高原北部陆-陆正向碰撞过程的理想地带. 1998 年夏季, 横过盆山结合部位实施了深地震反射剖面[11,12]、深地震宽角反射和折射剖面[13]及宽频地震观测[14]等深部地球物理调查. 反射剖面北起策勒, 沿策勒至恰哈公路近南北向展布、南端止于西昆仑山北部的库地缝合带. 剖面全长 104 km.

2　资料的综合利用与质量评述

我们主要利用 3 种深地震探测资料进行综合研究. 宽角反射与折射剖面探测的结晶基底、莫霍面的起伏与壳内速度的横向变化可控制地壳的整体变形; 横过盆山结合部位的深地震反射剖面可给出塔里木-阿拉善地块与青藏高原碰撞的岩石圈尺度几何样式及山盆耦合关系; 宽频带地震观测的探测深度通常穿过岩石圈达 200 km 以下, 可追踪岩石圈板块碰撞边界的地幔行为、但它对地壳结构的描述不如前两种方法精细.

(ⅰ) 深反射剖面. 北祁连剖面为可控震源 24~48 次共中心点(CMP)叠加剖面. 西昆仑剖面与阿尔金剖面均为爆破震源 15 次共中心点(CMP)叠加剖面. 使用 Micro Max 或 Pro Max 地震数据处理系统、对数据采集实行现场监控, 有效地保证了数据采集工作的质量. 使用 Pro Max 系统进行数据处理、特别加强了其中的仿阵列滤波和振幅处理方法技术、有效地在时间剖面上突出了岩石圈结构格架.

(ⅱ) 宽角反射与折射剖面. 多采用相遇追踪观测系统、人工爆破震源、药量 1~2 t, 炮间距 100~200 km, 一般使用国产模拟地震仪器和数字化地震仪器联合接收、台站间距 3~5 km,

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

一次排列 300 km. 在祁连山-阿拉善和西昆仑-塔里木两条剖面都接收到清晰的莫截面震相.

(iii) 宽频地震台阵观测. 通过合作研究引进先进的宽频数字地震仪, 在西昆仑-塔里木剖面与阿尔金-塔里木剖面均进行了天然地震事件观测, 确定台站下方的地壳上地幔结构, 台站间距一般 10~20 km, 观测周期 6~12 个月, 在观测周期内可以获取数百个地震事件. 研究结果获得国内外同行公认.

3 深地震探测剖面的主要特征与综合解释

3.1 北祁连剖面

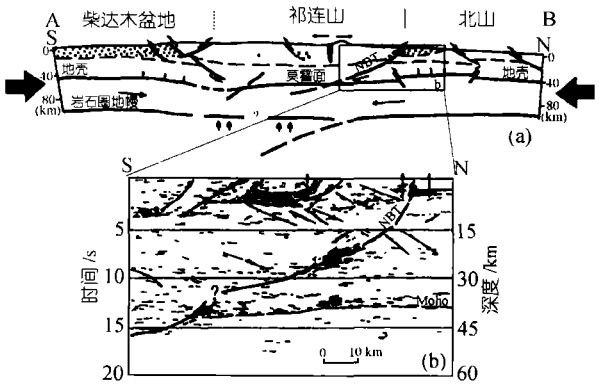

图 2 祁连山-阿拉善解释横剖面

(a) 解释性横剖面; (b) 深地震反射剖面图(未偏移). 纵坐标左侧为双程时间, 右侧为深度, 由平均速度 6.0 km/s 换算

深地震反射剖面在浅部(6 s)获得了与石油地震反射剖面一致的反映祁连山前和酒西盆地下逆冲构造的强反射. 意外的是, 在酒西盆地北部宽滩山下(5~10 s)发现了更大规模的南倾的强反射(图 2(b)), 用均质几何偏移粗略估计这一南倾的反射产状上陡(约 40°)下缓(约 30°), 向上可与花海盆地的赤金堡-金塔断裂相连. 经钻孔揭示, 该断裂为错断白垩系和第三系的逆冲断裂, 是现代地震活动的分界线. 这一发现表明, 挤压作用在河西走廊深部向北发展, 阿拉善地块可能沿这一逆冲断裂插入青藏高原之下(图 2(a)), 故我们称此断裂为北边界逆冲断裂(north boundary thrust, NBT)[15].

深地震宽角反射与折射剖面的探测结果[5], 表明莫霍界面自北山向南倾斜, 平均深度 45 km, 至河西走廊加深为 52 km, 到祁连山下达 70 km 以上. 祁连山地壳平均速度及上地幔顶部 Pn 速度均低于北山. 祁连山巨厚的地壳和低速度结构, 可能与阿拉善地块的插入有关.

3.2 阿尔金剖面

深地震反射剖面的显著特征是一系列南倾的强反射, 贯穿整个剖面, 南浅北深, 南缓北陡[10]. 对比震相连续性、参考石油反射地震剖面, 发现南倾的强反射是阿尔金断裂系逆冲作用的深部反映. 揭示出塔里木的碰撞变形效应部分被逆冲作用调节. 车尔臣走滑断裂的断层面是非垂直的, 南倾的,切穿地壳. 对比断层面两侧震相, 南侧逆冲作用强烈, 错断了地壳层序, 北侧地壳层位平缓发育. 因而, 可确定车尔臣走滑断裂是阿尔金断裂系的最北支, 它限定了逆冲作用向盆地继续

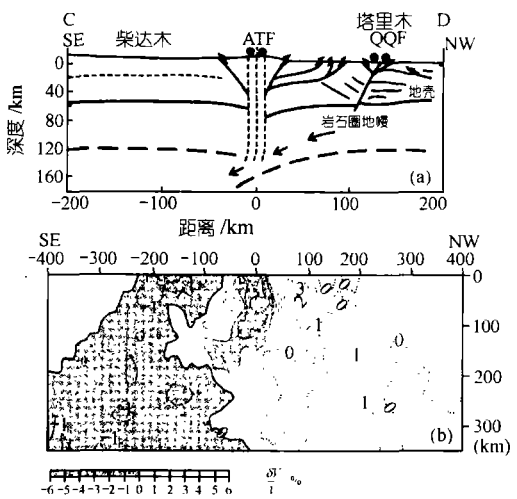

图 3 阿尔金-塔里木解释横剖面

(a) 解释性横剖面, ATF: 阿尔金断裂, QQF: 车尔臣断裂; (b) 宽频地震数据层析成像反演的速度扰动

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

发展. 阿尔金主断裂近于直立在剖面南端，延伸贯穿整个岩石圈. 剖面南部 6.0 s 以下也发现了多组北倾的反射，向北延伸，其中有一组在偏移剖面中表现十分清晰. 强的莫霍面反射在整个剖面清晰可见，呈南倾、北端出现在 18 s(深度约 54 km)，南段 20 s(深度约 60 km). 地幔盖层中以缓倾的南倾的反射为主、与上伏地壳中陡倾的反射形成鲜明对比. 深地震反射剖面的总体特征表明，走滑-逆冲作用分离了塔里木地壳，吸收碰撞会聚效应，导致地壳缩短加厚. 塔里木地壳向南向高原下的插入、被阿尔金主断裂的岩石圈尺度剪切走滑作用所限定. 地幔盖层中低角度南倾的反射、反映塔里木的地幔已向高原下俯冲.

宽频地震观测结果[8,9]发现了阿尔金主断裂低速异常深达 140 km(图 3)、被认为是岩石圈尺度剪切的证据. 地震层析研究认为，走滑-分离作用可使塔里木地壳楔入阿尔金断裂的地幔、导致了速度的降低[8]

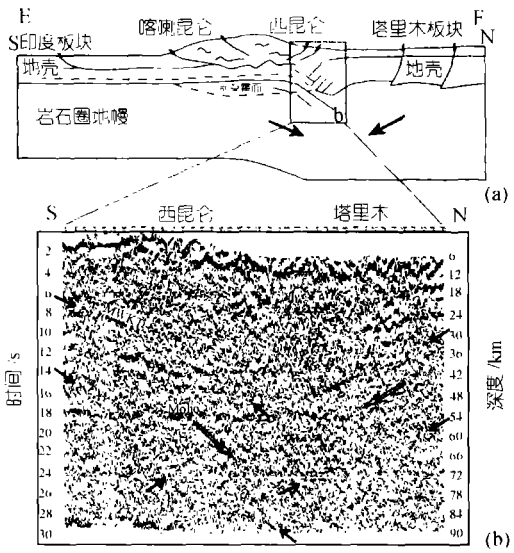

图 4　西昆仑-塔里木解释横剖面

(a) 解释性横剖面示意图；(b) 深地震反射剖面图(未偏移)，纵坐标，左侧为双程时间(s)，右侧为深度(km)，由平均速度 6.0 km/s 换算. 横坐标表示 CDP 点号，间距 25 m. 图中小箭头表示可连续对比的震相，大箭头表示岩石圈俯冲的方向

3.3　西昆仑剖面

深地震反射剖面北段 6~16 s 出现 3~4 组陡角度(约 30°)南倾的反射波、描绘出塔里木岩石圈向西昆仑山下插入的反射结构图像(图 4(a)). 剖面南段在 8~18 s 之间、发现 6~7 组北倾、可连续追踪、由浅至深倾角逐渐变小的中-强反射地震相，反映出西昆仑下地壳由南向北倾斜的结构特征，倾角约 27°[12]. 布置在反射剖面附近的宽频地震记录结果，表明北倾的反射向下至少可以延伸到 140 km[14]. 反射剖面 18~19 s 左右出现一套密集多相位、可断续追踪的中等反射强度似层状地震相、北段略有抬升的反射波组，表现出莫霍面在西昆仑北带以平的反射，塔里木南缘以南倾的反射为主要的反射特征. 19~30 s 之间发育多套大角度北倾和少量南倾反射波组，同时穿插出现多套中等强度似层状地震相，反映出地幔盖层内部西昆仑与塔里木岩石圈相碰撞的地震反射特征.

深地震宽角反射与折射剖面探测出塔里木盆地的地壳整体性自塔中隆起向西昆仑山前倾斜，莫霍面倾角约 5°[13]. 莫霍面深度，塔中隆起为 42 km，和田为 57 km，进入西昆仑北带的铁克理克地体莫霍面略有抬升、莫霍面深度与起伏形态与反射剖面一致.

4　结论与讨论

(ⅰ) 发现沿青藏高原北缘、正在发生大陆岩石圈块体的会聚碰撞. 在西昆仑-塔里木剖面和祁连山-阿拉善剖面，都发现了北侧塔里木(阿拉善)地块地壳以较陡的角度向南插入的反射图像. 在阿尔金-塔里木剖面，由于阿尔金主断裂的岩石圈尺度剪切作用，限定了塔里木地壳向青藏高原之下的插入，但塔里木的岩石圈地幔已向高原下插入.

(ⅱ) 西昆仑山下向北倾斜与塔里木盆地南缘下向南倾斜的多组强反射、构成了塔里木岩

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

石圈与青藏高原西北缘岩石圈在西昆仑山下相向碰撞的地震证据. 反射结构图像也揭示出西昆仑山与塔里木盆地在岩石圈尺度呈“V”型山盆耦合关系, 这种“V”型的耦合型式可能是陆内碰撞过程的一种表现方式.

特别应指出的是, 以较陡倾角相向俯冲碰撞的构造型式, 在青藏高原岩石圈下部未曾发现过. 对比双向挤压模式[16,17], 及邻区发现印度大陆俯冲到藏南之下的深地震反射剖面[18]和解释雅鲁藏布江缝合带下特提斯洋壳俯冲残余体的地震研究[19], 可认为西昆仑山下北倾的反射是大陆岩石圈俯冲作用形成的. 一个大陆岩石圈正沿此逆冲断裂向北俯冲. 尽管我们尚不能确定这一大陆岩石圈是来自印度板块的, 还是原亚洲板块的一部分.

(iii) 大陆岩石圈板块正向碰撞变形的深部过程不同于斜向碰撞变形的深部过程. 西昆仑和祁连山都处于岩石圈板块正向碰撞变形部位, 这里, 塔里木-阿拉善地块岩石圈向南插入到青藏高原之下. 但由于西昆仑距离印度板块较近, 塔里木向南插入不远即在西昆仑山下与向北俯冲的印度(?)岩石圈碰撞; 处于斜向碰撞变形的阿尔金山, 由于岩石圈的走滑-剪切作用, 限定了塔里木地壳向青藏高原之下的插入. 而在地幔盖层, 低角度南倾的反射, 可能反映塔里木岩石圈地幔已向高原下俯冲, 并在地壳底部形成拆离构造. 这也许是斜向碰撞的深部响应.

(iv) 在西昆仑-塔里木剖面和祁连山-阿拉善剖面, 逆冲变形带自山前向盆地发育了 50 km 左右, 而在阿尔金-塔里木剖面, 逆冲变形带有 120 km 宽. 这可能与块体俯冲碰撞的角度有关. 在喜马拉雅, 逆冲变形带有 200 km 宽[20], 印度板块沿 MBT 低角度(约 9°)向高原下俯冲. 在西昆仑塔里木岩石圈以较高角度(约 30°)向青藏高原北缘下插入. 因此, 青藏高原南、北两缘碰撞变形的深部过程有所不同.

致谢 与李廷栋院士、肖序常院士、尹安教授等进行过有益的讨论, 作者表示感谢.

参 考 文 献

1 Lyon-Caen H, Molnar P. Gravity anomalies and the structure of western Tibet and southern Tarim Basin. Geophys Res Lett, 1984, 11: 1251~1254

2 Arnaud N, Vidal Ph O, Tapponnier P, et al. The high K_2O volcanism of the western Tibet: Geochemistry and tectonic implications. Earth and Planetary Science Letters, 1992, 111: 351~367

3 高 锐, 成湘洲, 丁 谦. 格尔木-额济纳旗地学断面地球动力学模型初探. 地球物理学报, 1995, 38(增刊Ⅱ): 3~14

4 Matt P, Tapponnier P, Arnaud N, et al. Tectonics of Western Tibet between the Tarim and the Indus. Earth Planet Sci Lett, 1996, 142: 311~330

5 崔作舟, 李秋生, 吴朝东. 格尔木-额济纳旗地学断面的地壳结构与深部构造. 地球物理学报, 1995, 38(增刊Ⅱ): 15~28

6 吴宣志, 吴春玲, 卢 杰, 等. 利用深地震反射剖面研究北祁连-河西走廊地壳细结构. 地球物理学报, 1995, 38(增刊Ⅱ): 29~35

7 Yin A, Nie S, Harrison T M, et al. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tian Shan. Tectonics, 1998, 17(1): 1~27

8 Wittlinger G, Tapponnier P, Poupinet G, et al. Tomographic evidence for localized lithospheric shear along the Altyn Tagh Fault. Science, 1998, 28: 74~76

9 史大年, 姜 枚, 马开义, 等. 阿尔金断裂带地壳和上地幔结构的 P 波层析成像. 地球物理学报, 1999, 42(3): 341~350

10 Gao R, Liu H, Li Q, et al. A deep seismic reflection profile across Altun fault belt. In: 15th Himalaya-karakorum-Tibet Workshop, Earth Science Frontiers, Abstract Volume, 2000. 205

11 Gao R, Li D, Lu D, et al. Deep seismic reflection profile across contact zone of West Kunlun and Tarim along the Xinjiang

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

geotransect in NW China. 14th Himalaya-Karakorum-Tibet Workshop. Terra Nostra, 1999, 2: 49~50

12 高　锐、黄东定、卢德源、等. 横过西昆仑-塔里木结合带的深地震反射剖面. 科学通报, 2000, 45(17): 1874~1879

13 李秋生、卢德源、高　锐. 横跨西昆仑-塔里木接触带的爆炸地震探测. 中国科学, D 辑, 2000, 30(增刊): 16~21

14 Kao Honn, Gao Rui, Rau Ruey-Juin, et al. Seismic image of the Tarim basin and its collision with Tibet. Geology, 2001, 29(7): 575~578

15 Gao R, Cheng X, Ding Q. Lithospheric structure and geodynamic model of the Golmud-Ejin transect in northern Tibet. Geol Society of America, Special Paper, 1999, 328: 9~17

16 曾融生、丁志峰、吴庆举. 喜马拉雅-祁连山地壳构造与大陆-大陆碰撞过程. 地球物理学报, 1998, 41(1): 49~60

17 高　锐、李廷栋、吴功建. 青藏高原岩石圈演化与地球动力学过程. 地质论评, 1998, 44(4): 389~395

18 Zhao W, Nelson K D, INDEPTH Team. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath Tibet. Nature, 1993, 366: 557~559

19 Mayakovsky Y, Klemperer S L, Ratschbacher L, et al. Midcrustal reflector on INDEPTH wide-angle profiling: An ophiolitic slab beneath the India-Asia suture in southern Tibet? Tectonics, 1999, 18(5): 793~808

20 Chen W P, Chen C Y, Nabelek J L. Present-day deformation of the Qaidam basin with implications for intra-continental tectonics. Tectonophysics, 1999, 305: 165~181

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