

# 青藏高原北部东昆仑-羌塘地区的岩石圈结构 及岩石圈剪切断层\*

许志琴<sup>①</sup> 杨经绥<sup>①</sup> 姜 枚<sup>①</sup> 袁学诚<sup>③</sup> 李海兵<sup>①</sup>  
薛光琦<sup>②</sup> 钱 辉<sup>②</sup>

(①中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; ②中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; ③国土资源部中国地质调查局发展中心, 北京 100035)

**摘要** 通过横穿青藏高原北部东昆仑-羌塘地区的格尔木-唐古拉山口(西段)和共和-玉树(东段)两条天然地震探测剖面的综合研究, 揭示东昆仑-羌塘地区岩石圈结构的如下特征: (1) 地壳厚度自南往北由 70~75 km 减小至 55~60 km, 西段厚度变化幅度(10 km)较东段(20 km)小; (2) 地壳具高速与低速转换界面相间组成的层状结构, 东段中地壳为透镜状低速层; (3) 在 150 km 深度范围内岩石圈的物理状态具高速体和低速体相间特征; (4) 岩石圈结构不连续性表明地体边界及地体内部存在 150~250 km 深度的 3 条主要的岩石圈剪切断层带: 昆南-阿尼玛卿岩石圈剪切断裂带、金沙江岩石圈剪切断裂带和鲜水河岩石圈剪切断裂带, 推测青藏高原北部存在岩石圈规模的向东挤出作用。

**关键词** 青藏高原北部 天然地震探测 岩石圈结构 岩石圈剪切断层

55 Ma 以来, 印度板块与欧亚大陆碰撞过程被看作是青藏高原隆升的主因, 随着青藏高原研究的重点从南部的碰撞边界往北部扩展及深入, 青藏北部岩石圈探测的新成果不断出现, 为高原研究提供了新的深部信息。

自 1996 年以来, 中国地质科学院地质研究所与法国宇宙科学院共同合作在青藏高原北部东昆仑-羌塘地区之西段格尔木-唐古拉山口及东段共和-玉树公路沿线进行了天然地震观测<sup>[1-5]</sup>, 这些工作为原本研究程度很差的该区深部岩石圈结构综合分析提供了研究基础。天然地震探测剖面主要横越了东昆仑和巴颜喀拉地体, 西剖面往南还深入羌塘地体, 东剖面往北深入了柴达木及祁连山地体南缘(图 1)。研究区的主要构造单元有祁连地体、昆北-柴达木地体、昆南地体和巴颜喀拉-松甘地体及羌塘地体。祁连地体和昆北-柴达木地体之间的边界为新发现的 490~500 Ma 形成的祁连南缘加里东俯冲杂岩带(或缝合带)<sup>[6,7]</sup>, 昆北-柴达木地体和昆南地体之间的边界为昆中缝合带(尚有争议)<sup>[8]</sup>, 昆南地体与巴颜喀拉-松甘地体之间的边界为昆南走滑断裂(西段)和阿尼玛卿缝合带(东段)<sup>[9-14]</sup>, 巴颜喀拉-松甘地体和羌塘地体之间的边界为金沙江走滑断裂(西段)与金沙江缝合带(东段)<sup>[5,11,12]</sup>。祁连地体为加里东造山带, 东昆仑(包括昆北及昆南)是加里东与印支叠覆造山带, 巴颜喀拉-松甘地体为印支造山带和羌塘地体为印支与燕山叠置造山带<sup>[11]</sup>。研究表明, 南祁连加里东缝合带与阿尼玛卿印支缝合带具有往北俯冲的剪切指向, 而金沙江印支缝合带具有往南俯冲的剪切指向<sup>[15]</sup>。

2001-02-12 收稿, 2001-07-19 收修稿

\* 国家重点基础研究发展规划(G1998040800)和国土资源部中法合作(9501106)项目资助



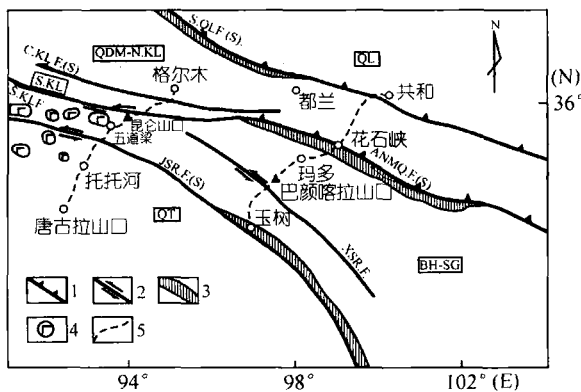


图 1 东昆仑-羌塘地区天然地震探测剖面位置图  
1. 逆冲断层; 2. 左行走滑断层; 3. 缝合带; 4. 新生代火山岩; 5. 天然地震探测剖面; QL: 祁连山地体; QDM-N.KL: 柴达木-昆北地体; S.KL: 昆南地体; BH-SG: 巴颜喀拉-松潘甘孜地体; QT: 羌塘地体; S.QLF(S): 祁连南缘断裂(缝合带); C.KLF(S): 昆中断裂(缝合带); S.KL F: 昆南断裂; ANMQF(S): 阿尼玛卿断裂(缝合带); JSR F(S): 金沙江断裂(缝合带); XSR.F: 鲜水河断裂

自早古生代至中生代末, 上述地体自北往南逐渐碰撞及拼合, 使陆壳不断增生, 形成了劳亚大陆南部的复合地体, 直至 55 Ma 期间与印度板块发生一次更为重要的碰撞事件. 55 Ma 以来青藏高原发生大范围抬升, 研究区伴随隆升的主要新生代构造事件表现为: (1) 可可西里的碱性火山岩喷发; (2) 伸展作用形成的南北向裂谷; (3) 逆冲作用使祁连山往北叠置在酒泉盆地上, 往南叠置在柴达木盆地上, 使东昆仑山往北叠置在柴达木盆地上; (4) 大型走滑断裂的活动, 昆南左行走滑断裂的走滑速率为 7~11.5 mm/a, 鲜水河左行走滑断裂的走滑速率为 10~16 mm/a, 阿尔金左行走滑断裂的走滑速率为 10~16 mm/a<sup>[16]</sup>.

利用横穿青藏高原北部东昆仑-羌塘地区的格尔木-唐古拉山口(西部)和共和-玉树(东部)两条天然地震探测剖面的资料<sup>[1-5]</sup>, 结合新的地质研究成果, 揭示岩石圈结构层状性和不连续性, 综合分析地质历史中岩石圈演化的追踪信息与现代岩石圈结构的表现进行新的解析是本文的主要目的.

## 1 岩石圈结构推断

### 1.1 东昆仑-唐古拉地区西段格尔木-唐古拉山口天然地震探测剖面

格尔木-唐古拉山口的地震层析和接收函数反演剖面通过的地点, 自北往南为格尔木~昆仑山口~五道梁~托托河~唐古拉山口, 剖面推测东昆仑-唐古拉地区西段的岩石圈结构有如下主要特征(图 1, 2): (1) 具高速与低速转换界面相间的地壳层状结构, 浅部存在由两条往北缓倾的

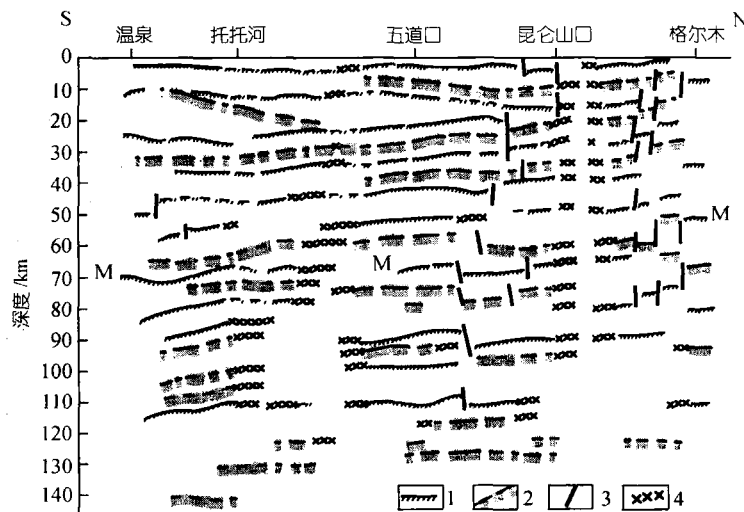


图 2 东昆仑-羌塘地区西段格尔木-唐古拉山口接收函数反演剖面的构造解释  
1. 高速转换界面; 2. 低速转换界面; 3. 推测断层; 4. 不连续面; M 为莫霍面



断层(25 km 的深度)组成的逆冲叠复构造, 莫霍面自南往北深度由 70 km 减小为 60 km(图 2); (2) 在 150 km 以上的岩石圈范围内, 昆北-柴达木地体由低速体组成, 昆南地体和巴颜喀拉地体均由高速体组成, 羌塘地体由低速体组成. 昆南地体往北插入昆北-柴达木地体之下, 昆南地体和巴颜喀拉地体之间的界限——昆南走滑断裂带在图 2 中表现明显不连续性, 在地震层析剖面(图 3)中, 表现为由低速物质组成、深 200 km 垂向产出的岩石圈断裂带. 羌塘地体与巴颜喀拉地体之间的金沙江断裂带为深达 150 km 垂向产出的岩石圈断裂带; (3) 位于巴颜喀拉地体西段及羌塘地体北部的可可西里地区之下, 深度 200~360 km 相当于软流圈处, 存在 600 km 宽和 200 km 厚的大型低速异常体, 已推测与可可西里新生代碱性火山岩的喷发有关(图 3)<sup>[17,18]</sup>.

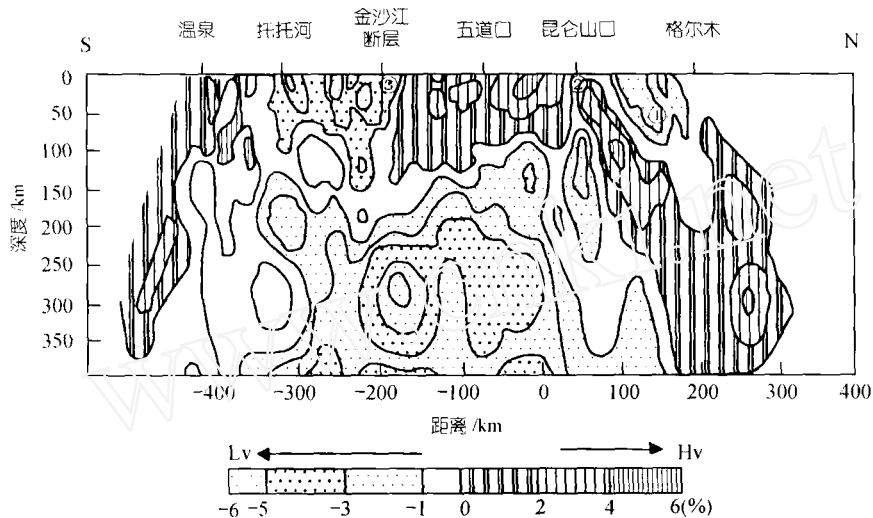


图 3 东昆仑-羌塘地区西段格尔木-唐古拉山口天然地震探测剖面图

Hv: 高速; Lv: 低速<sup>[1,5]</sup>. ①昆中岩石圈剪切断裂; ②昆南岩石圈剪切断层; ③金沙江岩石圈剪切断裂

## 1.2 东昆仑-唐古拉地区东段共和-玉树天然地震探测剖面

共和-玉树的地震层析和接收函数反演剖面及广角反射剖面所通过的地点, 自北往南为共和~花石峡~玛多~巴颜喀拉山口~鲜水河断裂~玉树, 对该地区东段的岩石圈结构可作如下地质解析: (1) 地壳厚度自南往北由 75 km 减少至 55 km, 具南厚北薄特征. (2) 地壳结构根据 S 波波速大小可划分 4 层: 上地壳(0~20 km)为 3.0~3.7 km/s, 中地壳(20~35 km)为 2.3~3.0 km/s, 下地壳(35~55 km)为 3.2~3.9 km/s, 壳幔过渡层(55~70 km)为 4.0~4.3 km/s, 上地幔波速为 >4.3 km/s(图 4). (3) 中地壳由透镜状低速层组成, 低速透镜体位于共和、花石峡以北及巴颜喀拉山口-鲜水河断裂之下部 18~30 km(图 4). 共和位于祁连南缘加里东俯冲杂岩带上, 沿带的锡铁山 ZK 3606 井、大柴旦红参 1 井和哈参 1 井均具较高热流值(分别为 54, 41 和 38 mW/m<sup>2</sup>)<sup>[19]</sup>, 可作此条构造边界现代再活动的证据. 共和盆地是晚新生代晚期的断陷盆地, 受控南、北两条正向走滑断层, 因此共和低速透镜体的出现导致古构造的活化及现代断陷盆地的形成. 花石峡地区的地表地质显示了印支期火山岩浆结构及新生代拉分盆地的特征, 花石峡以东的沙柳河 ZK 502 井热流测试获得 78 mW/m<sup>2</sup> 高热流密度值, 因此推测花石峡中地壳低速透镜体可能反映印支期以来伸展背景, 同时与地壳高热流有成因联系. 而巴颜喀拉山口-鲜水河断裂深部的中地壳低速透镜体, 可能与地壳大量的燕山期花岗岩浆活动有关. (4) 地震层析剖面揭示了



400 km 深度范围内岩石圈总体结构为北部往北倾斜、南部往南倾斜呈“八”字型的特征。北部的祁连山地体由低速物质组成, 昆南地体以高速物质为主, 阿尼玛卿带的深部结构显示了高速体向北的插入, 巴颜喀拉地体北部表现为低速带往北倾伏于昆南高速体之下, 巴颜喀拉南部则表现为高速体往南插入低速体组成的羌塘地体之下(图 5)<sup>[18]</sup>。

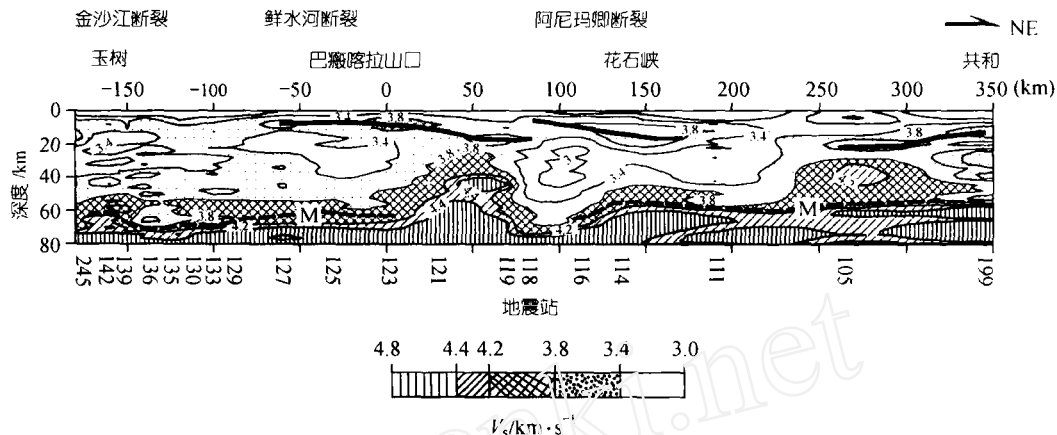


图 4 东昆仑-羌塘地区东段共和-玉树接收函数反演剖面的构造解释  
M 为莫霍面, 粗实线条为断层

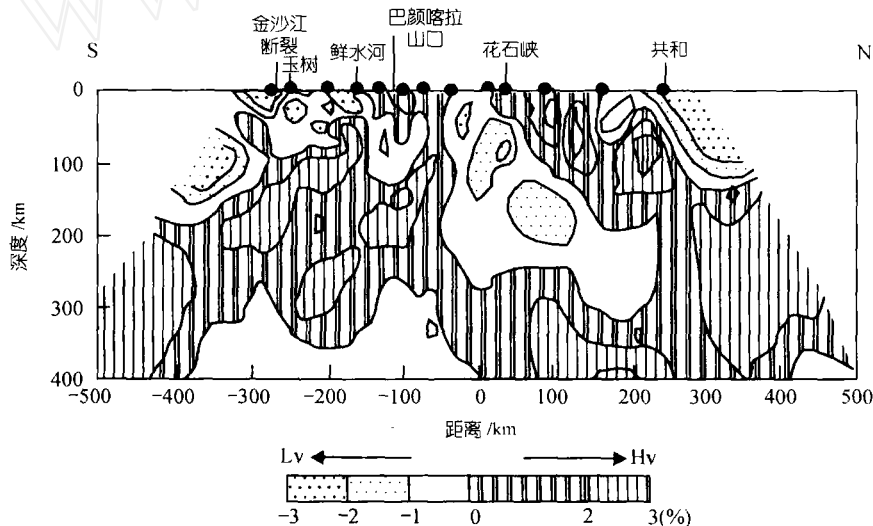


图 5 东昆仑-羌塘地区东段共和-玉树天然地震探测剖面  
Hv: 高速; Lv: 低速<sup>[1,5]</sup>

## 2 岩石圈断裂解析

上述两条天然地震探测剖面明显地反映了岩石圈结构的不连续性及地体边界岩石圈断裂的特征及延深状况。主要有 3 条地体边界和地体内部的岩石圈剪切断裂带: 昆南-阿尼玛卿岩石圈剪切断裂带、金沙江岩石圈剪切断裂带和鲜水河岩石圈剪切断裂带, 推测昆中断裂带(缝



合带)为岩石圈剪切断裂带。

## 2.1 岩石圈剪切断裂

(i) 昆南-阿尼玛卿岩石圈剪切断裂。昆南-阿尼玛卿断裂的详细地质研究已表明了该断裂可分为东、西两段: 西段为近东西向的昆南断裂, 由 2 km 宽的糜棱岩组成, 面理直立, 发育水平拉伸线理及“A”型剪切褶皱, 具明显的左行剪切应变特征。沿断裂及断裂北侧发育同构造花岗岩体, 同位素年代测定表明剪切走滑运动于 240~200 Ma 开始, 150~140 Ma 以及 120~100 Ma 又有强烈剪切活动, 新第三纪(20 Ma)时仍有韧性剪切作用影响<sup>[13]</sup>, 至今还具左行走滑活动性质(脆性为主)并伴随地震活动。东段为北西至南东向的阿尼玛卿断裂带, 系印支期古俯冲带及缝合带, 由一系列自北东往南西逆冲断裂构成<sup>[12]</sup>。新生代以来断裂性质转化为左行走滑活动。格尔木-唐古拉山口西剖面(图 3)揭示了昆南断裂为垂向的岩石圈剪切断裂, 往下延伸达 250 km, 带中的低速带可能是使地壳熔融的高温物质, 是印支期以来花岗岩浆活动的源区。共和-玉树东剖面(图 5)的花石峡地点, 揭示了阿尼玛卿逆冲断裂系为低速体与高速体的界限, 并以中等倾角往北斜向插入 200 km 深处。

(ii) 金沙江岩石圈剪切断裂。金沙江断裂带位于巴颜喀拉-松甘地体和羌塘地体之间, 根据金沙江断裂东段(松潘-甘孜造山带西缘)古特提斯蛇绿岩、混杂堆积及板体制的研究, 表明松潘-甘孜地体往南西俯冲于羌塘地体之下以及金沙江断裂东段具缝合带性质<sup>[18]</sup>。但金沙江断裂西段(玉树以西)缝合带性质不清, 糜棱岩带及 200 Ma 左右同构造花岗岩的存在反映了金沙江断裂西段为印支期形成的韧性左行走滑断裂<sup>[19]</sup>。格尔木-唐古拉山口(西部)剖面, 揭示了金沙江断裂带西段为垂直延伸至 150 km 的岩石圈剪切断裂; 共和-玉树东剖面, 揭示了金沙江断裂带东段为往南西插入 150 km 深度的岩石圈剪切断裂。

(iii) 鲜水河岩石圈剪切断裂。鲜水河断裂带位于巴颜喀拉-松甘地体内部, 巴颜喀拉-松甘地体西段由高速物质组成, 共和-玉树东剖面揭示了巴颜喀拉-松甘地体东段较复杂, 可分为三部分: 南部和北部段为低速体, 中部由高速物质组成。北西至南东向的鲜水河断裂位于中部与南部的交界处, 形成于 20 Ma<sup>[20]</sup>, 是一条左行走滑的活动断裂, 走滑速率为 10~16 mm/a<sup>[16]</sup>。东剖面显示了鲜水河断裂为垂直延伸至 120 km 的岩石圈剪切断裂。

(iv) 昆中岩石圈剪切断裂。长期以来把昆中断裂带(缝合带)当作昆北-柴达木地体与昆南地体的边界。格尔木-唐古拉山口天然地震探测剖面所提供深部物理状态表明, 昆北-柴达木地体由低速物质组成, 昆南地体由高速物质组成, 昆中断裂为明显的物质界面及构造界面。组成昆南地体的高速高密物质往北斜向延伸至 200 km 深度, 构成一条往北陡倾的岩石圈剪切断裂, 提供了昆中断裂带可能为古俯冲带和昆中缝合带存在及其产状的地球物理证据。

## 2.2 岩石圈范围内的向东挤出作用

穿越研究区西端阿尔金山的乌图美仁-花土沟-塔什大坂-若羌天然地震探测剖面, 已揭示了现代走滑速率为 10~30 mm/a 的阿尔金走滑断裂是一条深达 250 km 的岩石圈剪切断裂<sup>[21]</sup>。结合本项研究成果表明, 青藏高原北部一些重要的线在地表大多为大型走滑断裂, 在深部为岩石圈剪切断裂。Tapponnier 等人<sup>[22]</sup>曾提出印度板块楔向北俯冲造成欧亚板块向东挤出的假说, 根据青藏高原北部岩石圈剪切断裂的确定, 可以认为青藏高原北部的向东挤出作用起码是岩石圈范围的。



### 3 结论与讨论

(i) 东昆仑-唐古拉地区的地壳厚度自南往北由 70~75 km 减小为 55~60 km, 西段厚度变化幅度(10 km)较东段(20 km)小; 地壳具“多层”结构, 地壳上部显现叠复岩片构造; 东段中地壳为透镜状低速层。

(ii) 通过横穿青藏高原北部东昆仑-羌塘地区的格尔木-唐古拉山口(西段)和共和-玉树(东段)两条天然地震探测剖面的综合研究, 获得该区 100 km 深度内岩石圈结构的主要特征: 各地体的物理状态表现为高速体和低速体相间的结构特征。昆北-柴达木地体由低速体组成、昆南地体由高速体组成、巴颜喀拉-松甘地体西段由高速体组成, 东段较复杂, 其北部和南部由低速体、中部由高速体物质组成; 羌塘地体由低速体组成。巴颜喀拉地体西部(可可西里地区)深 200~360 km 处存在与新生代火山作用有成因联系的大型低速异常体。

(iii) 天然地震探测还揭示了岩石圈结构的不连续性及岩石圈剪切断层的存在。东昆仑地体与巴颜喀拉地体之间的昆南-阿尼玛卿断裂带之西段的昆南左行走滑断裂带, 为垂向延深 250 km 的岩石圈剪切断裂, 东段阿尼玛卿断裂带(缝合带)位于高、低速体之间的交界面上, 为往北陡倾延深至 250 km 的岩石圈剪切断裂。巴颜喀拉-松甘地体和羌塘地体之间的金沙江断裂带, 同样具东西差异的特点: 西段为垂向延深 150 km 的岩石圈剪切断裂, 东段为往南西陡倾延深至 150 km 的岩石圈剪切断裂。推测昆南-阿尼玛卿岩石圈剪切断裂带与金沙江岩石圈剪切断裂带, 均因循了地表印支期形成的断裂系统而产生。巴颜喀拉-松甘地体内部的新生代鲜水河断裂, 也具有垂向延深 120 km 岩石圈剪切断裂的特征。

(iv) 据青藏高原北部新生代大型走滑断裂的特征及其岩石圈剪切断裂性质的确定, 可以认为青藏高原北部新生代以来的向东挤出作用起码是岩石圈范围的。

**致谢** 成文过程中曾向杨文采和赵志兴研究员讨教, 表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Jiang M, Hirn A, Poupinet G. Tibetan Plateau seismic experiment: Design and preliminary results, 1992~1993. *Global Tectonics and Metallogeny*, 1995, 4: 199~201
- 2 姜 枚, 吕庆田, 史大年, 等. 用天然地震探测青藏高原中部地壳、上地幔结构. *地球物理学报*, 1996, 39(4): 476~482
- 3 Wittlinger G, Masson F, Poupinet G, et al. Seismic tomography of northern Tibet and Kunlun: Evidence for crustal blocks and mantle velocity contrasts. *EPSL*, 1996, 139: 263~279
- 4 Kind R, Kosarev G L, Patersen N V, et al. Receiver functions at stations of the German Region Seismic Network (GRSN). *Geophys J Int*, 1995, 121: 191~202
- 5 Xue G Q, Qian H, Jiang M, et al. Studies on the velocity structure of crust-upper mantle beneath the eastern Qinghai-Tibet Plateau using seismic tomography. *Continental Dynamics*, 1999, 4(2): 79~85
- 6 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 等. 我国西部柴北缘地区发现榴辉岩. *科学通报*, 1998, 43(3): 1544~1549
- 7 杨经绥, 许志琴, 宋述光, 等. 青海都兰榴辉岩的发现及对中国中央带内高压-超高压变质带研究的意义. *地质学报*, 2000, 74(2): 156~168
- 8 姜春发, 杨经绥, 冯秉贵, 等. 昆仑开合构造. 北京: 地质出版社, 1992
- 9 Yang J S, Robinson P T, Jiang C F, et al. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implication. *Tectonophysics*, 1996, 258: 215~231
- 10 Xu Z Q. Large shear zones in the main orogenic belts. *China Episodes*, 1995, 18: 41~43



- 11 Xu Z Q, Yang J S, Li H B, et al. Mesozoic Crustal Evolution and Dynamics of the East Kunlun-Tanggula Composite Mountain Chains. In: Proceedings of the 30th International Geological Congress. Vol. 7. Orogenic Belts Geological Mapping. Utrecht: VSP, 1997. 7~20
- 12 Xu Z Q, Jiang M, Ang J S, et al. Mantle diapir and inward intracontinental subduction: A discussion on the mechanism of uplift of the Qinghai-Tibet Plateau. In: Macfarlane A, Sorkabi R B, Quade J, eds. Himalaya and Tibet: Mountain Roots to Mountain Tops: Boulder, Colorado. Geological Society of America Special Paper, 1999, 328: 19~31
- 13 Li H B, Xu Z Q, Chen W. Southern margin strike-slip fault zone of East Kunlun Mountains: An important consequence of intracontinental deformation. *Continental Dynamics*, 1996, 1(2): 146~155
- 14 许志琴, 杨经绥, 陈方远. 阿尼玛卿缝合带及“俯冲-碰撞”动力学. 见: 张旗主编, 蛇绿岩与地球动力学研究. 北京: 地质出版社, 1996
- 15 钱 辉, 姜 枚, 薛光琦, 等. 天然地震接受函数揭示的青藏高原东部地壳结构. *地震学报*, 2001, 24(1): 103~108
- 16 Peltzer G, Tapponnier P. Formation and evolution of strike-slip faults, rifts and basins during the India-Asia Collision: An experimental approach. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93: 15085~15117
- 17 Yang J S, Xu Z Q, Bai W J, et al. Cenozoic volcanism on the Qinghai-Tibet Plateau and its genesis. *Continental Dynamics*, 1997, 2: 1~11
- 18 许志琴, 姜 枚, 杨经绥, 等. 青藏高原北部隆升的深部构造物理作用. *地质学报*, 1996, 70(3): 193~206
- 19 崔军文, 唐哲民, 邓晋福, 等. 见: 许志琴, 侯立玮, 王宗秀, 等. 阿尔金断裂系. 北京: 地质出版社, 2000
- 20 许志琴, 侯立玮, 王宗秀, 等. 中国松潘甘孜造山带的造山过程. 北京: 地质出版社, 1996
- 21 许志琴, 杨经绥, 姜 枚, 等. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制. *地质学报*, 1999, 73(3): 193~205
- 22 Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 1982, 10: 611~616