

# 青藏高原北缘新生代幔源岩浆活动及构造运动性质\*

罗照华<sup>①</sup> 肖序常<sup>②</sup> 曹永清<sup>③</sup> 莫宣学<sup>①</sup>

苏尚国<sup>②</sup> 邓晋福<sup>①</sup> 张文会<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>)中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; (<sup>②</sup>)中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

(<sup>③</sup>)Department of Earth and Environmental Science, University of Illinois at Chicago, Chicago, IL 60607-7059, USA)

**摘要** 北方板块是否俯冲到了青藏高原之下? 现有的资料尚难对此作出确切的回答. 解决问题的关键之一是青藏高原北缘的新生代岩浆起源与作用过程. 支持俯冲模型的地球物理论据及岩浆活动证据都还不够充分. 然而, 许多证据却表明, 陆-陆碰撞引起的大型剪切断裂和地壳大规模缩短在青藏高原北缘的岩石圈运动中有重要的作用. 青藏高原北缘的幔源岩浆活动局限在大型走滑断裂的交汇部位, 岩浆成因可能与走滑作用导致的局部拉张环境有关. 走滑断裂导致岩石圈的重力不稳定性和垮塌, 深部热物质上升, 它们所携带的热量与剪切作用生成的热一起, 导致含水地幔发生部分熔融.

**关键词** 青藏高原北缘 岩浆活动 俯冲作用 碰撞 走滑断裂 深源包体

青藏高原的形成与演化归因于始于 44~45 Ma 前的印度-亚洲大陆碰撞而导致地壳增厚的结果<sup>[1]</sup>. 通过大量调查研究, 人们从不同的侧面对其形成机制进行了解释<sup>[2]</sup>. 但是, 对于其北缘的岩石圈运动性质则仍然是有争议的. 近年来, 逐渐发现了一些似乎表明北方的塔里木-阿拉善地块向青藏高原北部俯冲的线索<sup>[3~7]</sup>, 因而提出了双向俯冲的概念, 认为青藏高原的隆升和陆壳的增厚是印度大陆向北、亚洲大陆向南俯冲的共同结果<sup>[8,9]</sup>. 然而, 支持俯冲模型的地球物理和岩浆活动证据尚不够充分. 我们的研究发现, 青藏高原北缘的幔源岩浆活动均产于大型走滑断裂的交汇部位及其附近(图 1). 这表明, 在青藏高原北缘的构造变形中, 大型走滑断裂具有重要的意义. 因此, 青藏高原北缘的岩石圈运动可能主要不是俯冲作用, 而是陆-陆碰撞及与其伴生的大型剪切断裂和地壳大规模缩短.

## 1 青藏高原北部边界的性质

青藏高原北部边界大致沿西昆仑-阿尔金-祁连山系与其北部盆地的分界线展布. 根据最新研究结果, 它是由大型走滑断层组成(图 1), 且不同区段具有不同的特征.

2001-02-12 收稿, 2001-07-16 收修稿稿

\*国家重点基础研究发展规划(G1998040807)、国土资源部重点(9501204)、新疆 305(96-915-07-03)和国家自然科学基金重点基金(批准号: F49734230)资助项目

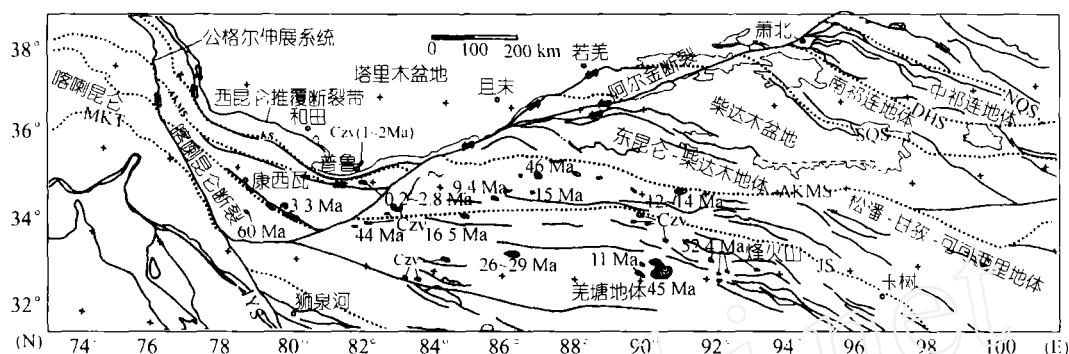


图1 青藏高原北缘的主要断裂系统与新生代岩浆岩(据文献[2]简化)

主要缝合带: IYS-Indus-Yalu 缝合带; JS: 金沙江缝合带; AKMS: 阿尼玛卿-昆仑-慕孜塔格缝合带; NQS: 北祁连缝合带; SQS: 南祁连缝合带; DHS: 党河南山缝合带; KS: 库地缝合带; MKT: 丰塔喇昆仑断层; Czv: 新生代火山岩

## 1.1 阿尔金断裂带

阿尔金断裂带是世界上最大的左行走滑断裂之一, 断裂带总体呈北东 $70^{\circ}$ 展布, 延续将近 $2000\text{ km}^{[9]}$ , 是青藏高原的北部边界<sup>[9,10]</sup>和塔里木盆地的东南边界。

地表地质观察表明, 阿尔金断裂带在不同的部位有不同的倾向, 例如, 苦牙克-且末河口断裂南侧的浊积岩、火山岩向北高角度逆冲到塔里木盆地基底之上, 而且末河口-当金山口断裂则以平均 $70^{\circ}$ 左右的角度向西北倾斜, 北侧的老地质体向南逆冲到新生代地层之上。断裂带的这种性质是沿断裂带岩石物理性质在垂向上变化的结果。Wittlinger 等人<sup>[11]</sup>通过地震波层析技术(tomography)发现有一个沿着阿尔金断裂带展布的、窄而陡的P波低速异常带, 估算其宽度 $\leq 40\text{ km}$ , 深度 $\leq 140\text{ km}$ 。相邻地区的地壳和地幔, 无论是在柴达木还是在阿尔金, 都表现出高P波速度。根据这种分析, 阿尔金断裂主要是向南高角度倾斜的, 并可能切过了整个岩石圈。沿断裂带观测到的P波异常可能与流体活动和剪切生热有关。根据Wittlinger 等人<sup>[11]</sup>, 如果取剪切应力为 $50\sim 100\text{ MPa}$ , 滑移速率取 $2\text{ cm/a}$ , 在 $100\text{ km}$ 深度水平上P波速度减小4%将要求温度升高 $300^{\circ}\text{C}$ , 可以使 $900^{\circ}\text{C}$ 等温面提升 $30\text{ km}$ 。因此, 在强烈挤压应力的作用下, 深部变热了的岩石圈将比较容易发生塑性变形, 从而造成深部的缩短率大于浅部。

基于这种认识, 很可能表明青藏高原北缘的变形缩短主要集中在狭窄的断裂带内, 而不是大范围的分布式缩短和塔里木板块向阿尔金的俯冲。

## 1.2 西昆仑断裂带

根据前人的研究<sup>[12]</sup>, 西昆仑的铁克里克地体被认为是逆冲构造推覆体, 其锋带主体由杜瓦-阿卡孜逆冲断层带组成, 造成在杜瓦及和布公路一带结晶基底逆冲到侏罗纪煤系、白垩-第三纪红层及西域砾岩之上。似乎表明塔里木板块向南发生了“陆内俯冲”。然而, 最新的地球物理探测结果并不支持这样的认识。根据深反射地震测深资料, 高锐等人<sup>[13]</sup>首次揭示了青藏高原北缘与塔里木岩石圈相向俯冲碰撞的图像, 提出西昆仑山与塔里木盆地在岩石圈尺度上呈“V”字型盆山耦合关系。因此, 在西昆仑地区, 青藏高原与塔里木盆地之间主要也不是俯冲-仰冲的关系, 而是大陆碰撞缩短。

另一方面,丁道桂等人<sup>[12]</sup>发现西昆仑普遍发育一组倾向北西  $290^{\circ}\sim 310^{\circ}$ 、倾角  $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$  的拉伸线理,拉伸线理的角闪石 K-Ar 同位素年龄为 6.80~6.69 Ma. 这被认为是造山带推覆后期,由逆冲断层激发转变为平移走滑运动的时间<sup>[12]</sup>. 由此可见,在西昆仑地区,除了大陆碰撞缩短之外,大型走滑构造也是值得重视的.

### 1.3 祁连断裂带

青藏高原的东北边界位于祁连山一带,但是祁连山地区地表断裂构造甚多,对于哪一条断裂可以作为主要边界同样是有争议的. 祁连山北缘断裂地表显示有明显的活动断层的性质,沿断裂带可见变质的前中生代地层向北逆冲于第三系之上,而且在此断裂带上地震活动频繁. 重力资料则表明中祁连北缘断裂应当是青藏高原的北界<sup>[14]</sup>. 但是,反射地震显示祁连山北缘断裂和中祁连山北缘断裂都只在浅部显示,可能终止于地壳低速层的顶面<sup>[15]</sup>. 实际上,河西走廊及其以南地区,无论是山脉或是盆地,地壳都明显增厚,表现出强烈挤压变形的特点<sup>[16]</sup>. 因此,与西昆仑一样,祁连山岩石圈增厚的主要因素也是岩石圈水平缩短,同时存在明显的走滑运动.

## 2 青藏高原北部边缘的新生代岩浆活动与岩石圈运动

综上所述,青藏高原北部边缘构造变形的总体特征是大型走滑和岩石圈在狭窄区域内的大规模缩短,但是不同地段的具体表现形式有所区别. 而要准确理解青藏高原北缘岩石圈运动的特征,查清该区同时期岩浆活动的构造属性是必须的.

### 2.1 壳源岩浆活动?

白云母-二云母花岗岩被认为是陆内俯冲的代表性岩石学纪录,整个北缘地区缺失此类花岗岩的事实证明表壳岩系没有进入地壳深部,最多只能达到上地壳或其底部,其温度上限不会超过  $500^{\circ}\text{C}$ . 因此,尽管某些火成岩的成因可能在某种程度上与陆壳有关,但其根本原因则可能要涉及到更深部的地质过程,而不仅仅是陆壳. 而这也从一个侧面说明北部盆地向南发生俯冲的认识不是岩石圈尺度的,对青藏高原岩石圈动力学的理解不能起到关键性的作用. 因此,对于青藏高原北缘岩石圈运动性质的判断在很大程度上取决于幔源岩浆的问题.

### 2.2 幔源岩浆活动?

根据前人研究藏北新生代火山岩的结果<sup>[3,17]</sup>,藏北火山岩只有部分源于地幔,大部分具有壳、幔混合源. 从岩浆起源及其与岩石圈运动的相互关系角度看问题,在西昆仑发现的新生代晚期高钾火山岩曾经被认为是塔里木板块俯冲到西昆仑之下岩石圈拆沉引发地幔活动的结果<sup>[3,4]</sup>. 但是,这种认识由于以下几个方面的证据成为有争议的议题: (1) 如上所述,根据现代地球物理探测结果,西昆仑、祁连山与其北部盆地之间并没有明显的仰冲-俯冲关系,不支持北方板块向青藏高原俯冲的认识. (2) 俯冲模式不能解释位于青藏高原北缘的一部分火山岩的成因. 例如,普鲁火山岩几乎就位于西昆仑山与塔里木盆地的分界线上,按最新地球物理探测结果,塔里木板块以  $27^{\circ}$  向西昆仑俯冲,即使到达康西瓦断裂带的下面,其顶面深度也才约 100 km,按照俯冲带的热结构模型,不太可能达到引起地幔楔形区发生部分熔融形成幔源岩浆的温度. (3) 前人没有报道具有说服力的幔源物质<sup>[18]</sup>.

### 2.3 康西瓦火山岩及其幔源包体

我们在西昆仑康西瓦地区发现了一种含有幔源橄榄岩包体的碱性玄武岩,是该区存在幔

源岩浆活动的第 1 个有力的证据<sup>[19,20]</sup>, 康西瓦火山岩出露于康西瓦东南约 9 km 处, 喀拉喀什河南岸, 为第四纪火山活动的产物<sup>[1]</sup>, 根据区域对比, 其成分特征类似于黑石北湖和普鲁的火山岩, 火山喷发的时代应当为中晚更新世。

火山岩主要为深灰色, 气孔状构造, 斑状结构, 斑晶含量约为 10%, 斑晶矿物为单斜辉石、斜长石, 常见黑云母(有暗化边), 偶尔见到橄榄石。基质矿物主要为微晶斜长石、单斜辉石等, 部分颗粒可能是橄榄石以及少量玻璃质。据此, 可将其归属为富含挥发分的碱性橄榄玄武岩, 与青藏高原北部大多数地区的火山岩成分有所不同。有意思的是火山岩的稀土元素配分型式是平滑的轻稀土富集型, 岩石化学变异特征也与其他区域的火山岩有很大区别。如图 2 所示, 阿什库勒地区的火山岩图点分布比较连续, 组成碱玄岩-响岩质碱玄岩-玄武粗安岩-粗安岩-粗面岩-流纹岩分异系列; 泉水沟火山岩主要集中于玄武粗安岩区、粗安岩区和流纹岩区, 少量图点落在响岩质碱玄岩区, 也表明在它们的形成过程中结晶分异作用起了重要作用; 康西瓦和黑石北湖火山岩的投点则不是一条演化线上, 而是分为两个群落。

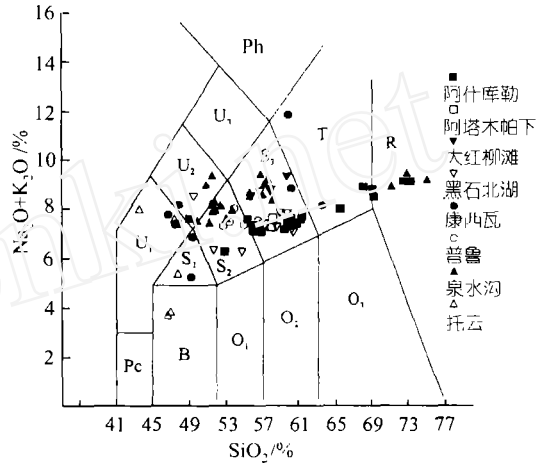


图 2 青藏高原北缘新生代火山岩  $\text{SiO}_2$  -  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  图解

将康西瓦玄武岩与同样含有幔源包体的托云盆地第三纪玄武岩进行对比, 可以发现在  $\text{SiO}_2$  -  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  图解中, 碱性氧化物的含量不是随着  $\text{SiO}_2$  的增加而增加, 而是基本上平行  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  轴分布, 表明其含量与  $\text{SiO}_2$  无关(图 2), 因此, 岩浆中碱性氧化物含量的增加或减少没有受到分离结晶或同化混染作用的影响, 而是主要受制于源区富碱矿物进入熔浆的比例。

根据尖晶石中  $\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})$  比值, 橄榄岩包体的形成压力大致为 1.6 GPa 左右, 约相当于深度 56 km<sup>[20]</sup>, 比中国东部同类岩石来源深度浅(东部可达 85 km 以上)。利用 C. C. Mercier (1980) 提出的方法计算(OPx+Spl 矿物对), 结果类似, 为 1.62 GPa。根据橄榄石与尖晶石平衡关系, 其形成温度为 882℃。利用这两组数据, 在 MacGregor (1974) 提供的图解(图 3)中, 投在尖晶石相与镁铝榴石相地幔橄榄岩分界线和大洋地温曲线附近, 表明橄榄岩及其寄主玄武岩来源于热的地幔源区。由此可见, 无论是火山岩的成分特征, 抑或是其中所包含的的上地幔岩石包体, 均表明新生代晚期青藏高原北缘确实存在幔源岩浆活动, 从而也为由地球化学研究得出的结论提供了支持。

## 2.4 幔源岩浆的起源及其构造环境分析

世界上大部分含深源包体的幔源岩浆都出现在岩石圈相对比较薄的地区, 如中国东部裂谷区。这些地区处于拉张构造环境, 岩石圈和地壳都比较薄。像青藏高原这样具有双倍陆壳的造山带, 出现代表幔源岩浆快速上升的含橄榄岩包体的玄武岩, 必然有其特殊的机制。

1) 新疆区域测量地质调查大队, 新藏公路沿线地质调查报告(1:1 百万), 1983

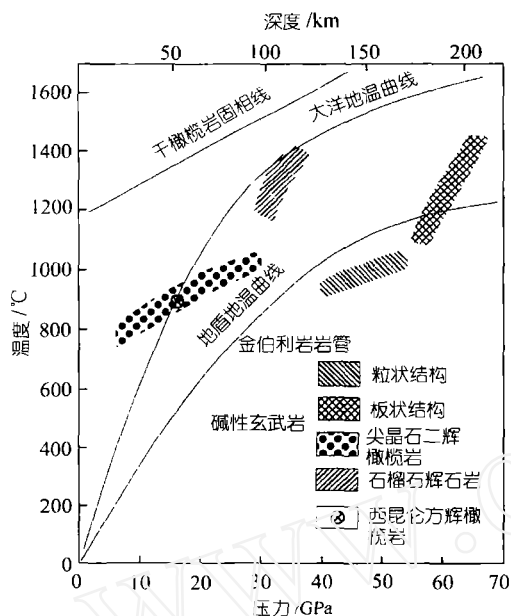


图 3 地幔岩分布图(据 MacGregor(1974)重画)

在塔里木盆地周边地区,含幔源橄榄岩包体的碱性玄武岩均出露在大型走滑断裂的交汇部位附近,例如托云盆地<sup>[21]</sup>位于费尔干纳断裂与西南天山断裂的交汇部位、皮羌火山岩(罗照华,未发表资料)位于西南天山断裂与皮羌断裂的交汇部位.从这个角度来说,幔源岩浆活动很可能与大型走滑断裂有关.

康西瓦玄武岩出露在著名的康西瓦断裂带上,后者被认为是一条形成于晚华力西-印支期的古缝合带.作为西昆仑与喀喇昆仑两个构造分区的界线,该断裂长达 1000 km,至今仍在活动.已知最年轻的测年数据,是喀拉库里湖边形成长线理的角闪石 K-Ar 同位素年龄,为 6.8~6.69 Ma<sup>[12]</sup>.因此,这条断裂带是一条年轻(复活)的大型右行走滑断裂带,与火山活动的时代相近.天然地震研究表明,断裂带出露的位置为无深源地震区,断裂带以南深源地震深度可达 150 km,以北可达 80 km.这表明与阿尔金断裂带一样,沿康西瓦断裂带是一个地热异常区.同时,

宽频带地震揭示断裂以北的昆仑山区有两个明显的反射层,其中 15 km 深的反射层可能代表上、下地壳分界,45 km 深的界面代表莫霍面.两个界面向北倾斜,可能暗示了塔里木板块与青藏高原之间的碰撞<sup>[13]</sup>和康西瓦一带软流圈的抬升,而不是塔里木板块向南的俯冲.

在南北向挤压的总体构造体制内,软流圈的向上抬升伴随着岩石圈各个界面的相对抬升、下地壳流动以及莫霍面变浅,从而造成西昆仑山区结构界面的向北倾斜.在这种情况下,软流圈的减压熔融是有可能的.因此,我们可以将青藏高原北缘新生代幔源岩浆活动主要归因于软流圈的减压熔融.

### 3 一个简单模型

到目前为止发表的地质模型中,很难对青藏高原北缘年轻幔源火山活动做出解释.在综合前人的工作成果与我们新发现的地质事实的基础上,提出一个简单模型,试图从岩石圈演化与壳、幔相互作用的角度做出初步解释.

我们认为,促成青藏高原北缘幔源岩浆活动的主要因素包括:(1)走滑断裂的剪切生热作用,普遍提高断裂带附近岩石的温度;(2)走滑断裂的主干部位比较紧闭,两端由于断裂两侧的应力不一致,有可能造成局部应力松弛与引张;(3)应力松弛或引张造成岩石圈根部垮塌,促使软流圈物质上涌;(4)深部流体交待作用使得地幔物质更容易发生部分熔融作用形成岩浆.

在青藏高原向北移动与北方板块(塔里木-阿拉善)相互作用过程中,青藏高原北缘发生挤压造山运动,地壳缩短,岩石圈增厚.在地壳增厚的过程中,伴随着矿物相变,岩石密度不断增加,岩石圈处于重力不稳定的状态.当强烈的挤压转换为大型剪切作用时,沿青藏高原北缘

发生大规模走滑, 这种走滑在阿尔金山表现尤为明显, 而在西昆仑山和祁连山则兼具走滑与挤压的性质。在阿尔金断裂的走滑过程中, 各个部位的走滑速度与距离是有差别的。在它的两端, 由于一侧受到青藏高原(西昆仑)和/或阿拉善(祁连山)的阻挡, 相应的块体运动减弱, 造成另一侧出现局部拉张, 从而使已经处于不稳定状态的岩石圈发生崩塌, 进而导致软流圈物质的大规模上涌。上涌的软流圈物质有可能取得减压熔融的条件, 奠定了发生部分熔融的基础; 剪切作用产生的热量的聚集可以作为这种部分熔融作用的催化剂, 而深部流体的介入也可能对地幔发生部分熔融有重要影响。

**致谢** 本文得到密苏里大学刘勉教授大力支持, 为本文的完成提供了良好的条件; 伊利诺依大学 M. Flower 教授多次参与讨论, 提出了宝贵意见, 在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. *Science*, 1975, 189: 419~426
- 2 Yin An, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2000, 28: 211~280
- 3 Arnaud N, Vidal P O, Tapponnier P, et al. The high  $K_2O$  volcanism of northwestern Tibet: Geochemistry and tectonic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 111: 351~367
- 4 Deng Wanning. Mineralogical features of rock-forming minerals from Cenozoic rocks of North Tibet. *Scientica Geologica Sinica*, 1992, 1: 135~147
- 5 Matte Ph, Tapponnier P, Arnaud N, et al. Tectonics of Western Tibet, between the Tarim and the Indus. *Earth Planet Science Letters*, 1996, 142(3-4): 311~330
- 6 Matte Ph, Mattauer M, Olivet J M, et al. Continental subduction beneath Tibet and the Himalayan orogeny: A review. *Terra Nova*, 1997, 9(5-6): 264~270
- 7 高 锐, 成湘州, 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
- 8 Lyon-Caen H, Molnar P. Gravity anomalies and the structure of western Tibet and the southern Tarim Basin. *Geophys Res Lett*, 1984, 11: 1251~1254
- 9 Ryerson F J, Pelzer G, Tapponnier P, et al. Active slip-rates on the Altyn Ragh Fault Karakax valley segment: Constraints from surface exposure dating. *AGU 1999 Fall Meeting*, 1999. 1008~1009
- 10 Xiaodian J, Marcia K M, Yu J. Models of lithospheric deformation beneath the Altyn Tagh and West Kunlun faults from recent gravity surveys. *AGU 1999 Fall Meeting*, 1999. 1008
- 11 Wittlinger G, Tapponnier P, Poupinet G, et al. Tomographic evidence for localized lithospheric shear along the Altyn Tagh Fault. *Science*, 1998, 282: 74~76
- 12 丁道柱, 王道轩, 刘伟新. 西昆仑造山带与盆地. 北京: 地质出版社, 1996. 230~240
- 13 高 锐, 黄尔定, 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
- 14 孟令顺, 管 烨, 齐 立, 等. 格尔木-额济纳旗地学断面及其邻区重力场与深部地壳构造. *地球物理学报*, 1995, 38(增刊 II): 36~45
- 15 崔作舟, 李秋生, 吴朝东, 等. 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
- 16 邓晋福, 吴宗繁, 杨建军, 等. 格尔木-额济纳旗地学断面走廊地壳-上地幔岩石学结构与深部过程. *地球物理学报*, 1995, 38(增刊 II): 130~143
- 17 Turner S, Hawkesworth C, Jiaqi L, et al. Timing of Tibetan uplift constrained by analysis of volcanic rocks. *Nature*, 1993, 364(1): 50~54
- 18 邓万明, 钟大赉. 壳幔过渡带及其在岩石圈构造演化中的地质意义. *科学通报*, 1997, 43(23): 2474~2482
- 19 Luo Zhaohua, Zhang Wenhui, Deng Jinfu, et al. Implications of the deep-seated xenoliths in Cenozoic basalt in Kangxiwa, west Kunlun, China. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(Supp): 76~78
- 20 罗照华, 张文会, 邓晋福, 等. 西昆仑地区新生代火山岩中的深源包体. *地学前缘*, 2000, 7(1): 295~298
- 21 韩宝福, 王学潮, 何国琦, 等. 西南天山早白垩世火山岩中发现地幔和下地壳捕虏体. *科学通报*, 1998, 43(23): 2544~2547