

新疆托云火山群 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及其动力学意义*

梁涛 罗照华** 柯珊 魏阳 李德东 黄金香 黄凡

LIANG Tao, LUO ZhaoHua**, KE Shan, WEI Yang, LI DeDong, HUANG JinXiang and HUANG Fan

中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2007-02-14 收稿, 2007-05-23 改回.

Liang T, Luo ZH, Ke S, Wei Y, Li DD, Huang JX and Huang F. 2007. SHRIMP zircon dating of the Tuyon volcanoes group, Xinjiang, and its geodynamic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6):1381-1391

Abstract Tuyon basin is a Cenozoic tectono-volcanic depression located in Southwest Tien Shan, Xinjiang, NW China. The volcanic rocks are mainly of basaltic composition and occur as cone dikes, lava sheets, caldera, volcanic necks and veins. Autoclastic breccia is very prevalent in lava sheets. Many deep-seated xenoliths are occurred in the cone sheets. It indicates the cone sheets are the products of primary magma. The SHRIMP dating of zircons shows age of 48.1 ± 1.6 Ma of a cone sheet. The dating results of the bottom lava layer of the caldera (Sample No. A015D) can be divided distinctly into two groups: the late Archean and the early Proterozoic. The oldest age reaches 2.5 Ga, which means the Tarim block basement is probably involved in the orogenic processes of Tien Shan. The zircons from upper layer of caldera (Sample No. A015E) have shown more dispersive ages (almost distributed to the overall Paleozoic except Cambrian and Devonian), recorded the evolution process of Tien Shan. The sample A-D016 is from volcanic neck, and its zircon SHRIMP ages imply a large time span, including early Proterozoic, Devonian, Permian and Triassic. The SHRIMP dating of the cone sheet suggests that the initial time of volcano activity in the Tuyon basin is in Paleogene, it is approximately the same as in north Tibet. It may be indicates the intrinsic relationship between Cenozoic intraplate orogenesis of Tien Shan and Indian-Asian continental collision. The coexistence of zircons of different genesis and formation time reveals the lithosphere of SW Tien Shan has undertaken complex evolution, and further suggests the formation of Tuyon volcano group is related to regional lithosphere delamination.

Key words Tuyon volcanoes group, SHRIMP, Volcanic apparatus, Tarim basin, Tien Shan, Tibetan plateau

摘要 新疆西南天山托云盆地是一个新生代火山构造盆地。盆地内火山岩主要为玄武质岩石,呈锥状岩席、熔岩被、塌陷破火山口、火山颈和岩脉产出,常见流动自碎角砾岩。锥状岩席含有大量深源岩石包体,具有原生岩浆的性质,其 SHRIMP 锆石 U-Pb 法定年结果为 48.1 ± 1.6 Ma。塌陷破火山口附近熔岩层底部的锆石(样品 A015D)给出比较集中的新太古宙和古元古代年龄,最老可达 2.5 Ga,可能代表了塔里木地块基底的卷入;而上部岩层的锆石(样品 A015E)年龄则比较分散,几乎贯穿整个古生代(寒武纪和泥盆纪除外),是天山古造山带演化历史的记录。火山颈锆石(样品 A-D016)的年龄时间跨度最大,包括古元古代,古生代泥盆纪和二叠纪以及中生代三叠纪。SHRIMP 测年结果证实了托云火山群开始活动的时代为古近纪,与藏北新生代岩浆活动的起始时间大致相同,揭示了天山新生代板内造山过程与印度-亚洲大陆碰撞的内在联系。不同成因与形成时间的锆石共存,显示了西南天山岩石圈演化的复杂性,托云火山群的形成与岩石圈拆沉作用有关。

关键词 托云火山群; SHRIMP; 火山机构; 塔里木盆地; 天山; 青藏高原

中图法分类号 P588.145; P597.3

* 国家自然科学基金项目(40472038)和国家重点基础发展规划项目(2002CB412603)。

第一作者简介:梁涛,男,1979年生,硕士生,岩石学专业,岩浆作用与成矿研究方向, E-mail: liang20010212@126.com

** 通讯作者:罗照华,男,1956年生,教授,博士生导师,矿物岩石矿床学、区域岩石大地构造专业, E-mail: luozh@cugb.edu.cn

近年来,大量证据表明,印度-亚洲大陆碰撞导致了青藏高原的生长(如 Tapponnier *et al.*, 2001),也影响了周边地区的地质演化(Molnar and Tapponnier, 1975; Yin *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2001; Yang and Liu, 2002; Stephen *et al.*, 2002; 罗照华等,2003,2004,2006a)。例如,现代 GPS 测量表明,印度-亚洲大陆碰撞不仅导致青藏高原地壳向东横向挤出(Wang *et al.*, 2001; Shapiro *et al.*, 2004),并叠置在扬子板块之上(Liu *et al.*, 2000),而且通过塔里木板块远远传递到天山及其以北地区(Abdrakhmatov *et al.*, 1996; Wang *et al.*, 2001; Yang *et al.*, 2002)。因此,天山板内造山带的形成被认为是印度-亚洲大陆碰撞的远程效应,是在古造山带基础上活化形成的新生代叠加改造型造山带(Vinnik *et al.*, 2004)。由此,天山新生代板内造山过程可能与青藏高原的演化密切相关。罗照华等(2006a)对印度-亚洲大陆碰撞能否导致亚洲大陆内部如此广泛而强烈的新生代构造岩浆活动提出质疑,认为强有力的地幔汇聚更可能是亚洲大陆新生代变形的主因。然而,不管是哪一种机制,青藏高原及其邻区的演化都应当是在同一种动力学体制下的产物。由此,青藏高原周边地区的新生代地质演化应当与高原的生长存在耦合和拆耦效应,通过周边地区新生代构造演变历史的研究也可以有效地约束青藏高原的形成及演化过程。

西南天山发育有新生代幔源岩浆活动,其中托云盆地被作为是天山地区最有代表性的火山活动发育区,近年来引起了国内外的广泛注意(韩宝福等,1998; Sobel *et al.*, 2000; 王彦斌等,2000; 郑建平,2001; 徐学义等,2003; 梁涛等,2005; 季建清等,2006)。但是,长期以来,对托云盆地火山岩的形成时代存在巨大的争议(梁涛等,2005)。早期关于托云火山岩的形成时代主要是从地层学的角度进行了论证,将位于介壳灰岩(含瓣鳃: *Gryphaea* sp., 等)岩层之上的火山岩划归渐新世,含化石层位下部的火山岩则被认为形成于古新世(新疆维吾尔自治区地层表编写组,1981)。近年来,对托云火山岩的同位素年代学研究取得了一系列 K-Ar 法和 Ar-Ar 法测年结果(韩宝福等,1998; Sobel *et al.*, 2000; 王彦斌等,2000; 季建清等,2006),这些年龄相对集中在 120 ~ 110Ma 和 67 ~ 36Ma 两个年龄段内。据此,托云火山岩被分别归属为早白垩世和古近纪,习惯上分别称为下玄武岩和上玄武岩(Sobel *et al.*, 2000; 王彦斌等,2000)。然而,详细的野外地质观察表明,所谓的下玄武岩与中一下侏罗统之间表现为侵入接触关系,实际上是一系列岩席(梁涛等,2005),上述测年结果的地质意义因而存在某种不确定性。对火山岩形成时代的争议削弱了火山岩在区域地球动力学研究中的地位。因此,查明托云盆地火山岩的形成时代具有重要的地质意义。

1 地质特征

托云盆地位于天山造山带、西昆仑褶皱系和塔里木板块

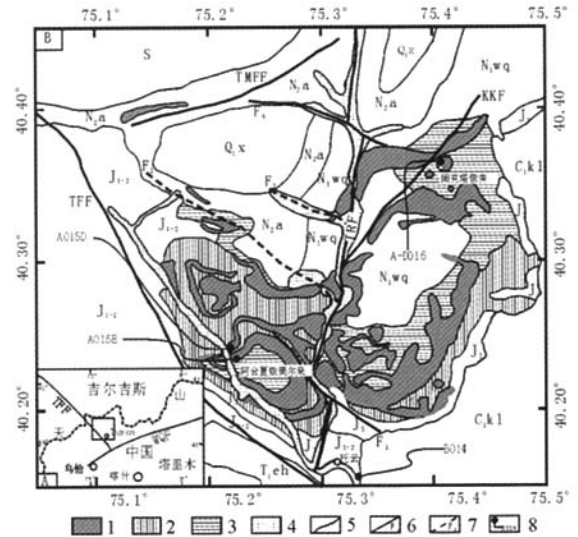


图1 托云盆地地质略图(据梁涛等,2005)。

1-火山岩; 2-白垩系砂岩; 3-古近纪砂岩; 4-第四系; S-志留系; C₁kl-下石炭统喀拉格尔加组; T₁eh- 下三叠统俄罗斯布拉克群; J₁₋₂-下-中侏罗统; J₃-上侏罗统; K₁kz-下白垩统克孜勒苏群; Eks-古近纪喀什群; N₁wq-乌恰群; N₂a-阿图什组; Q₁x-西域组; 5-地质界线; 6-断层; 7-推测断层; 8-取样位置及样品编号

Fig. 1 A geologic sketch map of the Tuyon basin

三大构造域之间,属于天山褶皱系南天山褶皱带托云山间拗陷小区,塔拉斯-费尔干纳断裂(TFF)作为小区西界与东阿赖复向斜小区相隔,东北与阔克沙勒岭小区相接,南侧以乌恰断裂(WQF)与柯坪块隆为界(新疆维吾尔自治区地质矿产局,1993)(图1A)。盆地内广泛出露石炭系、侏罗系、古近系(图1B)。火山岩主要分布于盆地的中南部,可以划分为熔岩流相、火山颈相、破火山口相和潜火山脉岩相。托云盆地内的岩浆活动造就了规模不等的7个火山口,形成的火山机构主要包括塌陷破火山口、火山颈和锥状岩席(梁涛等,2005)。因此,托云盆地的火山-沉积岩系是由多个火山的喷出物与正常沉积层构成的复杂岩石组合,代表性火山岩出露地点为阿合夏依奥尔呆塌陷破火山口、托云乡东南锥状岩席和阔克塔依旁火山颈(梁涛等,2005)。

阿合夏依奥尔呆塌陷破火山口位于托云乡西北约10km处,平面上呈近椭圆形。火山岩叠盖在早白垩纪砂岩层之上,火山口外侧的中生代地层中断续分布有弧形展布的玄武质脉岩(图1B)。最底部玄武岩岩层(A015D 采样位置)产状与早白垩系基本一致,后者发育有明显的烘烤边。喷出岩岩层自下向上依次为柱状节理发育的玄武岩、伊丁石橄榄玄武岩、气孔(杏仁)构造发育的玄武岩,最上部的伊丁橄榄玄武岩(A015E 采样位置)被近水平的古近纪砂岩层角度不整合覆盖(梁涛等,2005)。

沿喀什-托云公路旁距托云乡东南约500m处见有良好的岩席露头。锥状岩席呈微角度不整合侵入于侏罗系中,局

部地段顺层侵入到沉积岩中,后者在接触部位有明显的被烘烤现象。该处出露的锥状岩席以含有大量高压巨晶(吕勇军等,2006)和深源岩石包体为特征,自下而上依次为含细粒(<2cm)高压巨晶的玄武岩(B014 采样位置)、含粗粒(>5cm)高压巨晶的玄武岩、含深源岩石包体玄武岩、含长石巨晶玄武岩和几乎不含深源物质的玄武岩。根据深源物质种类和含量的横向变化,推测该处岩席是托云火山群岩浆活动的补给通道。

阔克塔依旁火山颈(A-D016 采样地点)位于托云盆地的东北部,平面上呈近等轴状,直径约为1.5km,与周围的古近纪地层相比呈明显的正地形。它主要由碱性橄榄玄武岩组成,柱状节理极为发育,地形陡峭。岩石呈钢灰色,含有大量橄榄石捕虏晶。

2 样品描述

为了获取火山岩的准确形成年龄,我们对托云火山群中不同产状的玄武岩采集了代表性样品进行 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测定。其中锥状岩席中采取玄武岩样品一个(样品 B014),阔克塔依旁火山颈的碱性橄榄玄武岩样品一个(样品 A-D016),阿合夏依奥尔呆塌陷破火山口西北侧熔岩的上部伊丁石化橄榄玄武岩(样品 A015E)和底部橄榄玄武岩(样品 A015D)样品各一个。具体的采样位置示于图1以及火山岩剖面图(梁涛等,2005)。

样品 B014 采自托云乡东南锥状岩席的底部,质量为6.35kg。岩石为深灰色,斑状结构,块状构造,斑晶主要为单斜辉石、斜长石和金云母,具有碱性玄武岩的特征(Sobel *et al.* 2000)。基质为间隐结构,主要由单斜辉石微晶、斜长石微晶、磁铁矿微晶和火山玻璃组成。该样品中没有取得晶形完整的锆石颗粒,全部为碎粒状锆石。锆石碎片大部分呈淡黄色,干净透明,粒径100~200 μm ,发育清晰的振荡环带(图2),为典型的岩浆成因锆石(吴元保和郑永飞,2004;简平等,2001)。由此,推测所取得的锆石颗粒为碎样过程中碾碎的锆石巨晶碎片,是直接玄武岩岩浆中结晶的产物。

样品 A015D 采自阿合夏依奥尔呆塌陷破火山口西北侧熔岩的底部,质量为3.78kg。岩石呈钢灰色,气孔状构造,斑状结构。斑晶主要为橄榄石,边部已伊丁石化,含少量单斜辉石;基质为间粒结构,斜长石微晶呈长柱状,其间充填辉石和磁铁矿颗粒。样品 A015D 中的锆石颗粒大部分透明,部分锆石可见裂纹和暗色包裹体,部分它形,部分自形,呈短柱状—等轴状,粒径50~100 μm 。锆石晶体虽然也发育振荡环带,但不如样品 B014 的锆石颗粒清晰,显示有退晶化现象,并普遍见有次生加大边和溶蚀边。这表明,该样品的锆石可能是由玄武岩岩浆捕获而来。

样品 A015E 采自阿合夏依奥尔呆塌陷破火山口西北侧熔岩的上部,质量为4.36kg。岩石呈深灰色,气孔状构造;斑状结构,斑晶主要为橄榄石(发育伊丁石化)、单斜辉石和

斜长石;基质为间粒结构,主要由单斜辉石微晶、斜长石微晶和磁铁矿微晶组成。锆石颗粒大部分呈浅淡黄色,清彻透明,它形柱粒状,边缘有明显圆化现象,粒径50~100 μm 。依据 CL 图像,锆石退晶化现象较轻微,但同样也具有岩浆锆石的特征(图2),并经受了叠加变质改造。

样品 A-D016 采自阔克塔依旁火山颈,质量为4.24kg。岩石呈深灰色,块状构造;斑状结构,斑晶主要为橄榄石、单斜辉石;基质间粒结构,主要造岩矿物为单斜辉石微晶、斜长石微晶、磁铁矿。该样品中的锆石大部分透明,部分锆石可见裂纹和暗色包裹体,部分它形,部分自形,呈短柱状、四方柱状、等粒状,粒径50~150 μm 。锆石颗粒被溶蚀和退晶化现象明显,但部分锆石(如第7号锆石)具有明显的环带结构,以及第1号锆石显示明、暗相间的结构特征。

据此,所采样品中可能只有样品 B014 的锆石是直接来自寄主岩浆中结晶形成,其余样品中的锆石均可能为捕虏晶。

3 分析方法

将样品去除表层后用磨式碎样机破碎至所需的粒径,用人工淘洗的方法进行粗淘,分离出灰色重砂和尾砂。对灰色重砂部分在强磁环境中去除强磁性矿物,对非强磁性部分进一步用电磁选仪进行分选以去除电磁性矿物。在此基础上,进行精淘,并对无磁重矿物用高频介电仪提纯分离出锆石。然后,在双目镜下进行人工精选提纯,每个样品获得锆石颗粒30粒以上。将样品锆石与标样锆石(TEM)一起粘贴在环氧树脂表面打磨抛光制靶,详细的制靶过程请参阅文献(宋彪等,2002)。样品靶制成以后,首先在光学显微镜下对所有锆石样品进行反射光和透射光观察,然后进行阴极发光(CL)照相。在对这些样品特征进行综合分析的基础上查明锆石的成因,同时设计最恰当的测点以避免包裹体或杂质、裂缝,以保证 SHRIMP 定年的质量。

锆石 U-Pb 测年分析在北京离子探针中心的 SHRIMP II 上完成,详细分析原理参考 Compston *et al.* (1984; 1992) 及 Williams and Claesson(1987)。在分析过程中,采用单接受方式测定了 Zr_2O^+ , $^{204}\text{Pb}^+$ 的背景值以及 ^{206}Pb , $^{207}\text{Pb}^+$, $^{208}\text{Pb}^+$, U^+ , ThO^+ 和 UO^+ 等6个离子的质量峰强度,每一个测点是由5次扫描构成的。一次离子为约4.5nA,10kV的 O^{2-} ,靶径约为25~30 μm 。用澳大利亚国家地调局标准锆石 TEM (417 Ma) 进行元素间的分馏校正,应用 RSES(澳大利亚国立大学地学院)标准锆石 SL13(年龄572 Ma, U 含量 238×10^{-6}) 标定所测锆石的 U, Th 和 Pb 含量。数据处理和年龄计算采用 SQUID (Ver. 1.03d) 和 ISOPLOT (Ver. 2.49S) 程序,应用实测 ^{204}Pb 校正,普通铅使用直接测定方法。因年轻的锆石(<1000Ma)中放射成因的 ^{207}Pb 含量较少,分析过程中容易产生较大的误差,故对年轻的锆石(<1000Ma)均使用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,而对于较老的锆石(>1000Ma)则使用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄。

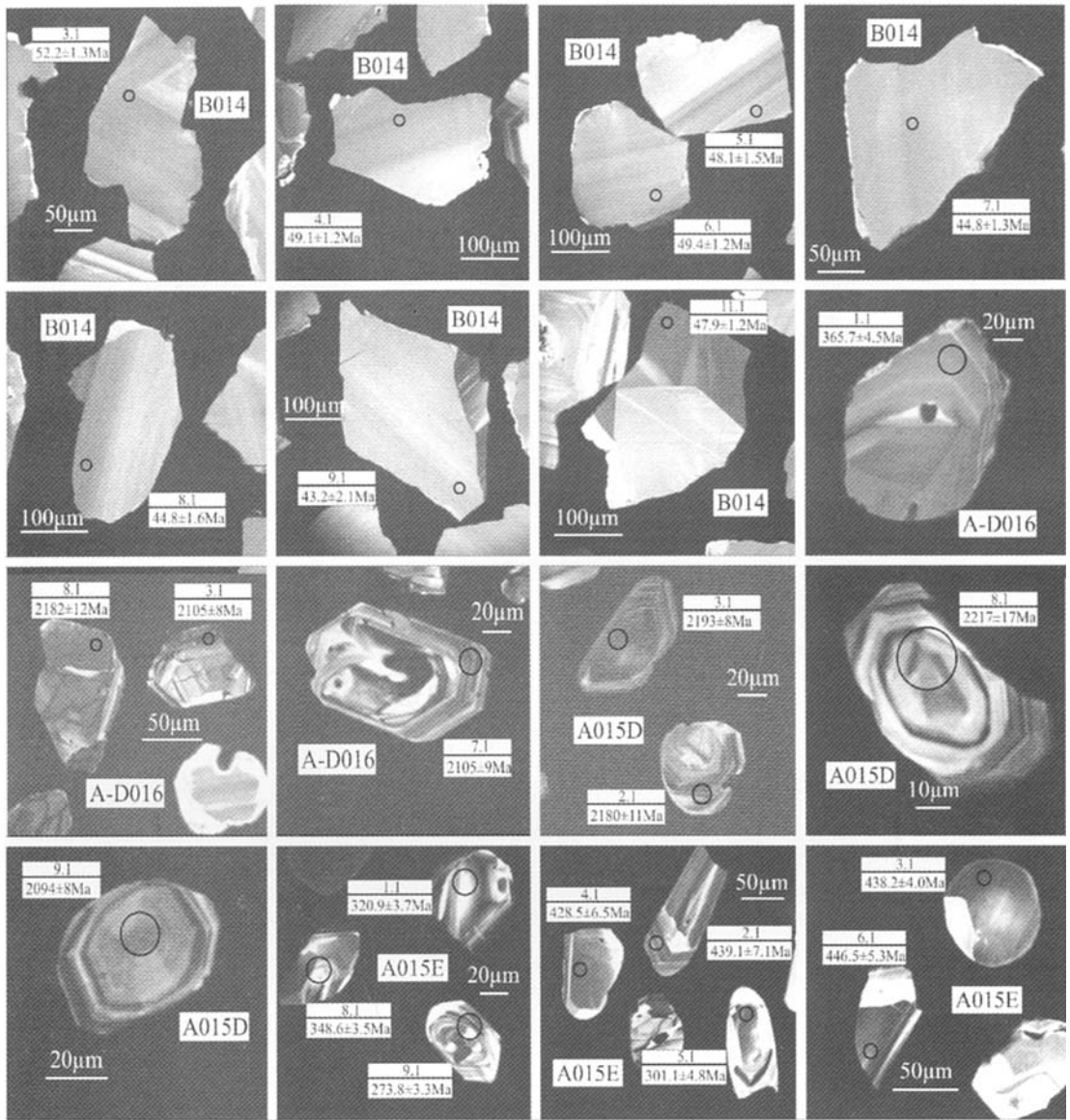


图2 托云火山岩中部分锆石阴极发光(CL)图像。

Fig.2 Cathodoluminescence images of zircons from the volcanic rocks in Tuyon basin

4 测定结果

样品测定结果见表1和图3。

对样品 B014 中的锆石进行了 13 测点的分析(表 1), 所有测点均给出基本一致的年龄(43.2 ~ 52.2Ma), 在一致曲线图中集中分布于一致线上或其附近, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $48.1 \pm 1.6\text{Ma}$ (95% 致信度), $\text{MSWD} = 0.61$ (图 3)。如果去除 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值偏离一致线较大的四个点, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄约为 46.3Ma, 变化范围为 43.2 ~ 50.1Ma。根据前面描述的锆石 CL 图像特征, 这个年龄测定值可以解释为岩浆

锆石的结晶年龄。

对样品 A015D 进行了 11 个测点的分析, 年龄值均分布于一致线上或其附近(图 3), 但有两个明显的集中区域。第一组有两个测点, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值分别为 $2521 \pm 12\text{Ma}$ 和 $2542 \pm 14\text{Ma}$, 加权平均值为 $2530 \pm 18\text{Ma}$, $\text{MSWD} = 1.3$, 它是本次 SHRIMP 测试中得到的最古老的年龄。第二组由剩余 9 个测点组成, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2186 \pm 7\text{Ma}$, $\text{MSWD} = 1.3$ (除去测点 9.1)。

样品 A015E 中锆石 12 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值几乎分布于一致曲线上, 但时间跨度大, 年龄区间为 469.9 ~ 273.8Ma, 大致可以归并为分别属于早古生代和晚古生代的

表1 托云火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 分析数据

Table 1 SHRIMP U-Pb assay results of zircon from Tuyon volcanic rocks

点号	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	Th/U	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\times 10^{-6}$)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 (Ma) ($\pm 1\sigma$)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 (Ma) ($\pm 1\sigma$)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ($\pm 1\sigma$)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ($\pm 1\sigma$)
B014 块状玄武岩(托云乡东南锥状岩席最底部岩层)								
1.1	462	1354	3.03	2.93	46.7 \pm 1.2	262 \pm 327	0.0073 \pm 0.0002	0.0515 \pm 0.0073
2.1	721	2628	3.76	4.87	50.1 \pm 1.1	760 \pm 162	0.0078 \pm 0.0002	0.0646 \pm 0.0050
3.1	447	1375	3.18	3.11	52.2 \pm 1.3	1081 \pm 100	0.0081 \pm 0.0002	0.0755 \pm 0.0038
4.1	401	1006	2.59	2.65	49.1 \pm 1.2	1097 \pm 205	0.0077 \pm 0.0002	0.0761 \pm 0.0078
5.1	356	986	2.86	2.40	48.1 \pm 1.5	—	0.0075 \pm 0.0002	0.0321 \pm 0.0152
6.1	403	1154	2.96	2.68	49.4 \pm 1.2	1117 \pm 262	0.0077 \pm 0.0002	0.0768 \pm 0.0101
7.1	247	472	1.98	1.60	44.8 \pm 1.3	—	0.0070 \pm 0.0002	—
8.1	358	1064	3.07	2.30	44.8 \pm 1.6	—	0.0070 \pm 0.0002	0.0335 \pm 0.0199
9.1	236	544	2.39	1.55	43.2 \pm 2.1	—	0.0067 \pm 0.0003	—
10.1	502	1753	3.61	3.15	46.5 \pm 1.2	405 \pm 238	0.0072 \pm 0.0002	0.0548 \pm 0.0058
11.1	733	2483	3.50	4.96	47.9 \pm 1.2	—	0.0075 \pm 0.0002	0.0232 \pm 0.0109
12.1	249	729	3.03	1.70	45.5 \pm 2.2	—	0.0071 \pm 0.0003	—
13.1	320	1222	3.95	2.18	46.6 \pm 1.6	—	0.0073 \pm 0.0002	—
A-D016 碱性橄辉玄武岩(阔克塔依旁火山颈)								
1.1	226	157	0.72	11.3	365.7 \pm 4.5	776 \pm 91	0.0584 \pm 0.0007	0.065 \pm 0.0028
2.1	454	220	0.50	149.0	2,085 \pm 16	2,159 \pm 11	0.3819 \pm 0.0034	0.1346 \pm 0.0008
3.1	857	375	0.45	223.0	1,701 \pm 12	2,105 \pm 8	0.3020 \pm 0.0024	0.1305 \pm 0.0006
4.1	1266	794	0.65	48.5	271.9 \pm 2.7	1,150 \pm 89	0.0431 \pm 0.0004	0.0781 \pm 0.0035
5.1	504	217	0.45	167.0	2,103 \pm 15	2,166 \pm 9	0.3858 \pm 0.0033	0.1351 \pm 0.0007
6.1	1073	414	0.40	239.0	1,487 \pm 11	1,981 \pm 10	0.2594 \pm 0.0021	0.1217 \pm 0.0007
7.1	909	428	0.49	239.0	1,722 \pm 12	2,105 \pm 9	0.3063 \pm 0.0024	0.1305 \pm 0.0006
8.1	387	115	0.31	135.0	2,196 \pm 20	2,182 \pm 12	0.4059 \pm 0.0045	0.1364 \pm 0.0010
9.1	801	462	0.60	24.8	225.2 \pm 3.3	71 \pm 130	0.0356 \pm 0.0005	0.0474 \pm 0.0027
10.1	327	215	0.68	113.0	2,186 \pm 17	2,151 \pm 12	0.4036 \pm 0.0038	0.1340 \pm 0.0009
11.1	851	146	0.18	193.0	1,506 \pm 13	2,083 \pm 12	0.2631 \pm 0.0025	0.1289 \pm 0.0009
12.1	686	330	0.50	190.0	1,798 \pm 14	2,075 \pm 10	0.3218 \pm 0.0029	0.1283 \pm 0.0008
13.1	566	134	0.24	158.0	1,813 \pm 13	2,093 \pm 10	0.3248 \pm 0.0027	0.1296 \pm 0.0008
A015D 玄武岩(阿合夏依奥尔呆塌陷破火山口西北一侧底部熔岩)								
1.1	424	216	0.53	185.0	2,645 \pm 45	2,521 \pm 12	0.5070 \pm 0.0100	0.1663 \pm 0.0012
2.1	265	158	0.61	96.8	2,280 \pm 39	2,180 \pm 11	0.4243 \pm 0.0087	0.1362 \pm 0.0008
3.1	598	387	0.67	214.0	2,246 \pm 38	2,193 \pm 8	0.4168 \pm 0.0084	0.1373 \pm 0.0007
4.1	261	131	0.52	91.5	2,206 \pm 39	2,178 \pm 12	0.4081 \pm 0.0084	0.1361 \pm 0.0010
5.1	158	144	0.94	67.6	2,600 \pm 46	2,542 \pm 14	0.4970 \pm 0.0110	0.1684 \pm 0.0014
6.1	448	303	0.70	140.0	2,002 \pm 35	2,178 \pm 10	0.3641 \pm 0.0074	0.1361 \pm 0.0008
7.1	587	446	0.79	204.0	2,188 \pm 38	2,167 \pm 10	0.4041 \pm 0.0082	0.1352 \pm 0.0007
8.1	212	84	0.41	76.5	2,263 \pm 42	2,217 \pm 17	0.4205 \pm 0.0092	0.1392 \pm 0.0014
9.1	1297	860	0.69	382.0	1,901 \pm 34	2,094 \pm 8	0.3430 \pm 0.0071	0.1297 \pm 0.0006
10.1	828	764	0.95	280.0	2,141 \pm 37	2,185 \pm 8	0.3939 \pm 0.0080	0.1366 \pm 0.0006
11.1	178	116	0.67	64.6	2,269 \pm 42	2,231 \pm 16	0.4219 \pm 0.0092	0.1403 \pm 0.0013
A015E 伊丁橄辉玄武岩(阿合夏依奥尔呆塌陷破火山口西北一侧上部熔岩)								
1.1	298	190	0.66	13.20	320.9 \pm 3.7	371 \pm 160	0.0510 \pm 0.0006	0.0540 \pm 0.0038
2.1	110	37	0.35	6.8	439.1 \pm 7.1	-19 \pm 360	0.0705 \pm 0.0012	0.0457 \pm 0.0068
3.1	453	268	0.61	27.50	438.2 \pm 4.0	319 \pm 63	0.0703 \pm 0.0007	0.0528 \pm 0.0015
4.1	117	108	0.95	7.05	428.5 \pm 6.5	481 \pm 230	0.0687 \pm 0.0011	0.0567 \pm 0.0060
5.1	151	130	0.89	6.34	301.1 \pm 4.8	-18 \pm 350	0.0478 \pm 0.0008	0.0457 \pm 0.0066
6.1	398	320	0.83	24.70	446.5 \pm 5.3	281 \pm 170	0.0717 \pm 0.0009	0.0519 \pm 0.0038
7.1	487	68	0.14	27.90	413.3 \pm 4.6	325 \pm 160	0.0662 \pm 0.0008	0.0529 \pm 0.0037
8.1	403	284	0.73	19.40	348.6 \pm 3.5	313 \pm 94	0.0556 \pm 0.0006	0.0526 \pm 0.0022
9.1	345	193	0.58	13.00	273.8 \pm 3.3	205 \pm 160	0.0434 \pm 0.0005	0.0502 \pm 0.0034
10.1	359	179	0.52	15.80	317.9 \pm 3.7	130 \pm 200	0.0505 \pm 0.0006	0.0486 \pm 0.0042
11.1	109	61	0.58	6.65	434.0 \pm 11.0	517 \pm 330	0.0696 \pm 0.0018	0.0577 \pm 0.0087
12.1	508	466	0.95	33.10	469.9 \pm 4.4	560 \pm 53	0.0756 \pm 0.0007	0.0588 \pm 0.0014

应用实测的 ^{204}Pb 校正普通铅; 样品 B014、A-D016、A015D 和 A015E 的标准校正误差分别为 0.55%、0.50%、0.34% 和 0.51%; 样品 B014 在分析中未获得测试结果以短线代表。

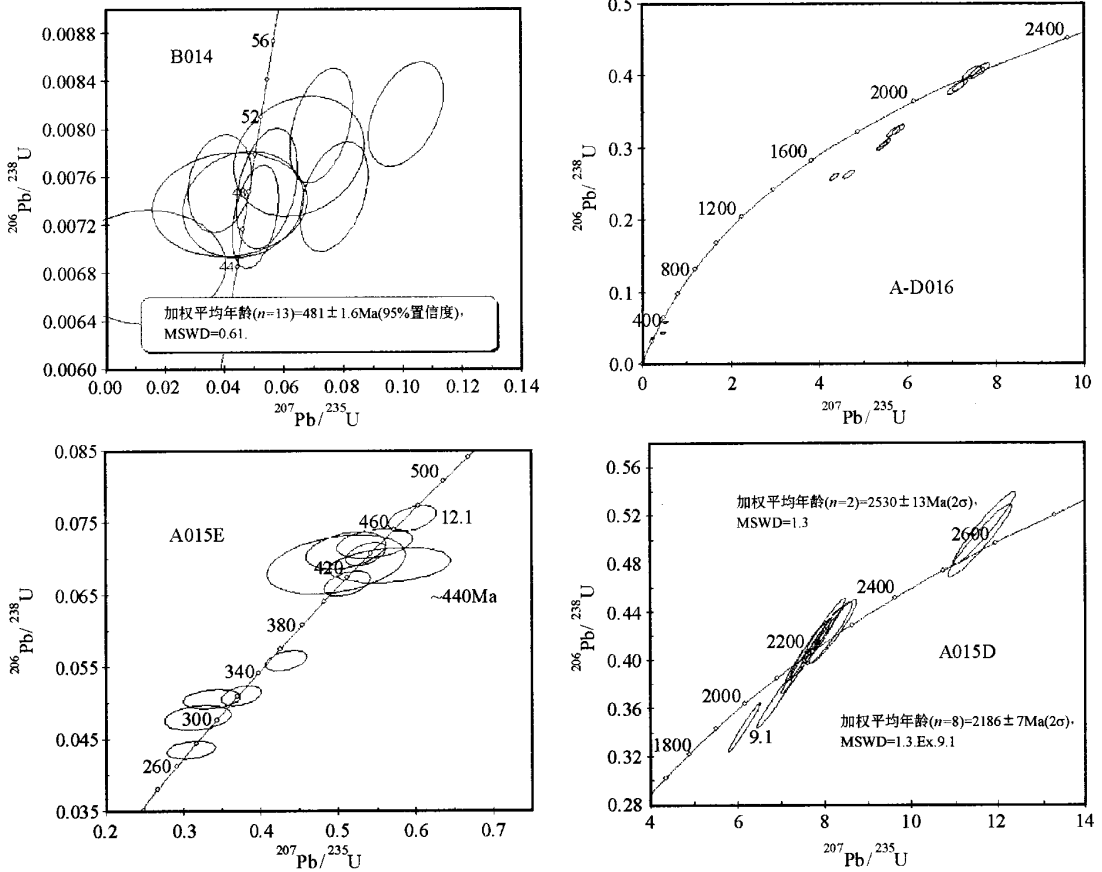


图3 托云火山岩中 SHRIMP 锆石 U-Pb 一致曲线图。
Fig.3 SHRIMP U-Pb concordia diagram for zircons from Tuyon volcanic rocks

两群。年龄值属于奥陶纪、志留纪、石炭纪和二叠纪的测点个数依次为4、3、4和1个，其中测点2.1、3.1、8.1和11.1的年龄值十分接近奥陶纪和志留纪的分界年龄438Ma。

对样品 A-D016 的进行了13个测点的分析，得到的年龄可以大致分为2组(表1)。第一组包括10个测点，²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄变化于1981~2182Ma之间。该样品中最老的测试年龄为2182±12Ma，与样品 A015D 中第二组测年结果十分接近。第二组由剩余的3个分析点构成，其²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄依次为365.7±4.5Ma, 271.9±2.7Ma和225.2±3.3Ma，分别属于晚泥盆世、中二叠世和中三叠世晚期。

5 讨论与结论

综上所述，托云盆地火山岩携带有复杂的年代学信息，暗示西南天山具有复杂的演化历史。问题在于，只有一个样品的测年结果可以代表火山岩的形成年龄，其余样品年龄或者是区域变质作用的证据，或者指示了不同时期的岩浆活动，这些锆石样品是如何进入玄武岩岩浆中的呢？它们各自

代表什么样的地质涵义？

5.1 测年结果的地质涵义

通常情况下，锆石的Th/U比值在一定程度上指示其岩浆或变质成因。一般认为变质成因锆石的Th/U比值小于0.1，而岩浆成因的锆石其Th/U比值一般则在0.1~1之间(Chen *et al.* 2005)。四个样品的锆石Th-U分布如图4所示，所有测点的Th/U比值均大于0.1，即所有的锆石都具有岩浆锆石的特征，虽然经受了叠加变质改造。

如前所述，野外地质观察表明，托云火山岩形成的火山机构主要包括锥状岩席、塌陷破火山口和火山颈(梁涛等, 2005)。锥状岩席是处于高压状态的岩浆熔体从深部主动上升侵位的产物，其测年结果可以代表托云盆地火山活动的起始时间；塌陷破火山口的出现表明破火山口下部的岩浆房侵位较高并处于低压状态，其外侧火山熔岩的测年结果可以代表托云盆地火山喷发的主要时间；而火山颈则是火山喷发末期岩浆充填其通道的证据(George *et al.*, 1993; Myron, 2003)。因此，上述火山岩的精确定年有利于查明托云火山群火山活动的时限。然而，结合地质证据进行综合分析可以

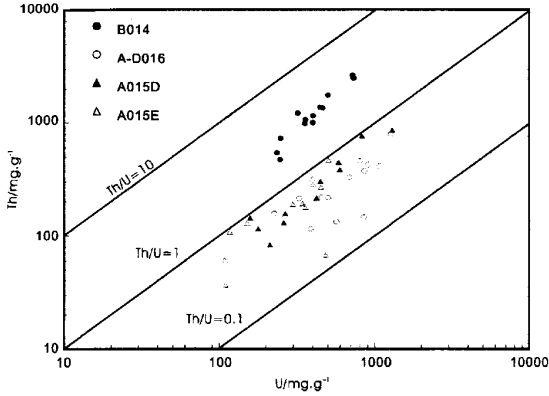


图 4 锆石的 Th-U 含量分布
Fig. 4 The Th vs. U plot of zircon

发现,我们只对锥状岩席获得了可靠的测年结果,其余样品的测年结果显然来自于锆石捕虏晶。

锥状岩席最底部玄武岩层富含高压巨晶与上地幔和下地壳的深源岩石包体,它们的产出表明了寄主岩浆的快速上升(莫宣学,1988),几乎没有可能经历导致寄主岩浆进化的分离结晶作用和同化混染作用。因此,样品 B014 中的锆石应当是直接从玄武质岩浆中晶出的,其 SHRIMP 测年结果代表了锥状岩席的形成年龄 $48.1 \pm 1.6\text{Ma}$,即托云火山群的岩浆活动开始于古近纪始新世。一般认为贫硅的玄武质岩浆中很难晶出锆石晶体,罗照华等(2006b)对其做出了合理的解释,认为锆石的形成与岩浆中锆、碱和挥发分含量的变化有关。岩相学和地球化学特征表明锥状岩席是富碱、富挥发分的幔源原生岩浆固结的产物。在深部高压状态下,这种岩浆所具有的物理化学条件可能与锆石的首晶区条件一致,从而使得锆石先行结晶(罗照华等,2006b),并具有巨晶的性质(大粒径、碎片状的锆石样品可视为这种可能性的证据)。然而,这一结果($48.1 \pm 1.6\text{Ma}$)明显不同于前人给出的 K-Ar 法

和 Ar-Ar 法测年结果,后者集中分布在 120 ~ 110Ma 之间,曾经被认为是“下玄武岩”的形成年龄。现在,所谓的“下玄武岩”已经被证明是岩席(梁涛等,2005),前人给出的年龄值因而应当重新得到解释。根据我们的观察,玄武岩中含有大量的歪长石、金云母和角闪石巨晶,且分别发育溶蚀结构和减压分解结构,它们有可能导致寄主岩中出现过剩氩(excess argon),从而使测年结果明显偏老。

在具有原生岩浆性质的锥状岩席形成之后,幔源岩浆上升速度相对下降(不含有深源物质),这有利于玄武质岩浆的变压(polybaric)结晶作用及其与围岩的相互作用,使得早先晶出的锆石被再吸收(resorption),或者由于挥发分的散失不利于锆石的晶出(罗照华等,2006b)。因此,其余三个火山岩中的锆石 SHRIMP 测年结果不具有火山岩年代学意义,本次工作未能获得托云火山群火山活动的峰期年龄和结束时代。然而,这些测年数据可能准确地记录着区域上重大地质事件的发生时间。

图 5 综合了本次工作所获得的全部锆石 SHRIMP U-Pb 测年数据。除去新生代年轻的锆石,其余锆石的 SHRIMP 测试结果相对集中分布在 2.5Ga、2.2 Ga、2.1 Ga 和 440Ma 四个年龄附近,其余则零散分布。同位素年代学研究表明,塔里木地块太古宙大陆地核大约在 3.2 ~ 3.0Ga 期间形成(胡霁琴等,1999,2001),之后经过一系列的变质作用改造,其主要时代分别约为 2.5Ga、2.4Ga、2.3Ga、2.2Ga 和 2.0Ga(胡霁琴等,1999,2001;胡霁琴和韦刚健,2006;郭召杰等 2003)。由此可见,托云火山岩锆石 SHRIMP 年龄记录了与发生于 2.5Ga、2.2Ga 和 2.0Ga 的三次变质热事件相应的岩浆事件,并且还识别出发生于约 2.1Ga 的一个新的岩浆事件。综合以上测年数据,不难发现在新太古代至古元古代期间,塔里木地块遭受变质作用的周期是大约为 0.1Ga,与岩浆事件紧密相关。另一方面,天山的基底是在大约 1.8Ga 前由壳幔分异作用产生的新生大陆地壳(胡霁琴等,1999),西南天山前寒武纪基底的时代为 1.7 ~ 1.9Ga(陈义兵等,2000),托云火

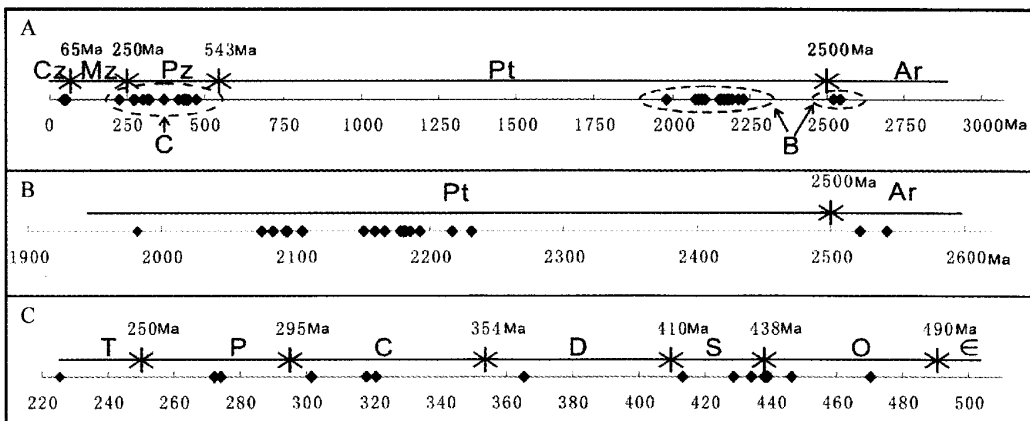


图 5 托云火山岩 SHRIMP 年龄在地质时间轴上的分布。
Fig. 5 SHRIMP dating distribution of Tuyon volcanic rocks in geologic time scale

山岩中锆石记录新太古代和古元古代的年龄远远早于天山基底的时代,故托云盆地之下的古老基底属于塔里木地块,有可能暗示塔里木地块被卷入了天山古生代造山作用。

此外,天山早古生代花岗岩的 U-Pb 年龄为 380 ~ 490Ma (韩宝福等,2004; 朱永峰和宋彪,2006),并且南天山存在两条蛇绿岩带(肖序常等,1992)。其中早古生代岩带在 401Ma 发生榴辉岩相变质作用,于 381Ma 抬升至绿片岩相,蓝片岩形成与抬升限定在 370 ~ 364Ma(高俊等,2000),晚古生代蛇绿岩带的研究表明 420 ~ 430Ma 期间为南天山洋南支的扩张期(刘本培等,1996)。据此,南天山早古生代花岗岩的形成与南天山洋南支的扩张过程有关,或者是区域上一次造山过程的产物(肖序常等,1992)。无论其成因如何,这一重大地质构造事件对托云盆地岩石圈的影响在锆石的年龄中得到了纪录。

托云火山岩晚古生代锆石的一系列年龄可能记录了南天山洋开始向北俯冲直至最后消亡的演化历程。南天山洋盆在泥盆纪早期(≈390Ma,样品 A015E 的 7.1 测点年龄 413Ma 与之接近)开始向北俯冲(周鼎武等,2004),广泛分布于西天山的“大哈拉军组”火山岩就是在晚泥盆世-晚石炭世之间不同时期岛弧火山喷发的产物(朱永峰等,2004,2006; 赵振华等,2003)。在石炭纪末期-早二叠世,西天山构造格架发生重大转折,由俯冲、碰撞造山的挤压转向碰撞的伸展、拉张(赵振华等,2003),南天山洋俯冲板片在早二叠世发生断离,软流圈物质上涌导致幔源岩浆底侵作用(张传恒等,2006),生成西天山阿吾拉勒 adakite 型钠质中酸性岩(熊小林等,2001)。托云火山岩中两个测点的 SHRIMP 年龄(273Ma 和 271Ma)记录了二叠纪早期的岩浆底侵作用,以及二叠纪晚期(253 Ma)西南天山造山带发生根部塌陷的壳幔作用事件(郑建平,2005)。

5.2 西南天山与青藏高原新生代变形的耦合与拆耦

有趣的是,托云盆地岩浆活动的时间(48Ma)刚好发生在青藏高原腹地岩石圈拆沉作用(≈45Ma)之前,这表明二者可能具有时间联系。注意到托云盆地新生代幔源岩浆活动与大型走滑断裂密切相关以及 Tapponnier *et al.* (1982)有关青藏高原挤出构造的阐述,岩浆活动的动力来源可能来自于印度-亚洲大陆碰撞(罗照华等,2003; 梁涛等,2005)。目前,多数学者都强调了碰撞应力的这种远程传递对青藏高原周边地区的影响,学者们甚至构筑了高原从南往北逐渐生长的模型(Tapponnier *et al.*, 2001),或者是以班公湖-怒江带为中心向南北两侧生长(Deng *et al.*, 2004),或者以羌塘为核心放射状向外扩展(Mo *et al.*, 2006)。然而,西南天山新生代岩浆活动的时间比羌塘早的事实暗示碰撞应力的远程传递形式是随时间变化的。地球物理观测表明,青藏高原的变形主要被分隔不同块体的边界吸收,如阿尔金断裂带(Wittlinger *et al.*, 1998)。现代 InSAR 测量却表明(Wright *et al.*, 2004),块体内部的变形也是重要的。但是,塔里木地

则表现为刚性,基本没有什么变形(Wang *et al.*, 2001)。据此可以认为,岩石圈变形不仅与块体的性质有关,也取决于应变速率的大小。在印度-亚洲大陆碰撞之初,青藏高原主体部分及其以北的岩石圈以及塔里木板块的岩石圈都具有刚性特点,碰撞效应的构造应力可以进行有效的远距离传递,块体之间以走滑和旋转为主(罗照华等,2001; 2003)。这种变形特征可能导致处于重力准稳定状态的岩石圈发生拆沉作用,从而引发幔源岩浆活动。例如,塔拉斯-费尔干纳断裂东西两端走滑距离的差异(Burtman *et al.*, 1996)以及托云地块的相对旋转(李永安等,1995; 王永成等,2004)为处于大型走滑断裂的交汇部位的托云盆地幔源岩浆快速上升提供了有效的通道。地球物理研究表明,中国南天山、吉尔吉斯斯坦境内天山及帕米尔东侧一带 71km (Makeyeva *et al.*, 1992; Roecker *et al.*, 1993)深度的速度图像表明此区域为地震波低速区,而费尔干纳盆地之下的天山岩石圈山根深度至少为 150km。这很可能就是岩石圈拆沉作用的证据。因此,我们认为大型走滑→块体旋转→岩石圈拆沉是造山带幔源原生岩浆活动的前提(罗照华等,2001; 2006a)。

由此,托云盆地新生代岩浆活动应当是与青藏高原的变形共轭的。一旦羌塘发生岩石圈拆沉作用,西南天山的岩浆活动即宣告停止。这可以解释为,在碰撞效应远程传递的过程中,应力传递的介质会发生一些变化,比如岩石圈厚度增加。托云盆地幔源原生岩浆形成之后,约 45Ma,青藏高原腹地因重力不稳定诱发岩石圈拆沉作用,软流圈物质上涌使得传递介质的力学性质弱化,不利于印度-亚洲碰撞效应的远程传递(邓晋福等,2001; 罗照华等,2006a)。所以,塔里木盆地以北的天山缺乏更年轻的幔源岩浆活动。

这样的解释似乎可以说明天山和青藏高原新生代岩浆活动的内在联系。但是,天山地区的强烈变形和山脉的崛起似乎主要始于中新世(Dickerson, 2003),而这一时期也正是青藏高原(罗照华等,2006a)乃至中国东部最大规模岩浆活动的时间(刘嘉麒,1999),似乎很难用印度-亚洲大陆碰撞应力的远程传递来解释。因此,很可能印度-亚洲大陆碰撞以及亚洲大陆内部各块体之间的相互作用都是受控于同一深部地球动力学背景,即地幔或软流圈的汇聚(罗照华等,2006a),不同地区的地质过程并没有相互因果的关系。从这个角度来说,托云盆地新生代岩浆活动与印度-亚洲大陆碰撞更可能是两个独立但又有联系的地质事件,其时空联系仅仅是因为它们处于同一汇聚地球动力学系统中。

5.3 宽锆石年龄谱的意义

一个重要的问题在于火山岩中的锆石具有很宽的年龄谱。就像前面的讨论那样,通常我们将非寄主岩浆结晶的锆石称为继承锆石(源区岩石部分熔融的锆石残留)或锆石捕虏晶(岩浆上升过程中或定位后从围岩捕获的锆石)。玄武质岩浆被公认为起源于上地幔,上述锆石年龄谱又可以较好地与区域地质事件相对应,因而可以认为这些锆石大多来源

于托云地区的地壳(或岩石圈)。因此,托云地区的地壳具有复杂的形成历史,测试结果记录了西南天山大多数地质事件。但是,我们仍然不能确认这些锆石捕虏晶是岩浆在上升过程中捕获的还是随着岩石圈拆沉作用一起进入玄武岩源区的。

根据吕勇军等(2006),单斜辉石巨晶和斑晶的结晶路线大致与玄武岩的液相线一致,表明玄武质岩浆在上升的过程中不大可能作长时间的停留,因而不能同化大量的围岩。反之,如果上升的玄武质岩浆同化大量不同时代的围岩,必然导致岩浆温度快速下降和大规模结晶(分离),大部分幔源岩浆将在地壳内固结而不会喷出地表。作为一种可供选择的解释,岩石圈拆沉作用可能是重要的。岩石圈拆沉作用的必要条件之一是下地壳有大量镁铁质组分的堆积,且后者由于高压变质而导致区域岩石圈重力不稳定。当这样的岩石圈发生拆沉作用时,必然使部分榴辉岩相下地壳与岩石圈地幔橄榄岩一起沉入软流圈中。因拆沉作用进入软流圈中的下地壳可以快速下沉到达410km或670km相变界面,也可能因软流圈的高温而发生部分熔融或分解,从而可能使软流圈地幔获得地壳成因的锆石。这些地壳成因锆石在玄武质岩浆形成过程中有可能落在岩浆池中,并被岩浆迅速带到地表。如果这样的解释是正确的,托云盆地火山岩中的宽锆石年龄谱或复杂锆石组合就意味着岩石圈拆沉作用,这与幔源原生岩浆形成过程的解释以及西南天山曾经发生过古生代幔源岩浆底侵作用的推论(郑建平,2005)是一致的。

5.4 结论

综上所述,可以得出以下几点结论:

(1) 托云火山群岩浆活动的起始时间约为 48.1 ± 1.6 Ma,表明西南天山的新生代构造演化的确与青藏高原的形成过程存在某种内在联系。

(2) 托云火山岩中包含有复杂的锆石组合,后者具有很宽的锆石年龄谱,记录了区域上重大地质事件的发生时代,表明西南天山的岩石圈具有复杂的形成演化历史。

(3) 火山岩中非寄主岩浆结晶的锆石未必就是岩浆上升过程中或侵位以后从围岩捕获而来,也可能是岩石圈拆沉作用的标志。就本例而言,我们更倾向于岩石圈拆沉作用的解释。

References

- Abdrakhmatov KY, Aldazhanov SA, Hager BH *et al.* 1996. Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates. *Nature*, 384: 450 - 453
- Best MG. 2003. *Igneous and Metamorphic Petrology*. London: Blackwell Publishing, 210 - 240
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang. 1993. *Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region*. Beijing: Geological Publishing House, 376 - 380 and 697 - 700 (in Chinese with English abstract)
- Burtman VS, Skobelev SF and Molnar P. 1996. Late Cenozoic slip on the Talas-Ferghana fault, the Tien Shan, central Asia. *Geological Society of America Bulletin*, 108(8): 1004 - 1021
- Chen YB, Hu AQ, Zhang GX *et al.* 2000. Precambrian basement age and characteristics of Southwestern Tianshan: Zircon U-Pb geochronology and Nd-Sr isotopic compositions. *Acta Petrologica Sinica*, 16(1): 91 - 98 (in Chinese with English abstract)
- Chen YL, Luo ZH, Zhao JX *et al.* 2005. Petrogenesis and dating of the Kangding complex, Sichuan Province. *Science in China (Serials D)*, 48(5): 622 - 634
- Complication Team of Regional Stratigraphic Table of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1981. *Regional Stratigraphic Table of Xinjiang*. Beijing: Geological Publishing House, 252 - 255 (in Chinese)
- Compston W, Williams IS and Mayer C. 1984. U-Pb geochronology of zircons from Lunar Breccia 73217 using a Sensitive High Resolution Ion Microprobe. *Proc XIV Lunar Planetary Science Conference. J. Geophys. Res.*, 89(supply): B525 - B534
- Compston W, Williams IS, Kirschvink JK *et al.* 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time scale. *J. Geol. Soc. London*, 149: 171 - 184
- Deng JF, Mo XX, Luo ZH *et al.* 2001. Inhomogeneity of lithosphere of the Tibetan Plateau and implication for geodynamics. *Science in China (Serials D)*, 44(Suppl): 56 - 63
- Deng JF, Mo XX, Zhao HL *et al.* 2004. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: Continental roots - plume tectonics. *Earth-Science Reviews*, 65: 223 - 275
- Dickerson PW. 2003. Intraplate mountain building in response to continent-continent collision-the Ancestral Rocky Mountains (North America) and inferences drawn from the Tien Shan (Central Asia), *Tectonophysics*, 365: 129 - 142
- Gao J, Zhang LF and Liu SW. 2000. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age record of formation and uplift of the blueschists and eclogites in the western Tianshan Mountains, *Chinese Science Bulletin*, 45(1): 89 - 94 (in Chinese)
- George PL and Walker. 1993. Basaltic-volcano systems. In: Prichard HM, Alabaster T, Harris NBW and Neary CR (eds). *Magmatic processes and plate tectonics*. Geological Society Special Publication, 76: 3 - 38
- Guo ZJ, Zhang ZC, Liu SW *et al.* 2003. U-Pb geochronological evidence for the early Precambrian complex of the Tarim Craton, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 537 - 542 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, He GQ, Wu TR *et al.* 2004. Zircon U-Pb dating and geochemical features of early Paleozoic granites from Tianshan, Xinjiang: implications for tectonic evolution. *Xinjiang Geology*, 22(1): 4 - 11 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, Wang XC, He GQ. *et al.* 1998. Discovery of mantle and lower crustal xenoliths from early Cretaceous volcanic rocks of southwest Tianshan, Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 43(23): 2544 - 2547 (in Chinese)
- Hu AQ, Wei GJ. 2006. On the Age of the Neo-Archean Qingir Gray Gneisses from the Northern Tarim Basin, Xinjiang, China. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 126 - 134 (in Chinese with English abstract)
- Hu AQ, Zhang GX, Chen YB *et al.* 2001. A model of division of the continental crust basement and the time scales of the major geological events in the Xinjiang-based on studies of isotopic geochronology and geochemistry. *Xinjiang Geology*, 19(1): 12 - 19 (in Chinese with English abstract)
- Hu AQ, Zhang GX, Zhang QF *et al.* 1999. The basement age of Tianshan orogenic belt and crust growth: Evidences from Nd isotopes. *Science in China (Serials D)*, 29(2): 104 - 112 (in Chinese)
- Ji JQ, Han BF, Zhu MF *et al.* 2006. Cretaceous-Paleogene alkaline magmatism in Tuyon basin, southwest Tianshan mountains: Geochronology, petrology and geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1324 - 1340 (in Chinese with English abstract)

- Jian P, Ceng YQ and Liu DY. 2001. Petrographical study of metamorphic zircon: Basic roles in interpretation of U-Pb age of high grade metamorphic rocks. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 183 - 191 (in Chinese with English abstract)
- Li YA, Li Q, Zhang H *et al.* 1995. Paleomagnetic study of Tarim and its adjacent area as well as the formation and evolution. *Xinjiang Geology*, 13(4): 341 - 344 (in Chinese with English abstract)
- Liang T, Luo ZH, Li WT *et al.* 2005. Geologic feature and tectonic implications of the Tuyon volcanic group. *Xinjiang Geology*, 23(2): 105 - 110 (in Chinese with English abstract)
- Liu BP, Wang ZQ, Zhang CH *et al.* 1996. Tectonic framework and evolution of Southwest Tianshan Mountains, China. Wuhan: China University of Geosciences Press, 64 - 88 (in Chinese with English abstract)
- Liu FT, Liu JH, Zhong DL *et al.* 2000. The subducted slab of Yangtze continental block beneath the Tethyan orogen in western Yunnan. *Chinese Science Bulletin*, 45(5): 466 - 472
- Liu JQ. 1999. Volcanoes in China, Beijing: Science Press, 1 - 219 (in Chinese)
- Luo ZH, Bai ZD, Zhao ZD *et al.* 2003. Cenozoic magmatism in the south and north rims of Tarim basin: petrogenesis and tectonic implications. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 179 - 189 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZH, Mo XX, Hou ZQ *et al.* 2006(a). An integrated model for the Cenozoic evolution of the Tibetan plateau: Constraints from igneous rocks. *Earth Science Frontiers*, 13(4): 196 - 211 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZH, Mo XX, Wan YS *et al.* 2006b. Geological implications of the youngest SHRIMP U-Pb age of the alkaline basalt in the Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 578 - 584 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZH, Mo XX, Wang JH *et al.* 2004. The mantle-crust interactions during continental collision process of the Plateau and their effects on the formation of mineral resources and oil-gas pools. In: Zheng D and Yao TD (eds). *Uplifting of Tibetan Plateau with its environmental effects*. Beijing: Science Press, 117 - 163
- Luo ZH, Xiao XC, Cao YQ *et al.* 2001. The Cenozoic mantle magmatism and motion of lithosphere on the north margin of the Tibetan Plateau. *Science in China (Series D)*, 31(Suppl): 8 - 13 (in Chinese)
- Li YJ, Luo ZH, Ren ZB *et al.* 2007. Megacrysts in the Cenozoic basalt of Tuoyun basin, southwest Tianshan. *Science in China (Series D)*, 50(1): 55 - 66
- Makeyeva LI, Vinnik LP and Roecker SW. 1992. Shear-wave splitting and small-scale convection in the continental upper mantle. *Letters to Nature*, 258(9): 144 - 147
- Mo XX, Zhao ZD, Deng JF *et al.* 2006. Petrology and geochemistry of postcollisional volcanic rocks from the Tibetan plateau: Implications for lithosphere heterogeneity and collision-induced asthenospheric mantle flow. *Geological Society of America*, 409 (Special Paper): 507 - 530
- Mo XX. 1988. Origin of Cenozoic basaltic magma in East China. In: Chi JS (ed). *The study of Cenozoic basalts and upper mantle beneath eastern China (Attachment: Kimberlites)*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 108 - 127 (in Chinese)
- Molnar P and Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. *Science*, 189: 419 - 426
- Reigber CH, Michel GW, Galas R *et al.* 2001. New space geodetic constraints on the distribution of deformation in Central Asia. *Earth and Planetary Science Letters*, 191: 157 - 165
- Roecker SW, Sabitova TM, Vinnik LP *et al.* 1993. Three-Dimensional Elastic Wave Velocity Structure of the Western and Central Tien Shan. *Journal of Geophysical Research*, 98 (B9): 15779 - 15795
- Shapiro NM, Ritzwoller MH, Molnar P *et al.* 2004. Thinning and Flow of Tibetan Crust Constrained by Seismic Anisotropy. *Science*. 305: 233 - 236
- Sobel ER and Arnaud N. 2000. Cretaceous-Paleogene basaltic rocks of the Tuyon basin, NW China and Kyrgyz Tian Shan: the trace of a small plume, *Lithos*, 50: 191 - 215
- Song B, Zhang YH, Wan YS *et al.* 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. *Geologic Review*, 48 (Suppl): 26 - 30 (in Chinese with English abstract)
- Tapponnier P, Peltzer G, Le-Dain AY *et al.* 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10(12): 611 - 616
- Tapponnier P, Xu ZQ, Roger F *et al.* 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau. *Science*, 294 (23): 1671 - 1677
- Thompson SC, Weldom RJ, Rubin CM. 2002. Late Quaternary slip rates across the central Tien Shan, Kyrgyzstan, central Asia, *Journal of Geophysical Research*, 107 (B9), 2203, doi: 10.1029/2001JB000596
- Vinnik LP, Reigber C, Aleshin IM *et al.* 2004. Receiver function tomography of the central Tien Shan. *Earth and Planetary Science Letters*, 225: 131 - 146
- Wang Q, Zhang PZ and Freymueller JT. 2001. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements. *Science*, 294: 574 - 577
- Wang YB, Wang Y, Liu X *et al.* 2000. Geochemical Characteristics and Genesis of Late Cretaceous to Paleogene Basalts in Tuyon Basin, South Tianshan Mountain. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(2): 131 - 139, 173 (in Chinese with English abstract)
- Wang YC, Huang BC, Zhu RX *et al.* 2005. Paleomagnetic result of the Cenozoic volcanic rocks from the Tuoyun Basin, southwest Tien Shan of China and its tectonic implications. *Chinese Science Bulletin*, 49 (10): 993 - 999 (in Chinese)
- Williams IS and Claesson S. 1987. Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high-grade paragneisses from the Deved Nappes, Scandinavian Caledonides II: Ion microprobe zircon U-Th-Pb. *Contrib. Minera. Petro.*, 97: 205 - 217
- Wittlinger G, Tapponnier P, Poupinet G *et al.* 1998. Tomographic evidence for localized lithospheric shear along the Altyn Tagh Fault. *Science*, 282: 74 - 76
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(6): 1589 - 1604 (in Chinese)
- Xiao XC, Tang QY, Feng YM *et al.* 1992. Tectonic evolution of the northern Xinjiang and its adjacent regions. Beijing: Geological Publishing House, 12 - 47 and 104 - 124 (in Chinese with English abstract)
- Xiong XL, Zhao ZH, Bai ZH *et al.* 2001. Adakite type sodium-rich rocks in Awulale Mountain of West Tianshan: Significance for the vertical growth of continental crust. *Chinese Science Bulletin*, 46(4): 281 - 287 (in Chinese)
- Xu XY, Xia LQ, Xia ZC, *et al.* 2003. Geochemistry and genesis of Cretaceous-Paleogene basalts from the Tuoyun Basin, Southwest Tianshan Mountains. *Geochimica*, 32(6): 551 - 560 (in Chinese with English abstract)
- Yang YQ and Liu M. 2002. Cenozoic deformation of the Tarim plate and the implication for mountain building in the Tibet Plateau and the Tien Shan. *Tectonics*, 21(6): 1059 - 1075
- Yin A and Harrison M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annu Rev. Earth Planet. Sci.*, 28: 11 - 280
- Zhang CH, Du WL, Liu DB *et al.* 2006. Early Permian Flysch to Molasse Transition and a Quick Migration of North Tarim Peripheral Foreland Basin: Response to Subducted Slab Breakoff. *Acta Geologica Sinica*, 80(6): 785 - 791 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Bai ZH, Xiong XL *et al.* 2003. ⁴⁰Ar/³⁹Ar chronological study of Late Paleozoic volcanic hypabyssal igneous rocks in western Tianshan, Xinjiang. *Geochimica*, 32(4): 317 - 327 (in Chinese with English abstract)
- Zheng JP, Lu FX, O'Reilly SY *et al.* 2001. Trace-elements in Tuoyun clinopyroxene: Implications for the deep processes of lithospheric mantle beneath the southwest Tianshan, West China. *Chinese Science Bulletin*, 46(6): 497 - 502 (in Chinese)
- Zheng JP, Luo ZH, Yu CM *et al.* 2005. Geochemistry and zircon U-Pb ages of granulite xenolith from Tuoyun basalts, Xinjiang:

- Implications for the petrogenesis and the lower crustal nature beneath the southwestern Tianshan. *Chinese Science Bulletin*, 50(8): 793-801 (in Chinese)
- Zhou DW, Su L, Jian P *et al.* 2004. Zircon U-Pb SHRIMP ages of high-pressure granulite in Yushugou ophiolitic terrane in southern Tianshan and their tectonic implications. *Chinese Science Bulletin*, 49(14): 1411-1415
- Zhu YF and Song B. 2006. Petrology and SHRIMP chronology of mylonitized Tianger granite, Xinjiang: Also about the dating on hydrothermal zircon rim in granite. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 135-144 (in Chinese with English abstract)
- Zhu YF, Zhang LF, Gu LB *et al.* 2005. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 50(18): 2004-2014 (in Chinese)
- Zhu YF, Zhou J, Song B *et al.* 2006. Age of the "Dahajunshan" Formation in Xinjiang and its disintegration. *Geology in China*, 33(3): 487-497 (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 陈义兵, 胡霭琴, 张国新等. 2000. 西南天山前寒武纪基底时代和特征: 锆石 U-Pb 和 Nd-Sr 同位素. *岩石学报*, 16(1): 91-98
- 邓晋福, 莫宣学, 罗照华等. 2001. 青藏高原原岩圈不均匀性及其动力学意义. *中国科学(D辑)*, 31(增刊): 55-60
- 高俊, 张立飞, 刘圣伟. 2000. 西天山蓝片岩榴辉岩形成和抬升的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄记录. *科学通报*, 45(1): 89-94
- 郭召杰, 张志诚, 刘树文等. 2003. 塔里木克拉通早前寒武纪基底层序与组合: 锆石 U-Pb 年龄新证据. *岩石学报*, 19(3): 537-542
- 韩宝福, 何国琦, 吴泰然等. 2004. 天山早古生代花岗岩锆石定年、岩石地球化学特征及其大地构造意义. *新疆地质*, 22(1): 4-11
- 韩宝福, 王学潮, 何国琦等. 1998. 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*, 43(23): 2544-2547
- 胡霭琴, 韦刚健. 2006. 塔里木盆地北缘新太古宙辛格罗灰色片麻岩形成时代问题. *地质学报*, 80(1): 126-134
- 胡霭琴, 张国新, 陈义兵等. 2001. 新疆大陆基底分区模式和主要地质事件划分. *新疆地质*, 19(1): 12-19
- 胡霭琴, 张国新, 张前锋等. 1999. 天山造山带基底时代和地壳增生的 Nd 同位素制约. *中国科学(D辑)*, 29(2): 104-112
- 季建清, 韩宝福, 朱美妃等. 2006. 西天山托云盆地及周边中生代岩浆活动的岩石学、地球化学与年代学研究. *岩石学报*, 22(5): 1324-1340
- 简平, 程裕淇, 刘敦一. 2001. 变质锆石成因的岩相学研究——高级变质岩 U-Pb 年龄解释的基本依据. *地学前缘*, 8(3): 183-191
- 李永安, 李强, 张慧等. 1995. 塔里木盆地及其周边古地磁研究与盆地形成演化. *新疆地质*, 13(4): 341-344
- 梁涛, 罗照华, 李文韬等. 2005. 托云火山群的火山地质特征及其构造意义. *新疆地质*, 23(2): 105-110
- 刘本培, 王自强, 张传恒等. 1996. 西南天山构造格局与演化. 武汉: 中国地质大学出版社, 64-88
- 刘嘉麒. 1999. 中国火山, 北京: 科学出版社, 1-219
- 吕勇军, 罗照华, 任忠宝等. 2006. 西南天山托云盆地新生代玄武岩中巨晶的研究. *中国科学(D)*, 36(2): 154-166
- 罗照华, 白志达, 赵志丹等. 2003. 塔里木盆地南北缘新生代火山岩成因及其地质意义. *地学前缘*, 10(3): 179-189
- 罗照华, 莫宣学, 侯增谦等. 2006a. 青藏高原新生代形成演化的整合模型——来自火成岩的约束. *地学前缘*, 13(4): 196-211
- 罗照华, 莫宣学, 万渝生等. 2006b. 青藏高原最年轻碱性玄武岩 SHRIMP 年龄的地质意义. *岩石学报*, 22(3): 578-584
- 罗照华, 莫宣学, 王江海等. 2004. 板块碰撞过程中壳幔相互作用及其成矿成藏效应. 见: 郑度, 姚檀栋著. 青藏高原隆升与环境效应. 北京: 科学出版社, 117-163
- 罗照华, 肖序常, 曹永清等. 2001. 青藏高原北缘新生代幔源岩浆活动及构造运动性质. *中国科学(D辑)*, 31(增刊): 8-13
- 莫宣学. 1988. 中国东部新生代玄武岩岩浆的起源. 见: 池际尚主编. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究(附金伯利岩). 武汉: 中国地质大学出版社, 108-127
- 宋彪, 张玉海, 万渝生等. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. *地质论评*, 48(增刊): 26-30
- 王彦斌, 王永, 刘训等. 2000. 南天山托云盆地晚白垩世—早第三纪玄武岩的地球化学特征及成因初探. *岩石矿物学杂志*, 19(2): 131-139, 173
- 王永成, 黄宝春, 朱日祥等. 2004. 西南天山托云盆地新生代火山岩古地磁结果及构造意义. *科学通报*, 49(10): 993-999
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. *科学通报*, 49(6): 1589-1604
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民等. 1992. 新疆北部及邻区大地构造. 北京: 地质出版社, 12-47 和 108-127
- 新疆维吾尔自治区地层表编写组. 1981. 西北地区区域地层表, 新疆维吾尔自治区分册. 北京: 地质出版社, 252-255
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 376-380, 697-700
- 熊小林, 赵振华, 白正华等. 2001. 西天山阿吾拉勒 adakite 型钠质中酸性岩及地壳垂向增生. *科学通报*, 46(4): 281-287
- 徐学义, 夏林圻, 夏祖春等. 2003. 西南天山托云地区白垩纪—早第三纪玄武岩地球化学及其成因机制. *地球化学*, 32(6): 551-560
- 张传恒, 杜维良, 刘典波等. 2006. 塔里木北部周缘前陆盆地早二叠世快速迁移与沉积相突变: 俯冲板片拆沉的响应. *地质学报*, 80(6): 785-791
- 赵振华, 白正华, 熊小林等. 2003. 西天山北部晚古生代火山-浅侵位岩浆岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素定年. *地球化学*, 32(4): 317-327
- 郑建平, 路凤香, O'Reilly SY 等. 2001. 新疆托云地幔单斜辉石微量元素与西南天山岩石圈深部过程. *科学通报*, 46(6): 497-502
- 郑建平, 罗照华, 余淳梅等. 2005. 新疆托云麻粒岩捕虏体地球化学和锆石年代学: 岩石成因及西南天山下地壳性质. *科学通报*, 50(8): 793-801
- 周鼎武, 苏犁, 简平等. 2004. 南天山榆树沟蛇绿岩体中高压麻粒岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. *科学通报*, 49(14): 1411-1415
- 朱永峰, 宋彪. 2006. 新疆天格尔糜棱岩化花岗岩的岩石学及其 SHRIMP 年代学: 兼论花岗岩中热液锆石边的定年. *岩石学报*, 22(1): 135-144
- 朱永峰, 张立飞, 古丽冰等. 2005. 西天山石炭纪火山岩年代学及其微量元素地球化学研究. *科学通报*, 50(18): 2004-2014
- 朱永峰, 周品, 宋彪等. 2006. 新疆“大哈拉军组”火山岩的形成时代问题及其解体方案. *中国地质*, 33(3): 487-497