

# 中亚造山带中新世代壳幔相互作用特征与过程 ——新疆北部幔源岩浆岩系对比研究\*

郭召杰 韩宝福 张元元 陈石

GUO ZhaoJie, HAN BaoFu, ZHANG YuanYuan and CHEN Shi

北京大学地球与空间科学学院, 造山带和地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2009-05-12 收稿, 2009-12-26 改回.

Guo ZJ, Han BF, Zhang YY and Chen S. 2010. Mesozoic and Cenozoic crust-mantle interaction in the Central Asian Orogenic Belt: A comparative study of mantle-derived magmatic rocks in northern Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 431–439

**Abstract** Meso-Cenozoic mantle-derived magmatic rocks mainly occur near rift belts and major strike slip faults in northern Xinjiang. They are characterized by high  $\text{TiO}_2$ , alkali contents and enrichment in incompatible elements and light rare earth elements (LREE), and their La/Nb and Nb/U ratios show that the Meso-Cenozoic basaltic magma underwent typical crust-mantle interaction as ascending to the surface, while low positive to negative  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  and high  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  values indicate a source in the enriched mantle similar to that for OIB. Permian mafic-ultramafic rocks in northern Xinjiang were originated from partial melting of depleted mantle contaminated by arc and continental crust as well as subducted oceanic crust. In the central Asian Orogenic Belt, the Late Paleozoic orogenies caused by nearly concurrent closure of branches of the Paleo-Asian Ocean between terranes resulted in the thickened lithosphere, and then delamination of lithosphere and upwelling of asthenosphere generated Permian mafic-ultramafic magma. Therefore, the mantle in Central Asian Orogenic Belt was strongly modified by metasomatic melts from the delaminated lithosphere or ancient subducted oceanic crust and overlying sediments during the Paleozoic, making the mantle enriched in alkali, light rare earth elements (LREE) and incompatible elements. As a result, the Meso-Cenozoic mantle-derived magmatic rocks intruded or erupted along rift belts and major strike slip faults exhibit the geochemical signatures of the enriched mantle.

**Key words** Central Asian Orogenic Belt; Meso-Cenozoic; Mantle-derived magmatic rocks; Crust-mantle interaction; Enriched mantle

**摘要** 新疆北部中新世代幔源岩浆岩多位于大型走滑断裂带或者裂谷带附近, 岩石系列均具有高的  $\text{TiO}_2$  含量, 富碱、高度富集不相容元素和轻稀土 (LREE),  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值低正值到负值,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值较高, 不相容元素比值 La/Nb 和 Nb/U 显示中新世代玄武岩在形成过程中的壳幔作用明显不同于古生代造山过程, 岩浆来源于类似 OIB 源的富集地幔。而新疆北部地区的二叠纪幔源镁铁-超镁铁岩来源于亏损地幔, 陆壳物质参与了岩浆的形成, 源区可能混入了早期的弧组成分或俯冲的洋壳。由于古生代多个洋盆闭合和增生造山作用致使中亚造山带的岩石圈不断增厚, 于古生代晚期发生拆去根作用, 软流圈亏损地幔上涌形成二叠纪镁铁-超镁铁岩系, 而拆沉的岩石圈以及俯冲下沉的洋壳及其沉积物, 在地幔环境熔融交代改造原始地幔, 使中亚地区的地幔自古生代晚期以后逐渐转换为整体富碱、富含轻稀土 (LREE) 和不相容元素的富集地幔。被改造了的富集地幔在中新生代沿裂谷带或大型走滑断裂薄弱带涌上, 形成了中新世代幔源岩浆的喷发和侵入。

**关键词** 中亚造山带; 中新世代; 幔源岩浆; 壳幔相互作用; 富集地幔

中图法分类号 P542.5

\* 本文受国家重点基础研究规划项目(2007CB411305)和国家自然科学基金项目(409721471)联合资助。

第一作者简介: 郭召杰, 男, 1963年生, 教授, 研究方向为造山带与盆地构造, E-mail: zjguo@pku.edu.cn

## 1 引言

中亚造山带是全球显生宙陆壳增生与改造最显著的地区,经历了增生造山、后碰撞和大陆改造作用三个阶段(Khain *et al.*, 2002),古生代晚期被认为是中亚造山带陆缘增生和后碰撞转换的重要阶段(Han *et al.*, 1997, 2004; Wartes *et al.*, 2002; Zhou *et al.*, 2004),出现大尺度的地壳垂向增生,以大规模的具有低的( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub>值,正的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值A-I型花岗岩(Han *et al.*, 1997, 1999; Hu *et al.*, 2000; Jahn *et al.*, 2000; Chen and Jahn, 2002; Hong *et al.*, 2004)和多处基性-超基性侵入岩(韩宝福等, 2004; Zhou *et al.*, 2004; 李锦轶等, 2006)以及火山岩的喷发(李锦轶和肖序常, 1999; Zhu *et al.*, 2005; 舒良树等, 2005; 赵泽辉等, 2006; 潘金花等, 2008)为标志。在陆缘增生和后碰撞地壳垂向增长过程中,中亚造山带发生了强烈的壳幔相互作用(Han *et al.*, 1999)。中生代以来,强烈的陆内造山作用改造了中亚造山带的古构造格局(Cunningham *et al.*, 2003; 郭召杰等, 2006a, b; 李锦轶等, 2006),在印度板块与欧亚大陆碰撞远程效应和深部壳幔作用的共同控制之下,形成了现今的陆内盆山体系(肖文交等, 2008)。显然,中亚造山带晚古生代壳幔相互作用对中生代板内基性岩浆活动有何影响,是值得给予高度关

注的一个重要问题。

新疆北部地区是中亚造山带的重要组成部分,是中亚造山带中显生宙陆壳生长非常显著的地区之一。本文通过新疆北部地区中生代板内阶段与古生代晚期增生阶段的幔源岩浆活动的对比研究,探讨古生代晚期到中生代的地幔演化过程。

## 2 新疆北部中生代幔源岩浆岩时空分布特征

幔源火山岩和侵入岩可以作为探究地幔特征和壳幔作用的窗口。二叠纪以后,新疆北部地区的岩浆活动较弱,具有确切依据的中生代幔源岩浆岩地表露头较少。近些年来,在新疆北部地区发现了若干中生代岩浆活动记录(Han *et al.*, 1999; Sobel and Arnaud, 2000; 王登红和李天德, 2001; 徐学义等, 2003; 季建清等, 2006; 刘畅等, 2006; 张元元等, 2007; 徐新等, 2008)和成矿地质事件(朱永峰, 2007; 肖文交等, 2008)。

新疆北部地区的中生代幔源岩浆岩零星分布,空间上位于裂谷带或者大型走滑断裂带附近,以柳园煌斑岩、克拉玛依玄武岩、托云盆地玄武岩类、哈拉乔拉玄武岩为代表(表1, 图1)。柳园煌斑岩分布在甘肃西部北山柳园地区,沿着

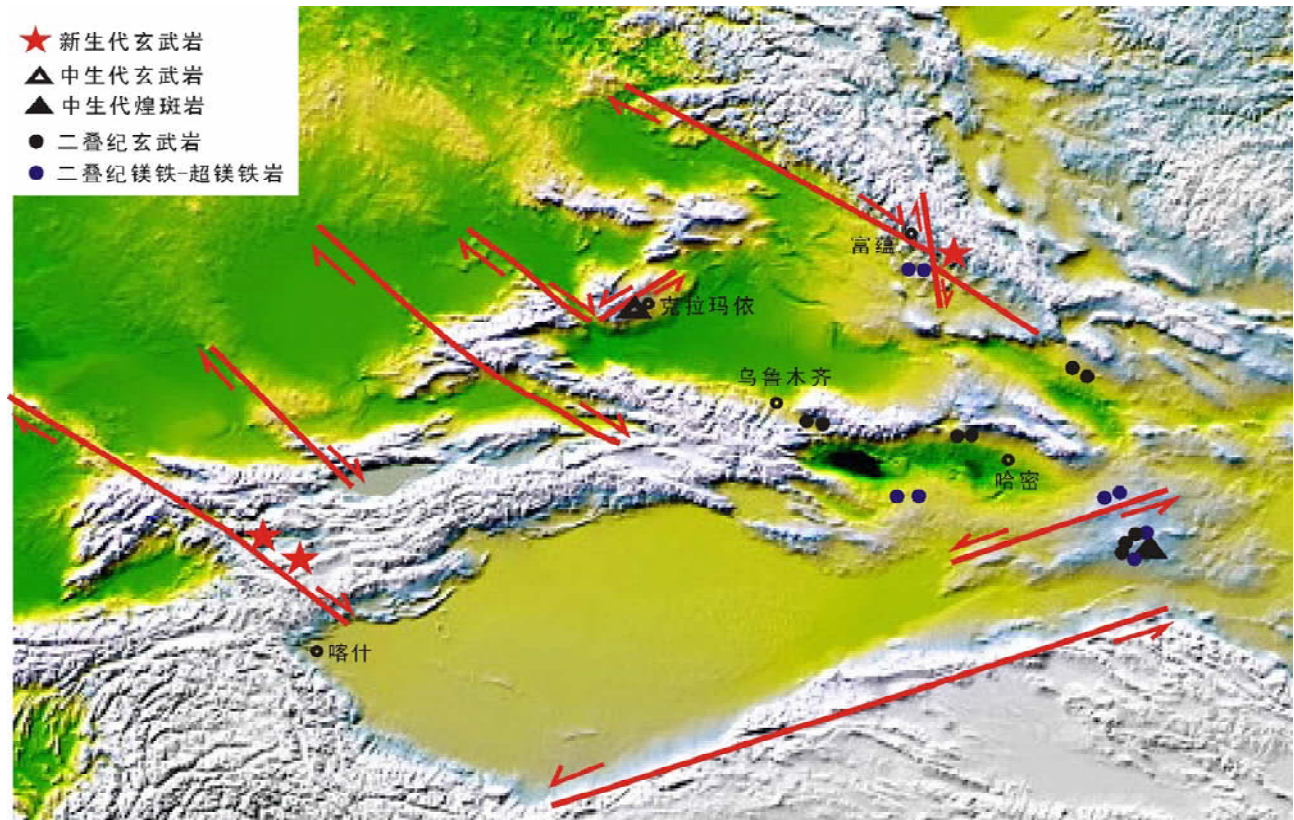


图1 新疆北部地区幔源岩浆岩分布图

Fig. 1 Distribution map for mantle-derived magmatic rocks in northern Xinjiang

表1 新疆北部幔源岩浆岩的 Sr-Nd 同位素特征

Table 1 Sr-Nd isotope characteristics of mantle-derived magmatic rocks in northern Xinjiang

名称	岩性	年代 (Ma)	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	资料来源
喀拉通克	闪长岩	287	0.70375 ~ 0.70504	6.3 ~ 8.2	张招崇等,2006 韩宝福等,2004
	苏长岩				
	橄榄苏长岩				
	辉绿辉长岩				
黄山(东)	橄榄岩	274	0.70316 ~ 0.70533	7.1 ~ 9.3	Zhou <i>et al.</i> , 2004 韩宝福等,2004
	辉长苏长岩				
	苏长岩				
三塘湖	玄武岩	260 ~ 290	0.70388 ~ 0.70481	4.93 ~ 7.99	赵泽辉等,2006
红柳河	玄武岩	280 ~ 300	0.70383 ~ 0.70544	2.05 ~ 3.67	潘金花等,2008
	苦橄玄武岩				
柳园	煌斑岩	220 ~ 240	0.70862 ~ 0.70874	-3.9 ~ -2.15	刘畅等,2006
克拉玛依	玄武岩	192	0.70541 ~ 0.70543	4.4 ~ 4.9	徐新等,2008
	橄榄玄武岩 黑云母辉长二长岩 辉长辉绿岩 辉石橄榄岩	100	0.70406 ~ 0.70554	3.46 ~ 5.96	季建清等,2006
托云	碱玄武岩 碱性橄榄玄武岩	70.4	0.70356 ~ 0.70374	5.47 ~ 5.99	王彦斌等,2000
	碱性橄榄辉绿岩	60	0.70368 ~ 0.70492	4.32 ~ 5.93	徐学义等,2003 李永安等,1995 Sobel, 1995
	碱性玄武岩 碱性橄榄玄武岩	40.36	0.70352 ~ 0.70422	4.17 ~ 6.54	徐学义等,2003 王彦斌等,2000
哈拉乔拉	橄榄玄武岩	10 ~ 20	0.70443 ~ 0.70454	0.29 ~ 1.03	张元元等,2007

柳园二叠纪裂谷带两侧呈脉状侵入于下二叠统地层中,岩石富含金云母,对金云母斑晶进行 K-Ar、Ar-Ar 地质年代测定结果为 220 ~ 240Ma (刘畅等,2006); 克拉玛依玄武岩分布于新疆西准噶尔达拉布特断裂东侧克拉玛依西南 10 ~ 15km 山麓地段,表现为喷溢相熔岩,岩性以玄武岩和橄榄玄武岩为代表,玄武岩全岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  阶段升温年龄测定结果为 192Ma (徐新等,2008); 托云盆地玄武岩类分布于天山山脉西南费尔干纳断裂东侧托云盆地,托云盆地是晚白垩世-老第三纪的大型裂谷盆地,托云玄武岩类表现为火山喷出或浅成岩浆侵入,以玄武岩、辉石橄榄岩、辉绿岩、辉长岩为代表,已有的年代学数据显示托云盆地的岩浆活动时限为 125 ~ 40.36Ma (李永安等,1995; Sobel, 1995; 韩宝福等,1998; 王彦斌等,2000; 季建清等,2006); 哈拉乔拉橄榄玄武岩分布在新疆阿尔泰山东部可可托海-二台断裂东侧的青河县哈拉乔拉村,主要岩性为橄榄玄武岩, K-Ar 法测得全岩年龄为 10 ~ 20Ma (张元元等,2007)。

与古生代增生造山过程岩浆活动相比,新疆北部中新生

代岩浆活动规模大为减少,主要沿裂谷带和大型断裂带分布,而岩石类型也以幔源岩浆为主。中生代幔源岩浆活动为研究中亚造山带地区壳幔演化过程提供了重要的线索。

### 3 中生代镁铁-超镁铁岩系的地球化学特征

托云玄武岩类(徐学义等,2003,王彦斌等,2000; 季建清等,2006)和哈拉乔拉橄榄玄武岩(张元元等,2007)具有相似的地球化学特征,柳园煌斑岩(刘畅等,2006)的地球化学特征比较特殊。

#### 3.1 主量元素特征

托云玄武岩类的  $\text{SiO}_2$  含量较低,  $\text{TiO}_2$  含量较高,  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  含量较高,在 TAS 图解(图 2)中,托云玄武岩类均为碱性玄武岩系列,部分落入碧玄武岩区域,部分落入粗面玄武岩-玄武岩区域。哈拉乔拉橄榄玄武岩的  $\text{SiO}_2$  含量较高,  $\text{TiO}_2$



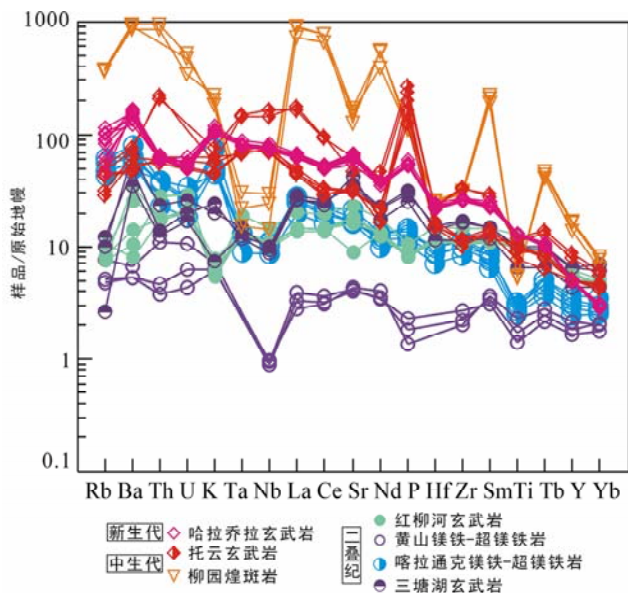


图4 新疆北部幔源岩浆岩的原始地幔标准化微量元素蛛网图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Primitive-mantle normalized spidergram for mantle-derived magmatic rocks in northern Xinjiang (normalization values are from Sun and McDonough, 1989)

1所示,柳园煌斑岩  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  为负值,变化在  $-3.89 \sim -2.14$  之间, ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 大致位于 EM I 和 EM II 型富集地幔之间;克拉玛依玄武岩的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为低正值,变化在  $4.4 \sim 4.9$  之间;托云玄武岩类随着形成时代的变化  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值的变化范围基本没有起伏,当  $t$  分别为 100Ma、70.4Ma、60Ma、40.36Ma,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值分别为 2.73 ~ 5.96、5.47 ~ 5.99、4.32 ~ 5.93、4.17 ~ 6.54,均为低正值,此外托云玄武岩类的 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 相对偏低;哈拉乔拉玄武岩的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值变化在  $0.29 \sim 1.03$  之间, ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 同样与 EM I 型富集地幔(0.705)接近。

#### 4 中生代与二叠纪镁铁-超镁铁岩对比研究

新疆北部二叠纪镁铁-超镁铁岩系广泛发育,镁铁-超镁铁质杂岩体有喀拉通杂岩体(张招崇等,2003,2006;韩宝福等,2004),东天山黄山杂岩体(Zhou *et al.*, 2004;韩宝福等,2004),东天山吐哈盆地南缘海豹滩、恰特卡尔塔格杂岩体(李锦铁等,2006)等,二叠系玄武岩在三塘湖盆地(赵泽辉等,2006),新甘交界红柳河地区(潘金花等,2008),博格达山南缘白杨沟、车轱辘泉、七角井地区(舒良树等,2005)等地均有分布。

选取喀拉通克镁铁-超镁铁质杂岩体(张招崇等,2003,2006;韩宝福等,2004)、黄山镁铁-超镁铁质杂岩体(Zhou *et al.*, 2004;韩宝福等,2004)、三塘湖盆地二叠纪玄武岩(赵泽辉等,2006)和柳河地区二叠纪玄武岩(潘金花等,2008),可以看出它们具有相似的主微量、同位素地球化学特征:  $\text{TiO}_2$

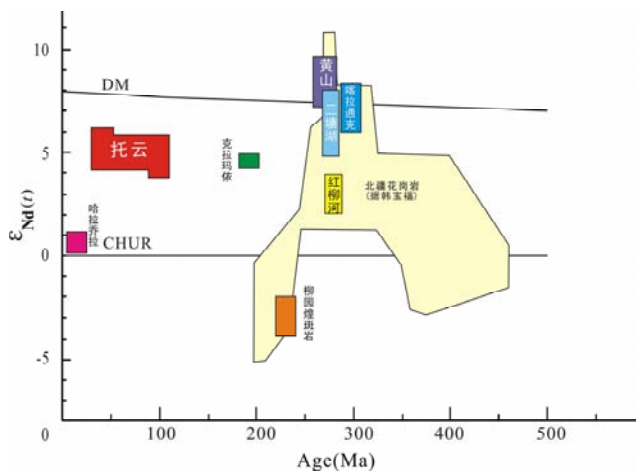


图5 新疆北部幔源岩浆岩的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值随时间变化图

Fig. 5 Variation diagrams of  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  vs. age for mantle-derived magmatic rocks in northern Xinjiang

含量低,  $\text{K}_2\text{O}$  含量低,全碱量  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  较低,属于低钾拉斑系列或钙碱性系列;轻稀土(LREE)相对富集但富集程度不高(La的丰度大约是球粒陨石的10~90倍),并且轻重稀土的分馏程度不高,稀土元素球粒陨石标准化配分图解(图3)呈现平坦型或微弱右倾型;在不相容元素原始地幔标准化图解上(图4)都具有大离子亲石元素(LILE)富集,高场强元素(HSFE)亏损的特征,同时具有Nb、Ta、Ti的负异常(图3)。二叠纪镁铁、超镁铁岩除红柳河玄武岩之外都具有高正的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值和低的 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值。

对比中生代煌斑岩、玄武岩和二叠纪镁铁、超镁铁岩的地球化学特征可以看出,中生代岩浆的  $\text{TiO}_2$  含量、K含量明显升高,并且逐渐向碱性系列演化(图2);稀土总量  $\Sigma\text{REE}$  明显提高,轻稀土的富集程度和轻重稀土的分馏程度也显著增大(图3),不相容元素的整体丰度升高,元素不相容性越强丰度增加的幅度越大,高场强元素(HSFE)的丰度大幅度提升,由亏损转化为富集,除了柳园煌斑岩之外Nb、Ta、Ti的负异常消失(图4)。从二叠纪到新生代,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值逐渐由高正值演变为低正值和负值(图5), ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值有升高的趋势,但不是很显著。

#### 5 讨论

##### 5.1 中、新生代和二叠纪镁铁-超镁铁岩类的源区特征

二叠纪镁铁-超镁铁岩普遍具有高正的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值和低的 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值,这显示了其来源是亏损的软流圈地幔,但是在图3和图4中可以看出虽然二叠纪镁铁、超镁铁岩的稀土和不相容元素整体丰度相对较低,但是富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土(LREE),可能是陆壳组分和岩石圈地幔的加入。地壳的La/Nb值(2.2)明显高于原始地幔(0.98~1),常用于判断地幔物质是否受到陆壳的混染(Dungan

*et al.*, 1986), 而 Nb/U 值在 MORB( $47 \pm 11$ ) 和 OIB( $52 \pm 15$ ) 中比较稳定, 在原始地幔中为 34, 明显高于陆壳(8), 因此也可以作为陆壳混染和陆壳物质在地幔循环的标志(Hofmann, 1997)。分别计算了喀拉通克杂岩体(原始数据据张招崇等, 2003)、黄山杂岩体(资料来自 Zhou *et al.*, 2004)、三塘湖盆地玄武岩(资料来自赵泽辉等, 2006)、红柳河玄武岩(资料来自潘金花等, 2008)的 La/Nb 和 Nb/U 值, La/Nb 依次为 2.0 ~ 2.5、2.8 ~ 7.3、2.7 ~ 2.8、0.9 ~ 1.4, Nb/U 依次为 10.2 ~ 15.3、1.0 ~ 7.8、12.1 ~ 20.1、15.6 ~ 19.4, 可以看出除了红柳河玄武岩的 La/Nb 之外均接近于陆壳, 证明陆壳组分参与了岩浆的形成。另外二叠纪的镁铁-超镁铁岩类普遍具有低的 TiO<sub>2</sub> 含量和典型的“TNT”异常, 具有类似岛弧岩浆的特征。尽管有学者提出中亚地区在晚二叠世仍然有洋壳俯冲的记录(Xiao *et al.*, 2008), 但是大多数学者研究认为中亚地区二叠纪为造山后伸展扩张的背景(Han *et al.*, 1999; Yarmolyuk *et al.*, 1999, 2000; 顾连兴等, 2000; Jahn *et al.*, 2000; Hong *et al.*, 2004; 何国琦等, 2004; 舒良树等, 2004; Zhou *et al.*, 2004), 因此二叠纪的镁铁-超镁铁岩不应是岛弧环境的产物, Nb、Ta、Ti 的负异常也可能是混入了早期的弧组分或俯冲的洋壳。喀拉通克和黄山地区镁铁-超镁铁杂岩富含角闪石等含水矿物这一事实, 也宣示了当时的地幔已经受到了交代作用。

中生代玄武岩类具有相对低的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值和低的 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值, 显示了类似于 OIB 的富集地幔源区, 整体高的稀土和不相容元素丰度以及轻稀土(LREE)的高度富集都体现了源区富集的特征, 微量元素和同位素特征的一致性表明了这种富集特征来源于源区本身, 而不是源于喷发过程中的陆壳混入。为了进一步验证, 同样计算托云玄武岩类的 La/Nb 值为 0.5 ~ 1.2, 哈拉乔拉橄榄玄武岩的 La/Nb 值为 0.76 ~ 0.82, Nb/U 为 42.7 ~ 58.6, 均接近于 OIB, 和陆壳相差甚远, 说明中生代玄武岩浆在形成过程中受陆壳物质的影响很小。

综合上述讨论, 二叠纪镁铁-超镁铁岩来源于亏损地幔, 陆壳物质参与了岩浆的形成导致在某些方面显示富集的特征, 源区可能混入了早期的弧组分或俯冲的洋壳; 中生代玄武岩类来源于相对独立的富集地幔源区, 岩浆在形成过程中经历了较弱的壳幔作用。

## 5.2 古生代晚期到中生代壳幔相互作用特征与过程

二叠纪镁铁-超镁铁岩和中生代玄武岩的主、微量元素和同位素地球化学特征的变化显示了中亚地区地幔由亏损向富集的转换。引起原始地幔富集的因素有: 俯冲板片脱水变质形成富集流体进而对俯冲带上部地幔楔的交代作用; 俯冲板块所携带的富碱、轻稀土(LREE)、不相容元素的洋壳以及陆壳或岩石圈物质在地幔中的再循环(Holm and Munksgaard, 1982; Ujike, 1988; Fabries *et al.*, 1989; Maury *et al.*, 1992), 前者与俯冲作用相关, 结合中生代玄武岩的区

域构造背景, 中亚地区多条蛇绿岩带所代表的洋盆在古生代晚期已经全部闭合(肖序常等, 1990; 李锦轶等, 1990; 郭召杰等, 1993; 马瑞士等, 1993; 肖文交等, 2006), 即中亚地区是古生代造山带, 中生代一直处于板内环境, 因此中生代板内玄武岩源区的富集应与古生代的俯冲板片脱水过程无关。

前面讨论中得知, 二叠纪镁铁-超镁铁岩来源于亏损地幔, 是由于古生代多个洋盆闭合和增生造山作用, 致使中亚造山带岩石圈不断增厚, 最终引起大范围的拆沉去根作用, 使得原碰撞造山带增厚的岩石圈快速机械减薄, 致使亏损的软流圈地幔上涌底侵并发生部分熔融的产物(韩宝福等, 1999, 2004; Zhou *et al.*, 2004), 并且侵入地壳的过程中受到了地壳物质或者早期俯冲带物质的混染。拆沉的岩石圈以及早期俯冲下沉的洋壳和沉积物下降到地幔, 当到达一定深度时开始脱水、变质进而部分熔融形成富碱质、高度富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土(LREE)的熔体。从古生代晚期开始到中生代, 这些富集熔体上升和岩石圈地幔发生交代作用, 长时期的再循环和调整均衡作用, 使得原亏损地幔逐渐改造为整体富碱、富含轻稀土(LREE)和不相容元素的富集地幔。在中生代时期, 被改造了的富集地幔部分熔融沿裂谷带或大型走滑断裂薄弱带上涌, 形成了中生代幔源岩浆的喷发。注意到新生代哈拉乔拉橄榄玄武岩相对于时代较老的托云玄武岩类轻稀土(LREE)和不相容元素富集的程度更高, 反映了这种交代改造过程的持续性; 柳园煌斑岩高度富碱,  $\epsilon_{Nd}(t)$  为负值, ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 高, 轻稀土(LREE)和大离子亲石元素(LILE)高度富集, 相对亏损 Nb、Ta、Ti(图3, 图4, 图5), 基本代表了富集熔体的组分, 是由于熔体交代岩石圈地幔发生低程度的部分熔融而形成煌斑岩母岩浆并沿裂隙侵入的产物。红柳河玄武岩的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值相对于其他二叠纪镁铁-超镁铁岩较低, ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 相对较高, 稀土丰度和不相容元素含量也相对较高(图3, 图4, 图5), 反映了较富集的源区特征, 可能在岩浆形成时岩石圈地幔已经经历了一定程度的交代改造。

综上所述, 中亚造山带古生代晚期发生岩石圈拆沉和亏损地幔上涌底侵并且部分熔融, 伴随形成了大规模的镁铁-超镁铁岩系, 拆沉的岩石圈以及早期俯冲下沉的洋壳和沉积物熔融交代改造亏损地幔最终使地幔富集。在中生代, 富集地幔部分熔融体沿着裂谷带或大型走滑断裂薄弱带上涌形成中生代幔源岩浆的喷发。

## 6 结论

(1) 新疆北部地区的中生代幔源岩浆岩空间上位于裂谷带或者大型走滑断裂带附近。在甘肃柳园二叠纪裂谷带、新疆西准噶尔达拉布特断裂东侧、天山山脉西南费尔干纳断裂东侧托云盆地、阿尔泰山东部可可托海-二台断裂东侧均有出露。以煌斑岩、玄武岩、橄榄玄武岩、辉石橄榄岩、辉绿岩、辉长岩为代表。

(2) 新疆北部地区的中新生代幔源岩浆岩具有高的  $\text{TiO}_2$  含量, 富碱、高度富集不相容元素和轻稀土 (LREE), 并且具有相对低的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值和相对高的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ , 来源于类似 OIB 源的富集地幔。而新疆北部地区的二叠纪幔源镁铁-超镁铁岩来源于亏损地幔。中生代和古生代晚期的幔源岩浆岩源区特征的鲜明对比, 标志了中亚造山带地幔由亏损向富集的转换。

(3) 古生代多个洋盆闭合和增生造山作用致使中亚造山带的岩石圈不断增厚, 于古生代晚期发生拆沉, 软流圈亏损地幔上涌底侵并且部分熔融形成了二叠纪镁铁-超镁铁岩系。拆沉的岩石圈以及俯冲下沉的洋壳和沉积物在地幔环境下熔融改造亏损地幔, 最终使中亚地区地幔整体富碱, 富含轻稀土 (LREE) 和不相容元素。被改造了的富集地幔部分熔融沿裂谷带或大型走滑断裂薄弱带上涌, 形成了中生代幔源岩浆的喷发。

**致谢** 研究过程中多次得到赵振华研究员、顾连兴教授、李锦轶研究员、王京彬研究员、肖文交研究员、高俊研究员和王涛研究员等专家的指导与帮助, 305 项目办公室给予大力支持, 成文后蒙李锦轶研究员和舒良树教授审阅并提出中肯的修改意见, 特致衷心感谢!

## References

Chen B and Jahn BM. 2002. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of Northwest China and their tectonic implications. *Geol. Mag.*, 129: 1–13

Cunningham D, Owen LA, Snee LW and Li JL. 2003. Structural framework of a major intracontinental orogenic termination zone, the easternmost Tien Shan, China. *Journal of the Geological Society, London*, 160: 575–590

Dungan MA, Lindstrom MM, Mcmillan NJ, Moorbath S and Hoefs J. 1986. Open system magmatic evolution of the Taos Plateau volcanic field, northern New Mexico, the petrology and geochemistry of the Servilletas basalt. *Journal of Geophysical Research*, 91: 5999–6028

Fabries J, Bodinier JL, Dupuy L, Lorand JP and Benkerrou C. 1989. Evidence for modal metasomatism in the orogenic spinel lherzolite body from Caussou (Northeastern Pyrenees, France). *Journal of Petrology*, 30(1): 199–228

Gu LX, Hu SX, Yu CS, Li HY, Xiao XJ and Yan ZF. 2000. Carboniferous volcanites in the Bogda orogenic belt of eastern Tianshan: Their tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3): 305–316 (in Chinese with English abstract)

Guo ZJ, Ma RS, Guo LZ and Shi YS. 1993. A comparative study on three ophiolitic mélange belts in eastern Xinjiang. *Geological Review*, 39(3): 236–247 (in Chinese with English abstract)

Guo ZJ, Zhang ZC, Wu CD, Fang SH and Zhang R. 2006a. The Mesozoic and Cenozoic exhumation history of Tianshan and comparative studies to the Junggar and Altai mountains. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 1–15 (in Chinese with English abstract)

Guo ZJ, Chen ZL, Shu LS and Li SX. 2006b. Mesozoic-Cenozoic Intracontinental Orogeny and Mineralization of the Sandstone-Type Uranium Deposit in the Central Asian Orogenic Belt, Northwest China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)

Han BF, Wang SG, Jahn BM, Hong DW, Kagami H and Sun YL. 1997. Depleted-mantle magma source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd-Sr isotopic

evidence, and implication for Phanerozoic crustal growth. *Chemical Geology*, 138: 135–159

Han BF, Wang XC, He GQ, Wu TR, Li MS, Liu YL and Wang SG. 1998. Discovery of mantle and lower crust xenoliths from Early Cretaceous volcanic rocks of southwestern Tianshan, Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 43(23): 2544–2547 (in Chinese)

Han BF, He GQ and Wang SG. 1999. Postcollisional mantle-derived magmatism, underplating and implications for basement of the Junggar Basin. *Science in China (Series D)*, 29: 16–27

Han BF, Ji JQ, Song B, Chen LH and Li ZH. 2004. SHRIMP zircon U-Pb ages of Kalatongke No. 1 and HuanShandong Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic complexes, North Xinjiang, and geological implications. *Chinese Science Bulletin*, 49(22): 2324–2328 (in Chinese)

He GQ, Li MS, Liu DQ, Tang YL and Zhou RH. 1994. Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang of China. Urumqi: Xinjiang People's House, 1–437 (in Chinese)

Hofmann AW. 1997. Mantle geochemistry: The message from oceanic volcanism. *Nature*, 385: 219–229

Holm PM and Munksgaard NC. 1982. Evidence for mantle metasomatism: An oxygen and strontium isotope study of the Vulsinian District, Central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 60(3): 376–388

Hong DW, Zhang JS, Wang T, Wang SG and Xie XL. 2004. Continental crustal growth and the supercontinental cycle: Evidence from the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 799–813

Hu AQ, Jahn BM, Zhang GX, Chen YB and Zhang QF. 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd-Sr isotopic evidence. Part I: Isotopic characterization of basement rocks. *Tectonophysics*, 328: 15–51

Jahn BM, Wu FY and Chen B. 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. *Trans Royal Soc. Edinburgh: Earth Science*, 91: 181–193

Ji JQ, Han BF, Zhu MF, Chu ZY and Liu YL. 2006. Cretaceous-Paleogene alkaline magmatism in Tuyun basin, southwest Tianshan Mountains: Geochronology, petrology and geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1324–1340 (in Chinese with English abstract)

Khain EV, Bibikova EV, Kröner A, Zhuravlev DZ, Sklyarov EV, Fedotova AA and Kravchenko-Berezhnoy IR. 2002. The most ancient ophiolite of the Central Asian fold belt: U-Pb and Pb-Pb zircon ages for the Duzhugur Complex, Eastern Sayan, Siberia, and geodynamic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 199(3–4): 311–325

Le Bas MJ, Le Maitre RW, Streckeisen A and Zanertin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27: 745–750

Li JY, Xiao XC, Tang YQ, Zhao M, Zhu BQ and Feng YM. 1990. Main characteristics of Late Paleozoic plate tectonics in the southern part of East Junggar, Xinjiang. *Geological Review*, 36(4): 305–316 (in Chinese with English abstract)

Li JY and Xiao XC. 1999. Brief review on some issues of frame work and tectonic evolution of Xinjiang crust, NW China. *Scientia Geologica Sinica*, 34(4): 405–419 (in Chinese with English abstract)

Li JY, He GQ, Xu X, Li HQ, Sun GH, Yang TN, Gao LM and Zhu ZX. 2006a. Crustal tectonic framework of northern Xinjiang and adjacent regions and its formation. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 148–168 (in Chinese with English abstract)

Li JY, Song B, Wang KZ, Li YP, Sun GC, Qi DY. 2006b. Permian mafic-ultramafic complexes on the southern margin of the Tu-Ha Basin, East Tianshan Mountains: Geological records of vertical crustal growth in Central Asia. *Acta Geoscientia Sinica*, 27(5): 424–446 (in Chinese with English abstract)

Li YA, Li Q, Zhang H, Sun DJ, Cao YD and Wu SZ. 1995. Study of paleomagnetism and basin evolution from Tarim and adjacent areas. *Xinjiang Geology*, 13(4): 293–370 (in Chinese with English abstract)

Liu C, Zhao ZH and Guo ZJ. 2006. Chronology and geochemistry of

- lamprophyre dykes from Beishan area, Gansu Province and implications for the crnst-mantle interaction. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1294–1306 (in Chinese with English abstract)
- Ma RS, Wang CY and Ye SF. 1993. The Outline of Plate Tectonics and Crustal Evolution in the Eastern Tianshan Belt, China. Nanjing: Publishing House of Nanjing University, 1–225 (in Chinese)
- Maury RC, Defant MJ and Joron JL. 1992. Metasomatism of the sub-arc mantle inferred from trace elements in Philippine xenoliths. *Nature*, 360(6405): 661–663
- Pan JH, Guo ZJ, Liu C and Zhao ZH. 2008. Geochronology, geochemistry and tectonic implications of Permian basalts in Hongliuhe area on the border between Xinjiang and Gansu. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 793–802 (in Chinese with English abstract)
- Shu LS, Guo ZJ, Zhu WB, Lu HF and Wang B. 2004. Post-collision tectonism and basin-range evolution in the Tianshan Belt. *Geological Journal of China Universities*, 10(3): 393–404 (in Chinese with English abstract)
- Shu LS, Zhu WB, Wang B, Faure M, Charvet J and Cluzel D. 2005. The post-collision intracontinental rifting and olistostrome on the southern slope of Bogda Mountains, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 25–36 (in Chinese with English abstract)
- Sobel ER. 1995. Basin analysis and apatite fission-track, thermochronology of the Jurassic-Paleogene southwest Tarim Basin, NW China. California: Stanford University
- Sobel ER and Arnaud N. 2000. Cretaceous Paleogene basaltic rocks of the Tuoyun basin, NW China and the Kyrgyz Tian Shan; The trace of a small plume. *Lithos*, 50: 191–215
- Sun SS and McDonough WE. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmaism in the Ocean Basins*. Geological Society of London, Special Publication, 42: 13–345
- Ujike O. 1988. Probable mineralogical control on the mantle metasomatic fluid composition beneath the Northeast Japan arc. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(8): 2037–2046
- Wang DH and Li TD. 2001. Geochemistry and environment of the Cenozoic basalts in Halaqiaola, east Altai Mountains. *Geotectonica Et Metallogenia*, 25(3): 282–289 (in Chinese with English abstract)
- Wang YB, Wang Y, Liu X, Fu DR, Xiao XC and Qi LS. 2000. Geochemical characteristics and genesis of Late Cretaceous to Paleogene basalts in Tuoyun Basin, south Tianshan Mountains. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(2): 131–139 (in Chinese with English abstract)
- Wartes MA, Carroll AR and Greene TJ. 2002. Permian sedimentary record of the Turpan-Hami basin and adjacent regions, northwest China; Constraints on postamalgamation tectonic evolution. *Geological Society of America Bulletin*, 114(2): 131–152
- Xiao WJ, Windley B F, Yan QR, Qin KZ, Chen HL, Yuan C, Sun M, Li JL and Sun S. 2006. SHRIMP zircon age of the Aermantai ophiolite in the North Xinjiang area, China and its tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 32–37 (in Chinese with English abstract)
- Xiao WJ, Han CM, Yuan C, Yuan C, Sun M, Lin SF, Chen HL, Li ZL, Li JL and Sun S. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China; Implications for the tectonic evolution of central Asia. *Journal of Asian Earth Science*, 32(2008): 102–117
- Xiao WJ, Shu LS, Gao J, Xiong XL, Wang JB, Guo ZJ, Li JY and Sun M. 2008. Continental dynamics of the Central Asian Orogenic Belt and its metallogeny. *Xinjiang Geology*, 26(1): 4–8 (in Chinese with English abstract)
- Xiao XC, Tang YQ, Li JY, Zhao M, Feng YM and Zhu BQ. 1990. On the tectonic evolution of the northern Xinjiang, Northwest China. *Geoscience of Xinjiang* (1). Beijing: Geological Publishing House, 47–68 (in Chinese)
- Xu X, Chen C, Ding TF, Liu XY and Li HQ. 2008. Discovery of lisa basalt northwestern edge of Junggar basin and its geological significance. *Xinjiang Geology*, 26(1): 9–16 (in Chinese with English abstract)
- Xu XY, Xia LQ, Xia ZH, He SP and Ma ZP. 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)
- Yarmolyuk VV, Samoilov VS, Lvanov VG, Vorontso AA and Zhuravlev DZ. 1999. Composition and sources of basin in the Late Paleozoic rift system of central Asian; Geochemical and isotopic data. *Geochemical International*, 37(10): 921–935
- Yarmolyuk VV, Kovalenko RVS and Kuzmin MI. 2000. North Asian superplume activity in the Phanerozoic; Magmaism and geodynamics. *Geotectonics*, 34(5): 343–366
- Zhang YY, Guo ZJ, Liu C and Xu WQ. 2007. Geochemical characteristics and geologic implications of Cenozoic Basalts, east Altai in Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1730–1738 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZC, Yan SH, Chen BL He LX, He YS and Zhou G. 2003. Geochemistry of the Kalatongke basic complex in Xinjiang and its constraints on genesis of the deposit. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(3): 217–224 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZC, Yan SH, Chen BL, He LX, He YS, Zhou G and Chai FM. 2006. Sr, Nd and O isotope geochemistry of the mafic-ultramafic complexes in the south margin of Altay orogenic belt and discussion on their sources. *Geological Review*, 52(1): 38–42 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Guo ZJ, Han BF and Wang Y. 2006. The geochemical characteristics and tectonic-magmaism implications of the latest-Paleozoic volcanic rocks from Santanghu basin, eastern Xinjiang, northwest China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 199–214 (in Chinese with English abstract)
- Zhou MF, Leshner CM, Yang ZX, Li JW and Sun M. 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Hangshan district, Eastern Xinjiang, Northwest China; Implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt. *Chemical Geology*, 209: 233–257
- Zhu YF, Zhang LF, Gu LB, Guo X and Zhou J. 2005. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 50: 2201–2212
- Zhu YF. 2007. Indosinian movement and metallogeny in Xinjiang, China. *Geological Bulletin of China*, 26(5): 510–519 (in Chinese with English abstract)

#### 附中文参考文献

- 顾连兴, 胡受奚, 于春水, 李宏宇, 肖新建, 严正富. 2000. 东天山博格达山造山带石炭纪火山岩及其形成地质环境. *岩石学报*, 16(3): 305–316
- 郭召杰, 马瑞士, 郭令智, 施央申. 1993. 新疆东部三条蛇绿混杂岩带的比较研究. *地质论评*, 39(3): 236–247
- 郭召杰, 张志诚, 吴朝东, 方世虎, 张锐. 2006a. 中、新生代天山隆升过程及其与准噶尔、阿尔泰山比较研究. *地质学报*, 80(1): 1–15
- 郭召杰, 陈正乐, 舒良树, 李胜. 2006b. 中国西部中亚型造山带中生代陆内造山过程与砂岩型铀矿成矿作用. 北京: 地质出版社
- 韩宝福, 王学潮, 何国琦, 吴秦然, 李茂松, 刘玉琳, 王式光. 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
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 陈立辉, 李怀宗. 2004. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁质杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *科学通报*, 49(22): 2324–2328

- 何国琦,李茂松,刘德权,唐延龄,周汝洪. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿. 乌鲁木齐:新疆人民出版社,1-437
- 季建清,韩宝福,朱美妃,储著银,刘玉琳. 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
- 李锦轶,肖序常,汤耀庆,赵民,朱宝清,冯益民. 1990. 新疆东准噶尔卡拉麦里地区晚古生代板块构造的基本特征. 地质论评,36(4):305-316
- 李锦轶,肖序常. 1999. 对新疆地壳结构与构造演化几个问题的简要评述. 地质科学,34(4):405-419.
- 李锦轶,何国琦,徐新,李华芹,孙桂华,杨天南,高立明,朱志新. 2006a. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨. 地质学报,80(1):148-168
- 李锦轶,宋彪,王克卓,李亚萍,孙桂华,齐得义. 2006b. 东天山吐哈盆地南缘二叠纪幔源岩浆杂岩:中亚地区陆壳生长的地质记录. 地球学报,27(5):424-446
- 李永安,李强,张慧,孙东江,曹运动,吴绍祖. 1995. 塔里木及其周边古地磁研究与盆地演化. 新疆地质,13(4):293-370
- 刘畅,赵泽辉,郭召杰. 2006. 甘肃北山地区煌斑岩的年代学和地球化学及其壳幔过程讨论. 岩石学报,22(5):1294-1306
- 马瑞士,王赐银,叶尚夫. 1993. 东天山构造格架及地壳演化. 南京:南京大学出版社,1-225
- 潘金花,郭召杰,刘畅,赵泽辉. 2008. 新甘交界红柳河地区二叠纪玄武岩年代学、地球化学及构造意义. 岩石学报,24(4):793-802
- 舒良树,郭召杰,朱文斌,卢华复,王博. 2004. 天山地区碰撞后构造与盆山演化. 高校地质学报,10(3):393-404
- 舒良树,朱文斌,王博,Faure M, Charvet J, Cluzel D. 2005. 新疆博格达南缘后碰撞陆内裂谷和下水下塌构造. 岩石学报,21(1):25-36
- 王登红,李天德. 2001. 阿尔泰东部新生代火山岩的地球化学特点及构造环境. 大地构造与成矿学,25(3):282-289
- 王彦斌,王永,刘训,傅德荣,肖序常,戚龙水. 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
- 肖文交, Windley BF, 阎全人, 秦克章, 陈汉林, 袁超, 孙敏, 李继亮, 孙枢. 2006. 北疆地区阿尔曼太蛇绿岩锆石 SHRIMP 年龄及其大地构造意义. 地质学报,80(1):32-37
- 肖文交,舒良树,高俊,熊小林,王京彬,郭召杰,李锦轶,孙敏. 2008. 中亚造山带大陆动力学过程与成矿作用. 新疆地质,26(1):4-8
- 肖序常,汤跃庆,李锦轶,赵民,冯益民,朱宝清. 1990. 试论新疆北部大地构造演化. 见305项目《新疆地质科学》编委会. 新疆地质科学(1). 北京:地质出版社,47-68
- 徐新,陈川,丁天府,刘兴义,李华芹. 2008. 准噶尔西北缘早侏罗世玄武岩的发现及地质意义. 新疆地质,26(1):9-16
- 徐学义,夏林圻,夏祖春,何世平,马中平. 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
- 张元元,郭召杰,刘畅,许文骞. 2007. 新疆阿尔泰东部新生代玄武岩的地球化学特征与地质意义. 岩石学报,23(7):1730-1738
- 张招崇,闫升好,陈柏林,何立新,何永胜,周刚. 2003. 新疆喀拉通克基性杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因的约束. 岩石矿物学杂志,22(3):217-224
- 张招崇,闫升好,陈柏林,何立新,何永胜,周刚,柴凤梅. 2006. 阿尔泰造山带南缘镁铁质-超镁铁质杂岩体的 Sr、Nd、O 同位素地球化学及其源区特征探讨. 地质论评,52(1):38-42
- 赵泽辉,郭召杰,韩宝福,王毅. 2006. 新疆三塘湖盆地古生代晚期火山岩地球化学特征及其构造-岩浆演化意义. 岩石学报,22(1):199-214
- 朱永峰. 2007. 新疆的印支运动与成矿. 地质通报,26(5):510-519