

西昆仑阿卡孜达坂绿片岩：受大陆地壳混染的板内玄武岩*

袁超¹ 孙敏² 杨经绥³ 周辉⁴ 周美夫²

YUAN Chao¹, SUN Min², YANG JingSui³, ZHOU Hui⁴, ZHOU Mei-Fu²

1. 中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室, 广州 510640

2. 香港大学地球科学系, 香港薄扶林道

3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100073

4. 北京大学科学技术部 北京 100864

1. Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Department of Earth Science, The University of Hong Kong, Pokfulam Road, Hong Kong, China

3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geosciences, Beijing 100073, China

4. Science & Technology Unit, Peking University, Beijing 100864, China

2004-06-24 收稿, 2005-01-08 改回.

Yuan C, Sun M, Yang JS, Zhou H and Zhou MF. 2005. Akaz greenschist, West Kunlun: within-plate basalt contaminated by continental crust origin of the Akaz greenschist (metabasalt), West Kunlun: accreted seamount or continental rift basalt? *Acta Petrologica Sinica*, 21(1):65-76

Abstract The Sinian-Early Cambrian Akaz greenschists (metavolcanic rocks) of West Kunlun, NW China was metamorphosed from mafic to andesitic rocks. They contain low to intermediate SiO_2 (42.3% ~ 64.7%), MgO (2.69% ~ 7.54%) and have wide range of TiO_2 (0.94% ~ 3.05%) and Fe_2O_{3T} (7.64% ~ 18.47%) contents, indicating a basaltic to andesitic protolith. These rocks possess high HFSE (e. g. Nb, Ta, Zr, Hf, Ti), REE ($\sum \text{REE} = \sim 407 \mu\text{g/g}$) and Th ($\sim 16 \mu\text{g/g}$) contents, and are characterized by relatively high Ti/Y (183 ~ 673), Th/Yb (0.6 ~ 2.8) and low Hf/Ta (1.6 ~ 8.6) ratios. They are relatively LREE-enriched ($\text{La/Yb} = 5.4 \sim 20$), and except for two samples characterized by positive Nb-anomalies, most samples show variable negative Nb-anomalies ($\text{Nb/Nb}^* = \sim 0.2$) and exhibit transitional characteristics between within-plate and subduction-related basalts. The subduction-related characteristics preclude oceanic plateau, oceanic island and within-plate seamount basalts as the protolith; while their within-plate characteristics, together with the existence of positive Nb-anomaly samples, suggest that the metavolcanic rocks were not produced in destructive settings (island arc or active continental margin). In particular, their relatively high Gd/Yb ratios (1.4 ~ 3.2) distinguish clearly these rocks from island-arc tholeiites, and their relatively high Zr/Y (3.1 ~ 12), Ta/Yb (0.27 ~ 0.73) and relatively low Zr/Nb (mostly less than 12) are of strong continental within-plate characteristics, suggesting that the protolith of the greenschist was continental rift-related basalts probably contaminated by continental crust materials during their ascent. This indicates that the Akaz metavolcanic rocks were originally formed in a continental rift environment. The Akaz metavolcanic rocks, in combination with approximately coeval within-plate volcanic rocks in East Kunlun and North Qilian, suggest that the rifting of Tarim from Gondwana most likely occurred in Sinian or Early Cambrian. Based on this study and previous work, an amended model is proposed to interpret the Sinian to Early Paleozoic tectonic evolution of West Kunlun.

Key words West Kunlun, Tarim, Gondwana, Greenschist, Seamount, Continental rift, Crustal contamination

摘要 形成于震旦-早寒武纪的西昆仑阿卡孜达坂变质火山岩是一套绿片岩相的中基性岩石,其构造性质对于西昆仑的构造演化历史具有重要的制约意义。这些变质火山岩具低到中的 SiO_2 (42.3% ~ 64.7%), MgO (2.69% ~ 7.54%), 宽的 TiO_2 (0.94% ~ 3.05%) 和 Fe_2O_{3T} (7.64% ~ 18.47%) 含量, 显示出玄武质或安山质的母岩特征。这些岩石富含高场强元素 (Nb, Ta, Zr, Hf) 和稀土 ($\sum \text{REE} = \sim 407 \mu\text{g/g}$), 并具有相对高的 Ti/Y (183 ~ 673), Th/Yb (0.5 ~ 3.9) 以及较低的 Hf/Ta

* 本研究受中国科学院知识创新(GIGCX-03-01, KZCX2-SW-119)项目以及国家自然科学基金(4003005,40372042)项目资助。

第一作者简介: 袁超, 1966年生, 博士, 研究员, 主要从事岩石地球化学研究, E-mail: yuanchao@gig.ac.cn

(1.6~8.6)比值。它们相对富集轻稀土($La/Yb = 5.4 \sim 20$),除了两个具有 Nb 正异常的样品外多数样品具有不同程度的负 Nb 异常($Nb/Nb^* = \sim 0.2$)并呈现介于板内和消减带有关岩浆之间的过渡特征。这些变质火山岩所具有的消减带特征排除了其来自大洋中脊,洋岛,板内海山和大洋台地玄武岩的可能性,而岩石所具有的板内特征以及两个具 Nb 正异常的样品表明这些变质火山岩并非形成于破坏性的板块边缘环境(如岛弧或活动大陆边缘)。它们相对高的 Gd/Yb 比值(1.4~2.9)明显不同于典型的岛弧拉斑玄武岩,同时其较高的 Zr/Y(3.1~12),Ta/Yb(0.27~0.73)和较低的 Zr/Nb(多数小于 12)显示出强烈的大陆板内特征。这些特征表明阿卡孜达坂变质火山岩的原岩是受陆壳物质污染的板内玄武岩,很可能形成于一个陆内裂谷环境。阿卡孜达坂变质火山岩与东昆仑和北祁连所发育的同时代的板内火山岩一起,可能反映了塔里木克拉通从冈瓦纳大陆的裂解事件。在上述研究的基础上,结合已有资料对震旦纪至早古生代期间的西昆仑构造演化历史进行了讨论。

关键词 西昆仑;塔里木;冈瓦纳;绿片岩;海山;大陆裂谷;地壳混染

中图分类号 P588.344, P588.145

提供相应的制约。

1 引言

西昆仑位于塔里木盆地的西南缘,记录了青藏高原最早的增生历史(潘裕生等,1994)。目前对西昆仑的构造格架大致存在两种不同的看法。一种观点认为西昆仑主要由塔里木克拉通的一部分(北昆仑地体)和一个增生弧地体(南昆仑地体)构成(Yao and Hsü, 1994; Hsü, 1995; Sengör and Natal'in, 1996; 李继亮等, 1999; Xiao et al., 2002)。另外一种观点认为南昆仑地体和北昆仑地体均是具有古老陆壳基底的微陆块,而且都曾经是塔里木克拉通的一部分,南昆仑地体从塔里木裂解以及后来向塔里木的拼贴是造成原特提斯洋盆的开放和闭合的直接原因(潘裕生等,1994; 丁道桂等,1996; Matte et al., 1996; Mattern et al., 1996)。最近的研究显示,尽管形成于不同的时代和构造背景,南昆仑地体中的花岗岩和变质杂岩均具有相对年轻的钨同位素模式年龄(< 1.5 Ga)(周辉,1998; Yuan et al., 2003)。相比之下,北昆仑地体具有 2.2~2.4 Ga 的古老基底(许荣华等,1994; 张传林等, 2003),其相应的钨模式年龄(~ 2.8 Ga, Arnaud and Vidal, 1990)也明显地老于南昆仑。这些证据表明南昆仑地体由相对年轻的物质组成,可能是一个古老的增生楔(Yuan et al., 2002; Xiao et al., 2003)。然而大量的古地磁资料表明塔里木曾经是冈瓦纳大陆的一部分,二者的分离直接导致了特提斯洋(广义)的形成(Li et al., 1991; 1996; Metcalfe, 1996; Zhao et al., 1996; Li, 1998; Stampfli and Borel, 2002)。这些研究表明在塔里木的南缘的确发生过破裂事件。

在西昆仑的阿卡孜达坂保存有一套变质的火山岩,初步的研究显示该火山岩具有明显的板内特征(邓万明,1989),反映了南昆仑地体从北昆仑地体的裂解事件(潘裕生等,1994)。然而由于这套火山岩与大理岩紧密共生,因而从岩石组合方面看也存在着增生海山的可能性(Xiao et al., 2002)。阿卡孜达坂变质火山岩的构造属性对重绘西昆仑的构造历史具有关键的制约作用。为此,本研究系统的分析了该火山岩的地球化学组成,期望对其构造背景以及区域演化

2 地质背景

青藏高原是由多个微陆块和岛弧地体由南向北拼贴增生而成(Chang et al., 1986; Molnar et al., 1987; Dewey et al., 1988; Yin and Harrison, 2000)(图1)。西昆仑位于青藏高原的西北缘,北临塔里木板块,南以古特提斯的一条缝合线(喀拉喀什断裂)与羌塘和甜水海地体相隔。西昆仑主要由北昆仑和南昆仑两个地体组成,二者之间的库地-苏巴什缝合线代表了原特提斯洋消亡闭合的最终位置(潘裕生等,1994; Matte et al., 1996; Mattern et al., 1996)(图1)。北昆仑地体的基底以赫罗斯坦群为代表,为一套由混合岩,片麻岩以及少量的变质火山岩等组成的变质杂岩,传统的锆石 U-Pb 方法和单颗粒锆石 SHRIMP 测年结果表明这套变质杂岩的年代为 2.2~2.4 Ga(许荣华等,1994; 张传林等,2003; 周辉,未发表的 SHRIMP 数据),因此北昆仑地体通常被认为是塔里木克拉通的延伸。南昆仑具有一套和北昆仑地体相似的变质基底,然而所获得的锆石 U-Pb 测年结果多集中在新元古-早古生代,缺乏早元古的年龄数据(周辉,陈义兵等未发表的数据),表明南昆仑地体的物质组成可能较为年轻。阿卡孜达坂变质火山岩所在的塞拉加孜塔格群不整合在下元古界埃连卡特群之上,由变质火山岩和变沉积岩组成(图2)(邓万明,1989; 潘裕生等,1994; 文世宣等,2000)。新藏公路穿过塞拉加孜塔格群的西部,在阿卡孜达坂附近至少出露六个层位的变质火山岩,单层的厚度在 20 至数十米不等。这套变质火山岩包括玄武岩,细碧岩,角斑岩和流纹岩,并夹有基性和酸性的凝灰岩,薄层的变质砂岩,粉砂岩,以及灰岩和变火山岩的透镜体。整合地盖在这套变质火山岩之上的是一套由白云岩,大理岩,千枚岩和片岩组成的变质杂岩。目前尚未有关于塞拉加孜塔格群形成时代的同位素年代学结果,但根据该群中所包含的叠层石和海百合茎化石,多数学者认为其形成时代介于震旦和寒武之间(潘裕生,1994; Xiao et al., 2002)。

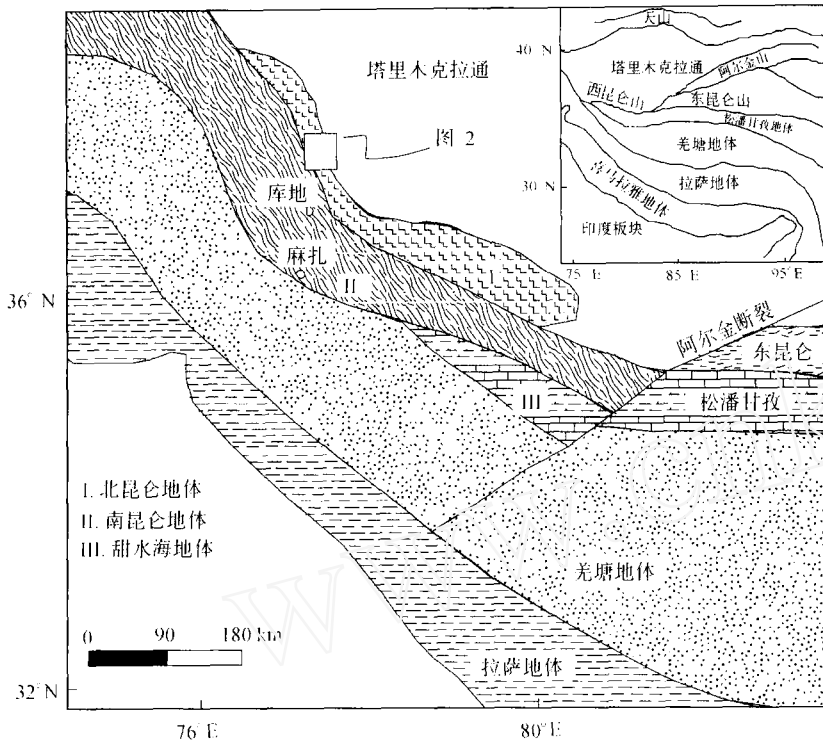


图1 青藏高原西北部的构造单元
Fig. 1 Major tectonic units of NW Tibetan Plateau

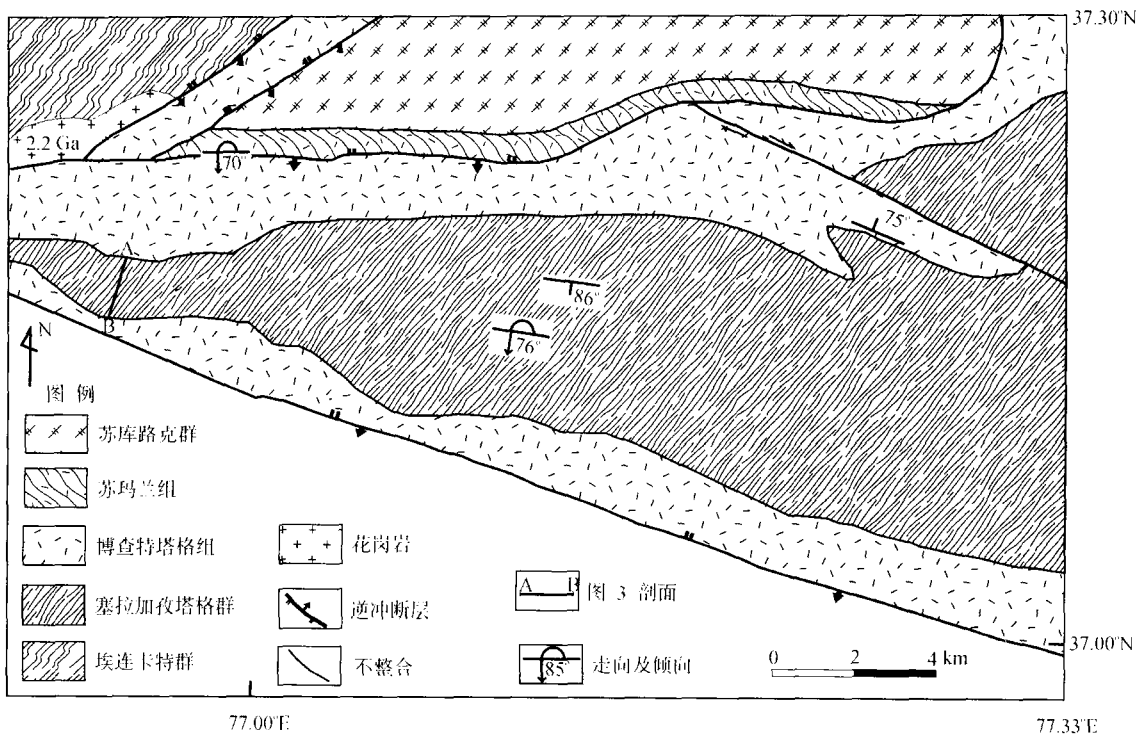


图2 西昆仑阿卡孜达坂地区地质简图
Fig. 2 Geological map of Akaz Daban area, West Kunlun

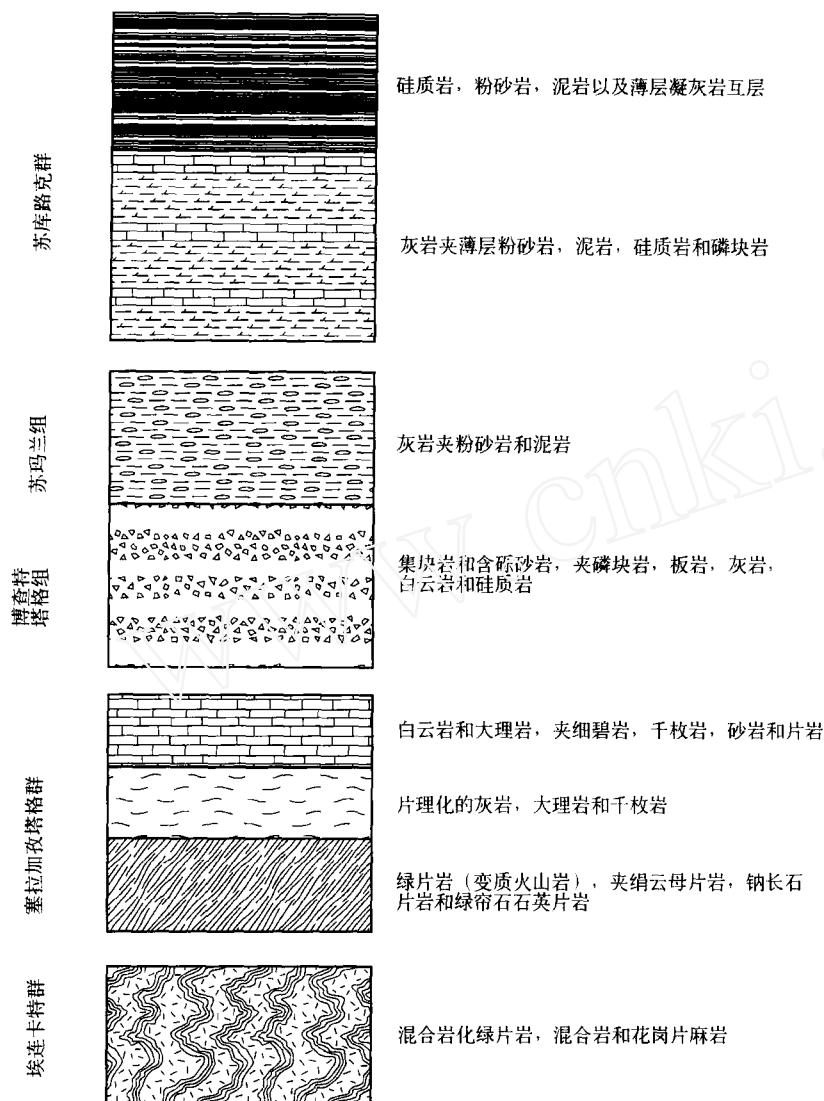


图3 西昆仑地区地层柱状简图

Fig.3 Stratigraphic column of the western Kunlun area

3 岩相学特征

阿卡孜变质火山岩已经发生了变形, 原始的结构构造已很难辨认。岩石主要由绿泥石, 绿帘石, 钠长石, 石英, 方解石和铁钛氧化物组成。部分样品(GS-13, 14, 19 和 21)中的帘石矿物为黝帘石, 三个颜色稍浅的样品(GS-13, 15 和 19)含相对少的铁镁矿物以及较多的长英质矿物。绿泥石, 绿帘石和钠长石通常呈半自型-它型, 钠长石很少发育双晶。只有一个样品(GS-13)中包含白云母。样品呈现条带状特征, 由绿色和浅色的条带相间组成。其中, 绿色条带主要由绿泥石和绿帘石组成, 而浅色条带由长英质矿物组成。上述变质矿物组合以及结构表明这些岩石经历了低温-中压的绿片岩相变质作用(Williams *et al.*, 1989)。

4 分析方法

样品经破碎后, 岩屑用去离子水在超声清洗槽中清洗 15 分钟, 重复三次。烘干后使用玛瑙磨样器磨至 200 目供化学分析。主量和微量元素的分析分别在 Varian VISTA-PRO ICP-AES 和 Perkin Elmer Elan 6000 ICP-MS 上进行, 具体步骤已由刘颖等(1998)做了详细的描述。使用国家和国际岩石标准样 GSR1-5, W-2, MRG-1, G-1, SY-4 和 GSP-1 用来监控分析的质量。主量元素的分析精度优于 1% (RSD), 稀土元素的分析精度可达 3%, 其余微量元素的分析精度可达 5%。全部分析在中国科学院广州地球化学研究所完成, 分析结果列于表 1 中。

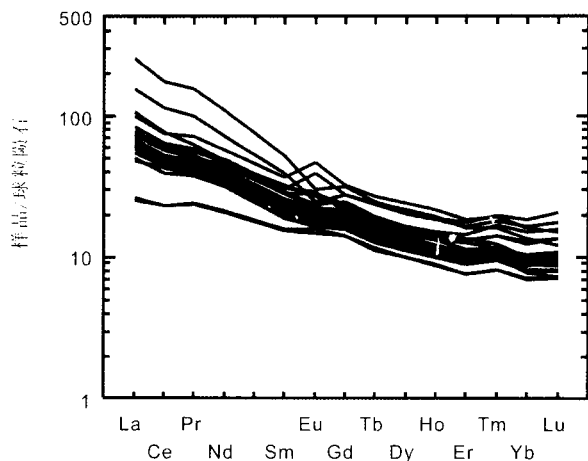


图4 西昆仑阿卡孜达坂变质火山岩稀土配分模式图
(球粒隕石标准采用 Taylor and McLennan, 1985)

Fig. 4 Chondrite normalized REE patterns of the Akaz metabolvolcanic rocks
(Chondrite data from Taylor and McLennan, 1985)

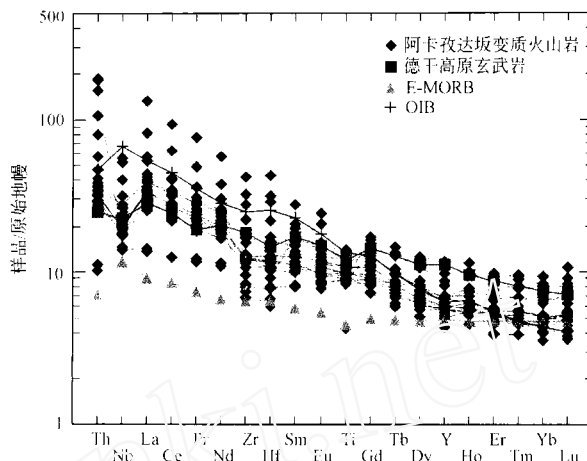


图5 阿卡孜达坂变质火山岩原始地幔标准化的微量元素蛛网图(原始地幔, E-MORB 以及 OIB 资料据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Primitive mantle normalized trace element patterns of the Akaz metabolvolcanic rocks
(Primitive mantle, E-MORB and OIB data from Sun and McDonough, 1989)

5 分析结果

阿卡孜变质火山岩的 SiO_2 含量变化较大(42% ~ 65%), 但多数样品的 SiO_2 含量介于 45% 和 55% 之间。这些样品具有相对高的 TiO_2 的含量(0.94% ~ 3.05%), 中等的 Al_2O_3 (9.95% ~ 16.91%) 和 $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{TR}}$ (7.64% ~ 18.4%) 以及相对较低的 MgO 含量(2.67% ~ 7.54%)。所有样品均展示了轻稀土富集的特征($\text{La}/\text{Yb} = 5.4\text{--}20$), 具有不同程度的铕异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.7\text{--}1.4$) 和轻微负的铈异常($\text{Ce}/\text{Ce}^* = 0.9\text{--}1.0$) (表1, 图4)。多数样品的高场强元素(HFSE)含量明显高于 E-MORB 水平(Sun and McDonough, 1989), 非常类似于 Deccan 的大陆溢流玄武岩(Wilson, 1989) (表1, 图5)。这些样品具有较高的 La/Nb (0.9 ~ 2.5) 和 Th/Nb (0.09 ~ 1.29) 比值, 显示出相对富集 LILE 和 LREE 元素。在初始地幔正常化的微量元素蛛网图上, 多数样品显示出不同程度的 Nb 亏损($\text{Nb}/\text{Nb}^* = 0.20\text{--}0.65$) (图5)。其中 Nb 亏损程度最高的样品(GS-19)具有最高的 SiO_2 (64.7%), 最低的 TiO_2 (0.94%) 和 P_2O_5 (0.08%) 含量。值得注意的是, 两个 REE 和 HFSE 含量较低的样品(GS-7 和 18)却具有正的 Nb 异常($\text{Nb}/\text{Nb}^* = 1.2$) (图5, 表1)。

6 讨论

6.1 阿卡孜达坂变质火山岩的原岩属性

阿卡孜达坂变质火山岩中部分样品具有中到高的 SiO_2 (54% ~ 65%), 和 TiO_2 , MgO 含量, 其宽的 CaO (2.05% ~ 9.96%), K_2O (0.09% ~ 5.29%) 和 Na_2O (0.15% ~ 5.30%)

和烧失量(1.94% ~ 8.53%) 表明这些样品经过了不同程度的热液蚀变作用。因此在应用其地球化学组成探讨成因和演化时, 将使用在绿片岩相条件下不活动的 Th, REE 和 HFSE (Lightfoot, 1993)。在 Nb/Y 对 Zr/Ti 分类图上, 除少数高硅样品落入碱性玄武岩(GS-16), 粗面安山岩(GS-13) 以及英安岩(GS-19) 区域外, 多数样品的投影点落入了次碱性玄武岩区(图6a), 表明阿卡孜达坂变质火山岩的原岩主要是拉斑玄武岩。在 $\text{Mg}^\# - \text{TiO}_2$ 关系图上, 绝大多数样品的投影点落入高钛拉斑玄武岩区(图6b)。这些样品具有相对低的 Cr (77.3 ~ 238 $\mu\text{g}/\text{g}$) 和 Ni (28.6 ~ 72.3 $\mu\text{g}/\text{g}$) 含量, 显示其原岩已不是原始岩浆。

6.2 阿卡孜达坂变质火山岩的源区和构造位置

大量的调查显示, 拉斑玄武岩可以产于包括大洋中脊, 大洋台地, 洋岛, 海山, 岛弧, 弧后盆地以及大陆内部等多种构造位置(Wilson, 1989; Flower, 1991; Floyd, 1991; Sunders and Tarney, 1991)。这些变质火山岩样品具有中等的 Nb/Y 比值, 相对高的 Th 和 HFSE 含量(如: Nb, Ta, Zr, Hf, Ti 和 Y), 表明其原岩可能来自一个相对富集的源区。这些变质火山岩的地球化学组成显示出介于板内和消减带有关岩浆之间的过渡特征。一方面, 较高的高场强元素含量(如: Ti, Nb, Ta), 相对高的 Ti/Y (多高于 350) 和低的 Hf/Ta (多数小于 5) 比值使的这些岩石非常类似于板内玄武岩(Condie, 1989)。另一方面, 负的铈异常, 相对高的 Th/Nb (0.1 ~ 1.3), La/Nb (0.9 ~ 2.5) 和 Th/Yb (0.5 ~ 3.9) 比值却显示出与岛弧岩浆有关的特征。这种同时具有两种或以上的地球化学特征的情况很难从各种常规的地球化学判别图获得一致的判别结果。在 Zr-Zr/Y 判别图上(Pearce and Cann, 1973), 阿卡孜达

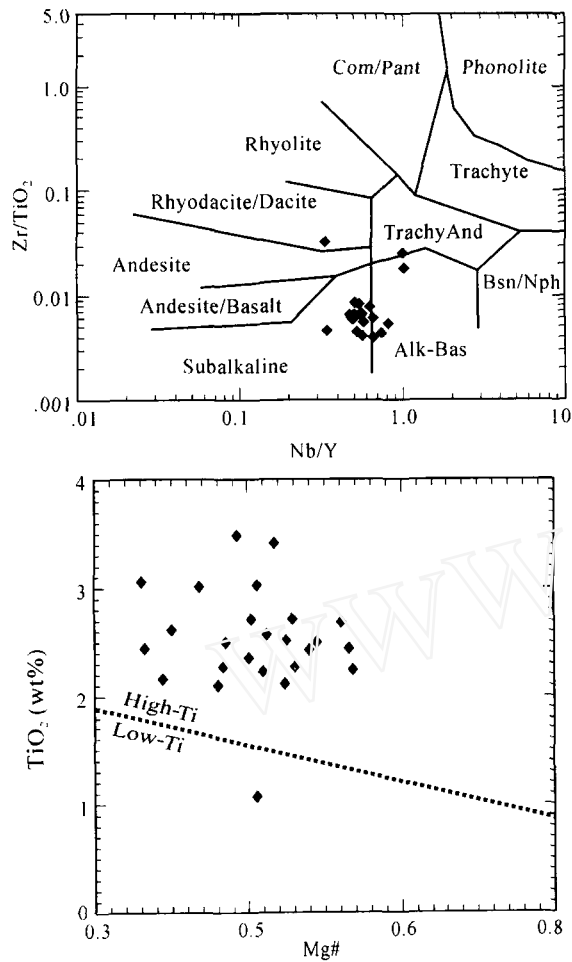


图6 阿卡孜达坂变质火山岩的化学分类图

(a) Nb/Y-Zr/Ti 关系图(据 Winchester & Floyd, 1983)

(b) Mg[#]-TiO₂ 关系图(据 lightfoot, 1993)

Fig. 6 Chemical classification of the Akaz Daban Metavolcanic rocks

(a) Nb/Y vs. Zr/Ti correlation diagram (after Winchester & Floyd, 1983)

(b) Mg[#] Vs. TiO₂ correlation diagram (after lightfoot, 1993)

坂变质火山岩的多数样品投影于板内玄武岩区(图7a),而在 Ta/Yb-Th/Yb 关系图中(Pearce, 1983),多数样品投影于活动的大陆边缘区(图7b)。

尽管具有板内玄武岩的一些特点,其相对富集轻稀土的特征以及多数样品所具有的不同程度负铈异常排除了这些变质火山岩的原岩来自于大洋中脊,洋岛或大洋台地的可能性(Floyd, 1989; Wilson, 1989, Saunders and Tarney, 1991)(图4和5)。海山的地球化学特征比较复杂,与热点有关的板内海山玄武岩不显示 Nb 的相对亏损(Clague and Dalrymple, 1987),而位于或靠近消减带环境的海山玄武岩则往往呈现强烈的消减带特征(如:Kamenetsky *et al.*, 1997)。阿卡孜达坂变质火山岩的板内特征及其与灰岩的共生组合关系具有与海山相类似的特征(Xiao *et al.*, 2002)。

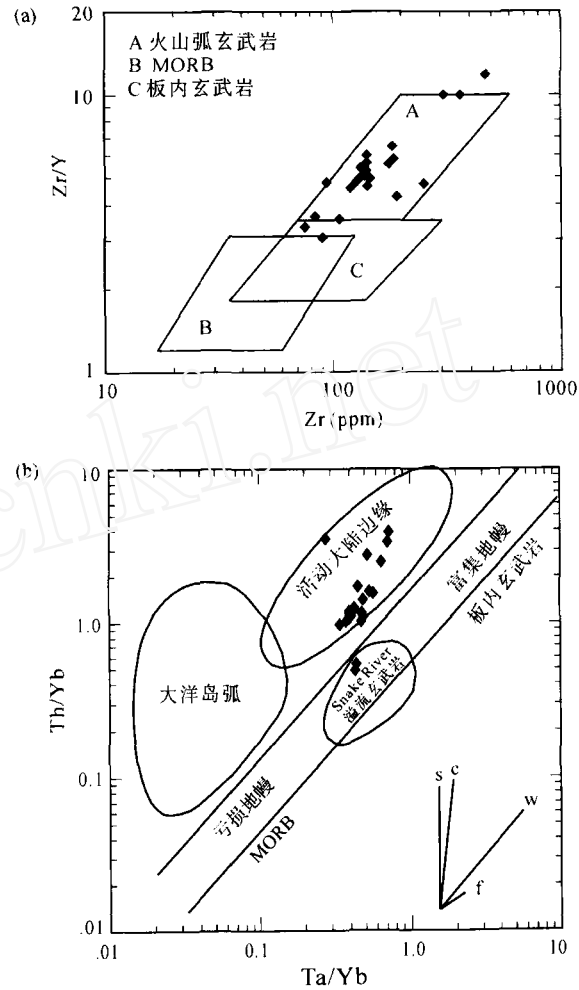


图7 基于不相容元素的构造判别图

(a) Zr-Zr/Y 关系图(据 Pearce, 1983)

(b) Th/Yb-Ta/Yb 关系图(据 Pearce, 1983)

Fig. 7 Tectonic discrimination diagram for the Akaz Daban metavolcanic rocks

(a) Zr vs. Zr/Y correlation diagram (after Pearce, 1983)

(b) Th/Yb vs. Ta/Yb correlation diagram (after Pearce, 1983)

尽管这些变质火山岩的地球化学组成在某些方面显示出富集地幔的特征,它们的 La/Nb(0.9~2.5)比值明显高于现代的 OIB 或 E-MORB(约 0.77)(Sun and McDonough, 1989),表明阿卡孜变质火山岩的原岩和与 OIB 或 E-MORB 关系密切的洋岛、海山和大洋台地玄武岩有明显不同。

消减有关的,受大陆地壳混染的大陆溢流或裂谷玄武岩都会产生负的铈异常(Pearce and Parkinson, 1993; Thirlwall *et al.*, 1994; Tatsumi and Eggins, 1995; Dupuy and Dostal, 1984; Cox and Hawksorth, 1985; Arndt *et al.*, 1993; Cadman *et al.*, 1995)。虽同为消减有关的玄武岩,产于大洋岛弧和活动大陆边缘的玄武岩确有着明显的不同。与典型的大洋岛弧玄武岩($Zr/Y < 3$; $Ta/Yb < 0.1$; $25 > Zr/Nb > 70$)相比(Condie, 1989; McCulloch and Gamble, 1991),阿卡孜达

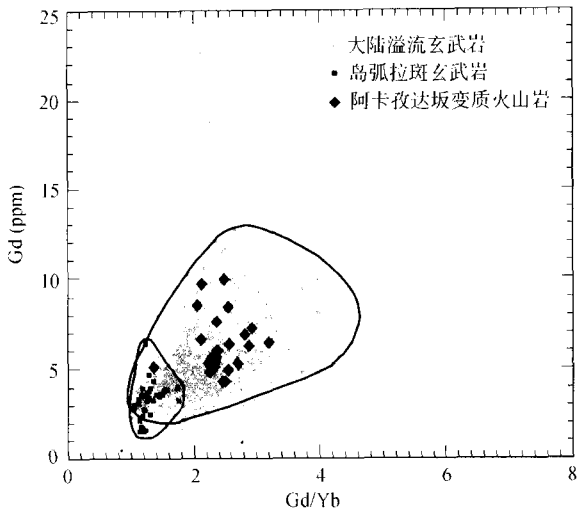


图8 阿卡孜达坂变质火山岩的 Gd/Yb-Gd 关系图
大陆溢流玄武岩和岛弧拉斑玄武岩的数据来自马普化学研究所的 GEOROC 数据库
Fig. 8 Gd/Yb vs. Gd correlation diagram for the Akaz Daban metavolcanic rocks
Data of continental flood basalts and island arc tholeiitic basalts from the database of GEOROC, MPI für Chemie

坂变质火山岩具有相对高的 Zr/Y (3.1 ~ 12); Ta/Yb (0.27 ~ 0.73) 和低的 Zr/Nb 比值 (大多低于 12), 显示出强烈的大陆亲缘性 (表 1, 图 7b)。这些大陆亲缘性以及具板内和消减带过渡性质的地球化学特征排除了洋内岛弧玄武岩作为阿卡孜达坂变质火山岩的原岩的可能性, 表明其原岩或者形成于一个活动的大陆边缘, 或者是受陆壳物质混染的大陆溢流/裂谷玄武岩。与岛弧拉斑玄武岩相比, 大陆溢流玄武岩具有更加陡的重稀土分布 (即: 较高的 Gd/Yb 比值) (Ardnt, 私人通信)。在 Gd/Yb-Gd 关系图上 (图 8), 除了 SiO_2 含量最高的一个样品 (GS-19) 外, 其余样品均投影于由大陆溢流玄武岩组成的区域, 表明其原岩主要来自受陆壳物质混染的大陆板内玄武岩。两个样品 (GS-7 和 GS-18) 具有最低的 LREE 和 Th 含量并呈现明显的正 Nb 异常 (图 5), 可能代表了受混染程度最小的岩浆组成。需要注意的是, 其中一个样品 (GS-19) 的 SiO_2 含量高达 64.7%。除非在相当高的混染比例条件下, 否则如此高的 SiO_2 含量很难用陆壳物质混染来解释。由于与该样品同层产出的其它样品具有相对正常的 SiO_2 含量, 因而该样品更可能反映了玄武岩在绿片岩相变质过程中不均匀性。

由于大洋内部岩浆活动受陆壳物质混染的机会较小, 阿卡孜达坂变质火山岩的原岩更可能形成于大陆内部环境。大陆溢流玄武岩和大陆裂谷玄武岩都有可能受到陆壳物质的混染, 但二者在岩浆活动规模方面却存在着明显的差距。包括沉积岩部分在内, 塞拉加孜塔格群的总厚度大约为 3500 米, 其中的变质火山岩部分约为 800 米^①, 这一厚度远远小于典型的大陆溢流玄武岩厚度, 如 Deccan 和 Siberian

(Mahoney, 1988; Zolotukhin and Al'mukhamedov, 1988), 表明阿卡孜达坂变质火山岩的原岩更可能形成于一个与大陆裂谷有关的环境。在科干断裂西南的塞拉加孜塔格群中有相当厚度的酸性熔岩 (约 850 米) 盖于基性熔岩之上^①, 二者呈现双峰式的岩浆活动特点, 这进一步表明其形成于一个大陆内部的裂谷环境。

7 构造意义

7.1 对塔里木与冈瓦纳分离时间的制约

由于所具有的板内特征, 阿卡孜变质火山岩曾被视为南北昆仑地体之间裂解的标志。但南昆仑地体是一个增生楔而不是一个与北昆仑地体有着相同基底的微陆块, 故二者之间并不存在开合的关系, 阿卡孜达坂变质火山岩的裂谷性质更可能反映了塔里木和冈瓦纳之间的分离。古地磁和地层资料表明塔里木克拉通曾经是冈瓦纳大陆的一部分, 然而对于塔里木克拉通脱离冈瓦纳的时代却有着不同的认识。部分学者认为这一裂解事件发生在新元古时期, 与 Rodinia 超大陆的裂解同时 (Li *et al.*, 1996; Li, 1998), 而另一部分学者认为裂解发生在泥盆纪以后, 伴随着特提斯洋的开放 (Metcalf *et al.*, 1996; Zhao *et al.*, 1996; Li, 1998; Stampfli and Borel, 2002)。本次研究结果表明, 阿卡孜达坂变质火山岩形成于塔里木南缘一个与大陆裂谷有关的环境, 尽管缺乏直接的年龄数据, 但古生物和地层学证据表明其可能形成于震旦-早寒武纪 (潘裕生等, 1994; Xiao *et al.*, 2002)。而这一时代的板内火山活动在东昆仑乃至北祁连也已经被广为报道 (Xia *et al.*, 1996; Mao *et al.*, 1998; Zuo *et al.*, 1999)。这些火山活动出现于与冈瓦纳相连的塔里木-柴达木-华北南缘, 很可能是塔里木由冈瓦纳裂解事件的产物。如果对这些变质火山岩的时代估计正确的话, 这一裂解事件可能早在新元古-早寒武纪时期就发生了。

7.2 对西昆仑晚元古-早古生代构造演化的制约

目前对西昆仑的构造演化有两种不同的观点, 即岛弧增生模式 (Yao and Hsü, 1994; Hsü *et al.*, 1995; Sengör and Natal'in, 1996; Li *et al.*, 1999; Xiao *et al.*, 2002) 和微陆块拼合模式 (潘裕生等, 1994; 丁道桂等, 1996; 姜春发等, 2002), 这两种模式各有其合理的一面, 但都未能全面地解释西昆仑的地质特征。由于阿卡孜达坂变质火山岩位于北昆仑地体的南缘, 其构造性质对西昆仑地区的构造演化有着重要的制约作用。基于阿卡孜达坂变质火山岩的构造属性并综合其它研究成果以及前人模式的合理成分, 我们将上述两种模式统一起来构筑一个新的模式来解释西昆仑早古生代构造演化。首先, 在震旦纪时期, 在塔里木与冈瓦纳之间产

① 新疆地质矿产局第二地质大队. 1985. 新疆南疆西南部地质图、矿产图 (1/500,000) 说明书。

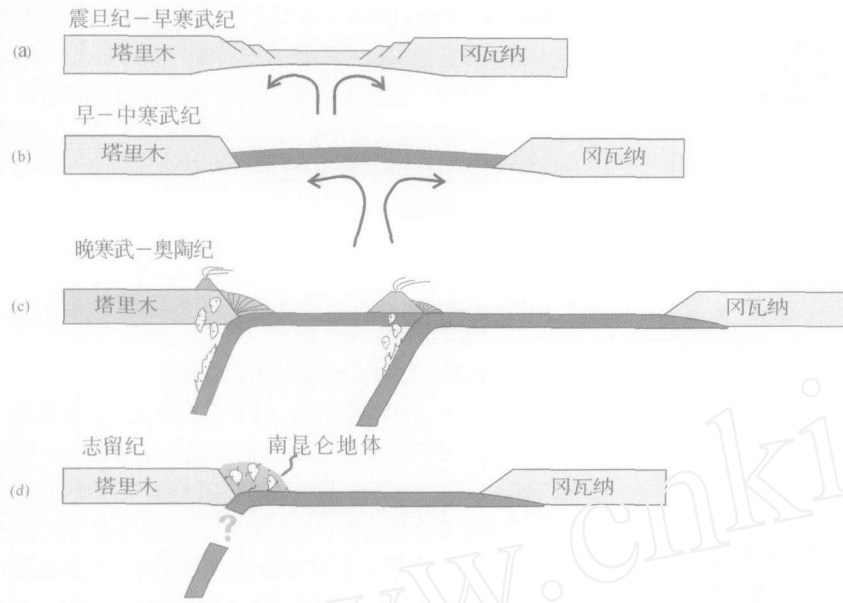


图9 西昆仑晚元古-早古生代构造演化简图

Fig.9 Schematic diagram showing the tectonic evolution of the West Kunlun range from the Late Proterozoic to the Early Paleozoic

生破裂并沿塔里木南缘形成了一系列裂谷型火山活动,其中包括在西昆仑阿卡孜达坂,东昆仑乃至北祁连等地的火山岩(图9a)。随裂解的进行,在塔里木和冈瓦纳之间形成了一个洋盆,相当于原特提斯(潘裕生等,1994)(图9b)。当洋盆演化到一定的阶段,大洋板块开始沿塔里木南缘消减并形成一些安第斯型的岩浆活动(姜耀辉等,1999;袁超等,2003)。此外,在洋内也产生消减并在晚寒武纪形成了以库地蛇绿岩和依莎克群为代表的消减系统(Wang *et al.*, 2002; 肖序常等,2003)。同时随消减活动的进行,沿塔里木南缘产生了大量的增生杂岩和弧岩浆活动(图9c)。随大洋板块的消减,洋内岛弧在奥陶纪末拼贴到塔里木南缘,这一弧陆碰撞过程造成了增生杂岩的变质变形并引发区域抬升,导致志留纪地层在本区的缺失(潘裕生等,1994)。南昆仑地体变质杂岩中角闪石和黑云母的 Ar-Ar 年龄主要集中于 426 ~ 451 Ma (周辉,1998),表明其变质变形的主要时间与由于弧陆碰撞引起的挤压变形基本同时。早泥盆纪时,由弧陆碰撞引起的造山作用基本结束,标志是区内出现碰撞后花岗岩浆活动以及同时代的基性岩脉(周辉,1998;袁超等,2000;姜耀辉等,2001),表明此时区内的应力机制已由碰撞引起的挤压转为伸展拉张。在这一拉张机制的主导下,区内的弧岩浆活动出现了一个平静期。在这一时期,东西昆仑,祁连甚至北帕米尔地区都缺少相应的弧岩浆活动和热事件(Debon, 1987; 古凤宝等, 1996; Liu *et al.*, 2000),表明这一弧岩浆平静期出现在相当大的区域范围(图9d)(Yuan *et al.*, 2002)。这一岩浆平静期一直延续到早二叠时期古特提斯洋开始消减于南昆仑地体之下(潘裕生等, 1994)。

8 结论

阿卡孜达坂变质火山岩的原岩为一套高钛的拉斑玄武岩,具有板内玄武岩和与消减有关玄武岩之间的过渡特征。多数样品相对富集轻稀土并具有不同程度的富铈异常排除了其原岩形成于洋中脊,板内海山,洋岛和大洋台地的可能性。同时,较高的 Zr/Y, Ta/Yb, 和较低的 Zr/Nb 比值显示出强烈的大陆亲缘性,明显不同于岛弧拉斑玄武岩。变质火山岩的板内特征和存在 Nb 正异常的,具 E-MORB 特征的样品表明阿卡孜达坂变质火山岩的原岩最可能形成于受地壳物质混染的大陆裂谷环境。阿卡孜达坂的变质火山岩与较早前在东昆仑和北祁连发现的的同时代的,类似性质的变质火山岩一起,表明在震旦纪塔里木南缘曾经发生过一次重要的裂解事件,可能导致了塔里木克拉通与冈瓦纳大陆的分。

致谢 在本研究进行的过程中,李继亮,潘裕生,许荣华和张玉泉研究员给予作者热情的鼓励和帮助。B. F. Windley, N. T. Arndt 和 P. Black 教授提出了一些启发性的建议,使作者受益良多,在此深表感谢。侯泉林,肖文交,王志宏,方爱民,陈汉林和张国成参与了野外工作并与作者就有关问题进行了广泛的讨论。

References

- Arnaud N., & Vidal Ph. 1990. Geochronology and geochemistry of the magmatic rocks from the Kunlun-Karakorum geotraverse. Colloque Kunlun-Karakorum, I. G. P. Paris, 52
- Arndt N T, Czamanske G K, Wooden J L & Fedorenko V A. 1993. Mantle and crustal contributions to continental flood volcanism.

- Tectonophysics, 223: 39–52
- Cadman, A. C., Tarney, J. & Baragar, W. R. A. 1995. Nature of mantle source contributions and the role of contamination and in situ crystallization in the Petrogenesis of Proterozoic mafic dykes and flood basalts, Labrador. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 122, 213–229
- Chang, C. F., Chen, N. S., Coward, M. P., Deng, W. M., Dewey, J. F., Gansser, A., Harris, N. B., Jin, C. W., Kidd, W. S. F., Leeder, M. R., Li, H. A., Lin, J. L., Liu, C. J., Mei, H. J., Molnar, P., Pan, Y., Pan, Y. S., Pearce, J. A., Shackleton, R. M., Smith, A. B., Sun, Y. Y., Ward, M., Watts, D. R., Xu, J. T., Xu, R. H., Yin, J. X. & Zhang, Y. Q. 1986. Preliminary conclusions of the Royal Society and Academia Sinica 1985 geotraverse of Tibet. *Nature*, 323, 501–507
- Clague, D. A. & Dalrymple G. B., 1987. The Hawaiian-Emperor volcanic chain, Part I. Geological evolution. In Decker, R. W., Wright, T. & Stauffer, P. H. (eds) *Volcanism in Hawaii: U. S. geological Survey Professional Paper*, 1350, 5–54
- Condie, K. C. 1989. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: Identification and significance. *Lithos*, 23, 1–18
- Cox, K. G. & Hawkesworth, C. J. 1985. Geochemical stratigraphy of the Deccan Traps, at Mahabaleshwar, Western Ghats, India, with implications for open system magmatic processes. *Journal of Petrology*, 26, 355–377
- Debon F., Afzali H., Le Fort P. and Somet J., 1987. Major intrusive stages in Afghanistan: Typology, age, and geodynamic setting. *Geologische Rundschau*, v. 76: 245–264
- Deng, W. 1989. A preliminary study on the basic-ultrabasic rocks of the Karakorum-western Kunlun Mts. *Journal of Natural Resources*, 4, 204–211. (in Chinese with English Abstract)
- Dewey, J. F., Shackleton, R. M., Chang, C. F. & Sun, Y. Y. 1988. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, 327, 379–413
- Ding, D., Shan, X. & Zhang, Y. 1996. The basin prototype and sedimentary-tectonic subdivision of South Tarim and West Kunlun Orogens. In: Ding, D., Wang, D., Liu, W. & Sun, S. (eds) *The Western Kunlun orogenic belt and Basin*. Geological Publishing House, Beijing, China, 9–35. (In Chinese, with English summary)
- Dupuy, C. & Dostal, J. 1984. Trace element geochemistry of some continental tholeiites. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 67, 61–69
- Flower, M. 1991. Magmatic processes in oceanic ridge and intraplate settings. In: Floyd, P. A. (ed.), *Oceanic Basalts*. Blackie (Glasgow & London) & Van Norstrand Reinhold (New York), 116–147
- Floyd, P. 1989. Geochemical features of intraplate oceanic plateau basalts. In: Saunders, A. D. & Norry, M. J. (eds) *Magnetism in the Ocean Basin*. Geological Society Special Publication, 42, 215–230
- Floyd, P. 1991. Oceanic islands and seamounts. In: Floyd, P. A. (ed.), *Oceanic Basalts*. Blackie (Glasgow & London) & Van Norstrand Reinhold (New York), 174–218
- Gu F., Wu X., Jiang C., 1996. Assemblages and tectonic environment of Variscan-Indosinian granitoid in the Eastern Kunlun. *Qinghai Geology*, no. 1, p. 18–36. (in Chinese with English abstract)
- Hs, K. J., Pan, G., Seng r, A. M. C., Briegel, U., Chen, H., Chen, C., Harris, N., Hs, P., Li, J., Luo, J., Lee, T., Li, Z. X., Lu, C., Powell, C., Wang, Q. & Winterer, E. L. 1995. Tectonic evolution of the Tibetan Plateau: a Working Hypothesis based on the archipelago model of orogenesis. *International Geology Review*, 37, 473–508
- Jiang Y. H., Rui X. J., He J. R., Guo K. Y. and Yang W. Z., 1999. Tectonic type of Caledonian granitoids and tectonic significance in the West Kunlun Mts. *Acta Petrologica Sinica*, 15 (1): 105–115. (In Chinese with English abstract)
- Jiang, C. F., Wang, Z. Q. & Li, J. Y. 2000. Opening-closure tectonics of Chinese central orogenic belt. Geological Publishing House, Beijing, 1–153. (In Chinese with English Abstract)
- Kamenetsky, V. S., Crawford, A. J., Eggins, S. & M he, R., 1997. Phenocryst and melt inclusion chemistry of near axis seamounts, Valu Fa Ridge, Lao Basin: insight into mantle wedge melting and the addition of subduction components. *Earth and Planetary Science Letters*, 151, 205–223
- Li, J., Sun, S., Hao, J., Chen, H., Hou, Q. & Xiao, W. 1999. On the classification of collision orogenic belts. *Scientia Geologica Sinica*, 34, 129–138. (in Chinese with English Abstract)
- Li, Y. P., Li, Y. A., Sharps, R., McWilliams, M., & Gao, Z. J. 1991. Siniian palaeomagnetic results from the Tarim block, western China. *Precambrian Research*, 49, 61–67
- Li, Z. X. 1998. Tectonic history of the major East Asian lithospheric blocks since the Mid-Proterozoic - A synthesis. In: Flower, M. F. J., Chung, S. L., Lo, C. H. & Lee, T. Y. (eds) *Mantle dynamics and plate interactions in East Asia*. *Geodynamics Series* 27. American Geophysical Union, 221–243
- Li, Z. X., Zhang, L. & Powell, C. McA. 1996. Positions of the East Asian craton in the Neoproterozoic supercontinent Rodinia. *Australian Journal of Earth Sciences* 43, 593–604
- Lightfoot, P. C. 1993. The interpretation of geoanalytical data. In: Riddle, C. (ed.) *Analysis of Geological Materials*. Marcel Dekker, Inc. New York, 377–455
- Liu Y., Jenser G., Franz N., Jin W., Ge X. and Robert H., 2000. Geochronology of ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating in the basement rocks in East Kunlun Shan and its tectonic implications. *Earth Science Frontiers*, Vol. 7, Suppl. (abstract volume of 15th HKT workshop), p. 227
- Mahoney, J. J. 1988. Deccan traps. In: Macdougall, J. D. (ed.) *Continental flood Basalts*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 151–194
- Mao, J., Zhang, Z., Yang, J., Song, B., Wu, M. & Zuo, G. 1998. Single-zircon dating of Precambrian strata in the west sector of the northern Qilian Mountains and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 43, 1289–11294
- Matte, Ph., Tapponnier, P., Arnaud N., Bourjot L., Avouac, Vidal Ph., Liu Q., Pan Y. S. & Wang Y. 1996. Tectonics of Western Tibet, between the Tarim and the Indus. *Earth and Planetary Science Letters*, 142, 311–330
- Mattern, F. & Schneider, W. 2000. Suturing of the Proto-and Paleotethys oceans in the western Kunlun (Xinjiang, China). *Journal of Asian Earth Sciences*, 18, 637–650
- Mattern, F., Schneider, W., Li Y. & Li X. 1996. A traverse through the western Kunlun (Xinjiang, China): tentative geodynamic implications for the Paleozoic and Mesozoic. *Geologische Rundschau*, 85, 705–722
- McCulloch, E. M. & Gamble, J. A. 1991. Geochemical and Geodynamic constraints on subduction magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 102, 358–374
- Metcalfe, I. 1996. Gondwanaland dispersion, Asian accretion and evolution of eastern Tethys. *Australia Journal of Earth Sciences*, 43, 605–623
- Mouler, P., Burchfiel, B. C., Zhao, Z., Liang, K., Wang, S. & Huang, M. 1987. Geological evolution of northern Tibet: results of an Expedition to Uluh Muztagh. *Science*, 235, 299–304
- Pan, Y. S., Wang, Y., Matte, Ph. & Tapponnier, P. 1994. Tectonic evolution along the geotraverse from Yecheng to Shiquanhe. *Acta Geologica Sinica*, 68, 295–307. (In Chinese with English Abstract)
- Pan, Y., Zhou, W., Xu, R., Wang, D., Zhang, Y., Xie, Y., Chen, T. & Luo, H. 1996. Early Paleozoic geological characteristics and tectonic evolution. *Science in China (series D)*, 26, 302–307. (in Chinese)
- Pearce, J. A. & Cann, J. R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19, 290–300
- Pearce, J. A. & Parkinson, I. J. 1993. Trace element models for mantle melting: application to volcanic arc petrogenesis. In: Prichard, H.

- M., Alabaster, T., Harris, N. B. W. & Neary, C. R. (eds), *Magma Processes and Plate Tectonics*, Geological Society Special Publication, 76, 373-403
- Pearce, J. A. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth, C. J. & Norry, M. J. (eds) *Continental basalts and mantle xenoliths*. Shiva, Nantwich, 230-249
- Saunders, A. & Tarney, J. 1991. Back-arc basins. In: Floyd, P. A. (ed.) *Oceanic Basalts*. Blackie (Glasgow & London) & Van Nostrand Reinhold (New York), 219-263
- Sengör, A. M. C. & Natal'in, B. A. 1996. Paleotectonics of Asia: fragments of a synthesis. In: Yin, A. & Harrison, T. M. (eds) *The Tectonic evolution of Asia*. Cambridge University Press, 486-640
- Stampfli, G. M. & Borel, G. D. 2002. A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrones. *Earth and Planetary Science Letters*, 196, 17-33
- Sun, S.-s. & McDonough, W. F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A. D. & Norry, M. J. (eds) *Magma Processes in the Ocean Basin*, Geological Society Special Publication. Blackwell Scientific Publications 42, 313-345
- Tatsumi, Y. & Eggins, S. 1995. *Subduction Zone Magmatism*. Blackwell Science, 50-99
- Taylor, S. R. & McLellan, S. M. 1985. *The continental crust: its composition and evolution*. Blackwell, Oxford
- Thirlwall, M. F., Smith, T. E., Graham, A. M., Theodorou, N., Hollings, P., Davidson, J. P. & Arculus, R. J. 1994. High field strength element anomalies in arc lavas: source or process? *Journal of Petrology*, 35, 819-838
- Wen, S., Sun, D., Yin, J., Chen, T. & Luo, H. 2000. Stratigraphy and Paleontology. In: Pan, Y. (ed.) *Geological Evolution of the Karakorum and Kunlun Mountains*. Science Press, Beijing, 6-92. (in Chinese)
- Williams, H., Turner, F. J. & Gilbert, C. M. 1989. *Petrography An introduction to the study of rocks in thin sections (second edition)*. W. H. Freeman and Company, San Francisco, 533-535
- Wilson, M. 1989. *Igneous Petrogenesis*. Unwin Hyman, London, 99-374
- Winchester, J. A. & Floyd, P. A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20, 325-343
- XGJT-II 1985. Stratigraphy, 1/500,000 geological map and explanation of Southwestern Xinjiang, China, p. 14-250. Geological Publishing House, Beijing
- Xia, L., Xia, Z., Zhao, J., Xu, X., Yang, H. & Zhao, D. 1999. Determination of properties of Proterozoic continental flood basalts of western part from North Qilian Mountains. *Science in China (Series D)*, 42, 506-514
- Xia, Z., Xia, L. & Xu, X. 1996. The Late Proterozoic Cambrian active continental rift volcanism in northern Qilian mountains. *Acta Geoscientia Sinica*, 17, 282-291. (in Chinese with English Abstract)
- Xiao X. C., Wang J., Su L., and Song S. G., 2003. A further discussion of the K da ophiolite, West Kunlun, and its tectonic significance. *Geological Bulletin of China*, vol. 22 (10): 645-750. (in Chinese with English abstract)
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Hao, J. & Li, J. L. 2002. Arc-ophiolite obduction in the Western Kunlun Range (China): implications for the Paleozoic evolution of central Asia. *Journal of the Geological Society, London*, 159, 517-528
- Xu, R., Zhang, Y., Xie, Y., Chen, F., Vidal, Ph., Arnaud, N., Zhang, Q. & Zhao D. 1994. A discovery of an early Palaeozoic tectono-magmatic belt in the Northern part of west Kunlun Shan. *Scientia Geologica Sinica*, 29, 313-328. (in Chinese with English Abstract)
- Yang, J. S., Robinson, R. T., Jiang, C. F. & Xu, Z. Q. 1996. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implications. *Tectonophysics* 258, 215-231
- Yao, Y. & Hs, K. J. 1994. Origin of the Kunlun Mountains by arc-arc and arc-continent collisions. *The Island Arc*, 3, 75-89
- Yin, A. and Harrison, T. M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 28, 211-280
- Yuan, C., Sun, M., Zhou, M. F., Zhou H., Xiao, W. J. & Li, J. I. 2002. Tectonic evolution of the West Kunlun: Geochronologic and geochemical constraints from Kudi Granitoids. *International Geology Review*, 44, 653-669
- Yuan, C., Sun, M., Zhou, M. F., Zhou, H., Xiao, W. J. & Li, J. L. 2003. Absence of Archean basement in the South Kunlun Block: Nd-Sr-O isotopic evidence from granitoids. *The Island Arc*, 12, 13-21
- Zhao, X., Coe, R. S., Güder, S. A. & Frost, G. M. 1996. Paleomagnetic constraints on the palaeogeography of China: implications for Gondwana. *Australia Journal of Earth Sciences* 43, 643-672
- Zhou, H. 1998. The main ductile shear zone and the lithosphere effective elastic thickness of west Kunlun orogenic belt. (Ph. D thesis, Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China) (in Chinese with English abstract)
- Zolotukhin, V. V. & Al'mukhamedov, A. I. 1988. Traps of the Siberian Platform. In: Macdougall, J. D. (ed.) *Continental Flood Basalts*, 273-310. Kluwer Academic Publishers, Netherlands
- Zuo, G., Wu, M., Mao, J. & Zhang, Z. 1999. Structural evolution of Early Paleozoic tectonic belt in the west section of northern Qilian area. *Acta Geologica Gansu* 8, 6-13. (in Chinese with English Abstract)

附中文参考文献

- 邓万明, 1989. 喀喇昆仑-西昆仑地区基性-超基性岩初步考察. *自然资源学报*, No. 4 (3): 204-211
- 丁道桂, 1996. 塔里木盆地南部与西昆仑造山带的形成与演化. 丁道桂, 王道轩, 刘伟新, 孙世群 等著: 西昆仑造山带与盆地. 北京: 地质出版社. 201-207
- 古凤宝, 吴向农, 姜常义. 1996. 东昆仑花岗岩岩石组合及其构造环境. *青海地质*, (2): 13-24
- 姜春发, 王宗起, 李锦轶, 2000. 中央造山带开合构造. *地质出版社*, 北京, 1-153
- 姜耀辉, 芮行健, 贺菊瑞, 郭坤一, 杨万志. 1999. 西昆仑山加里东期花岗岩类构造的类型及其大地构造意义. *岩石学报*, 15(1): 105-115
- 李继亮, 孙枢, 郝杰, 陈海泓, 侯泉林, 肖文交. 1999. 论碰撞造山带的分类. *地质科学*, 34 (2): 129-138
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. *地球化学*, 25 (6): 552-558
- 潘裕生, 王毅, Matte Ph, Tapponnier P. 1994. 青藏高原叶城-狮泉河路线地质特征及区域构造演化. *地质学报*, 68(4): 295-307
- 潘裕生, 周伟明, 许荣华, 王东安, 张玉泉, 谢应雯, 陈挺恩, 罗辉. 1996. 昆仑山早古生代地质特征与演化. *中国科学 (D 辑)*, 26: 302-307
- 文世宣, 孙东立, 尹集祥, 陈挺恩, 罗辉. 2000. 地层. 潘裕生(主编): 喀喇昆仑-昆仑山地区地质演化. 科学出版社, pp. 6-92
- 夏祖春, 夏林圻, 徐学义, 1996. 北祁连山元古宙末-寒武纪主动大陆裂谷火山作用. 17: 282-291
- 肖序常, 王军, 苏犁, 宋述光, 2003. 再论西昆仑库地蛇绿岩及其构造意义. 22 (10): 645-750
- 许荣华, 张玉泉, 谢应雯, 陈福坤, Ph. Vidal, N. Arnaud, 1994. 西昆仑山北部早古生代构造-岩浆带的发现. *地质科学*, 29 (4): 313-327
- 周辉, 1998. 西昆仑库地主剪切带动力学及岩石圈有效弹性厚度探讨. *中国科学院地质学研究所博士学位论文*, pp. 23-43
- 左国朝, 吴茂炳, 毛景文, 张招崇, 1999. 北祁连山早古生代构造演化史. *甘肃地质*, 8: 6-13.