

西南天山阿克苏地区中元古代变质岩的 地球化学特征及其构造背景

齐秋菊, 张招崇, 董书云, 张东阳, 黄河, 张舒, 马乐天

(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)

摘要:新疆西南天山阿克苏地区发育长城纪阿克苏群变质岩。在野外观察的基础上,根据详细的显微观察结果,结合地球化学特征,认为阿克苏群片麻岩及角闪片岩的原岩为酸性火山岩及基性岩,云母片岩的原岩为杂砂岩。岩石化学判别结果表明,片麻岩及角闪片岩属钙碱性系列,轻稀土元素明显富集,重稀土元素相对平坦,轻、重稀土元素分馏较强。构造环境判别图显示这些火山岩具有弧火山岩的特征,从而认为其是与俯冲作用相关的陆缘火山弧环境的产物。同期沉积的变质沉积岩构造环境判别也证实了这一论断。结合区域地质背景认为阿克苏群变质岩总体为陆缘火山弧-弧后盆地环境,可能与全球哥伦比亚超大陆形成事件有关。

关键词:西南天山, 变质岩, 原岩恢复, 地球化学, 构造背景

中图分类号: P588.34; P588.37

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)02-0172-13

Geochemical characteristics and tectonic setting of Mesoproterozoic metamorphic rocks in Aksu area, Southwestern Tianshan Mountains

QI Qiu-ju, ZHANG Zhao-chong, DONG Shu-yun, ZHANG Dong-yang, HUANG He, ZHANG Shu and MA Le-tian

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

Abstract: Metamorphic rocks of the Mesoproterozoic Aksu Group are developed in Aksu area, southwestern Tianshan Mountains. Based on detailed field and petrographic observation as well as geochemical investigation, the authors hold that the protoliths of the gneiss and the hornblende schist are felsic volcanic rocks and mafic rocks respectively, whereas the protoliths of mica schist are graywacke. Chemical components of the gneiss indicate that SiO_2 and Al_2O_3 content of the samples varies from 72.36% to 74.6% and from 12.28% to 13.55%, respectively. TiO_2 , Fe_2O_3 , FeO , MnO , MgO and CaO content is obviously low: $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.44\% \sim 1.2\%$, $\text{FeO} = 0.68\% \sim 1.74\%$, $\text{MgO} = 0.23\% \sim 1.17\%$, and $\text{CaO} = 0.41\% \sim 1.31\%$. Chemical components of the hornblende schist suggest that TiO_2 , TFe_2O_3 , MgO and CaO content is obviously high: $\text{TiO}_2 = 2.27\%$, $\text{TFe}_2\text{O}_3 = 15.79\%$, $\text{MgO} = 5.77\%$, and $\text{CaO} = 7.75\%$, but SiO_2 and Al_2O_3 content of the sample is only 49.88% and 12.9% respectively. Compared with PASS, mafic rocks are rich in SiO_2 and Na_2O (varying from 61.51% ~ 75.53% and 1.33% ~ 4.38%, 69.16% and 2.91% on average respectively), but poor in Al_2O_3 , TFe_2O_3 , MgO and CaO . The petrological and chemical characteristics of the gneiss and hornblende schist suggest that the rocks are of calc-alkaline series, with σ from 1.8 to 2.3, and the chondrite-normalized REE patterns are all characterized significant enrichment of light rare elements, with no significant fractionation of heavy rare earth elements. In the

收稿日期: 2009-06-02; 修订日期: 2010-12-15

基金项目: 国家科技支撑项目(2007BAB25B05); 111计划(B07011); 教育部创新团队计划资助项目

作者简介: 齐秋菊(1983-), 女, 汉, 硕士研究生, 岩石学专业. E-mail: qqju0816@163.com; 通讯作者: 张招崇, 教授, 博士生导师, 从事火成岩岩石学和金属矿床的研究, E-mail: zczhang@cugb.edu.cn.

by si MORB normalized multi-element variation diagram, multi-element variations show relative concentration of K, Rb, Th, evident depletion of Ti, Nd, Ta, and clear negative P anomalies. The chondrite-normalized and PASS-normalized REE patterns of the mica schist are similar to patterns of active continental margin and continental arc greywacke. All the gneiss samples are plotted in the field defined by volcanic arc granites in geochemical-tectonic discrimination diagrams, which suggest that they were formed in a continental volcanic arc closely related to the subduction zone. This conclusion is also supported by the geochemical-tectonic discrimination diagrams of the simultaneously-deposited metamorphic sedimentary rocks. In both La-Th-Sc and Th-Sc-Zr/10 discrimination diagrams, almost all of the samples are plotted in the continental arc. Chemical characteristics of the mica schist suggest that it was formed in a sedimentary environment related to continental island arcs, such as back arc basin. Combined with regional background, all these characteristics suggest that metamorphic rocks in the Aksu Group were formed in a continental volcanic arc-back arc basin and might have been related to a global supercontinent Columbia event.

Key words: Southwestern Tianshan; metamorphic rocks; protolith reconstruction; geochemistry; tectonic setting

阿克苏群(亦有人称之为木扎尔特群)是西南天山地区最古老的地层,主要分布于阿克然他乌、阿克苏、木扎尔特峰南麓等 3 个地区。前人利用不同方法对阿克苏群高压变质作用发生时代进行了年代学测试,但高压变质作用形成的确切时代目前尚无可靠的年龄约束。前人获得的不同结果有:熊纪斌等(1986)测得全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $1\ 720 \sim 1\ 907\ \text{Ma}$,其多硅白云母 Rb-Sr 等时线年龄为 $720\ \text{Ma}$ (肖序常等,1991);Nakajima 等(1990)测得多硅白云母 K-Ar 年龄为 $718 \pm 22\ \text{Ma}$ 和 $710 \pm 21\ \text{Ma}$,其 Rb-Sr 等时线年龄为 $698 \pm 26\ \text{Ma}$ 、 $714 \pm 21\ \text{Ma}$ 。高振家(1993)测得全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $944 \sim 962\ \text{Ma}$,其青铝闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄 $754\ \text{Ma}$ (Liou *et al.*, 1996);胡霏琴(1997)测得全岩 Pb-Pb 法等时线年龄 $1\ 663\ \text{Ma}$ 及青铝闪石和蓝闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 $872 \sim 862\ \text{Ma}$ 。阿克苏蓝片岩高压变质作用的峰期年龄应大于 $862\ \text{Ma}$ (Chen *et al.*, 2004)。阿克苏群变质原岩形成时代应早于变质作用发生时代,目前多数学者认为阿克苏群变质岩的形成时代可能为中元古代。陈义兵等(2000)测定了南木扎尔特河的塔列克阔地区花岗片麻岩的结晶锆石表面年龄为 $707 \pm 13\ \text{Ma}$ 。但是笔者的野外观察表明,花岗片麻岩(或片麻状花岗岩)侵入于该群地层中,属于后期的侵入岩,阿克苏群的地层应该老于该年龄,而且该年龄也与笔者最新 LA-ICP-MS-Pb 锆石年龄在误差范围内一致(未发表数据)。

阿克苏蓝片岩是世界上最古老的蓝片岩带之一(Liou *et al.*, 1996)。阿克苏地区发育的前寒武纪蓝片岩、基性岩墙和火山岩,是研究新元古代塔里木

板块构造演化乃至全球前寒武纪地质历史和超大陆循环过程的宝贵地质证据,并且覆于阿克苏群之上的大陆拉斑玄武岩是新元古代($830 \sim 750\ \text{Ma}$)地幔柱活动和 Rodinia 超大陆裂解的直接证据(王飞等, 2010)。黄文涛等(2009)对阿克苏群蓝片岩中的多硅白云母进行了温度压力计算,得到南部压力大于北部的结论,认为阿克苏蓝片岩是由于古大洋板块向南俯冲于古塔里木克拉通之下而形成的。一些学者利用磷灰石裂变径迹方法对阿克苏群蓝片岩进行构造-热演化史讨论(张志勇等, 2008; Zhu *et al.*, 2009),认为阿克苏蓝片岩形成后快速折返至地表,可能在整个早震旦世一直遭受剥蚀,到晚震旦世才重新开始接受沉积、埋藏,晚震旦世地层基本保持连续,整个古生代也仅缺失中上志留统和中下石炭统,至古生代末,早震旦世和整个古生代地层厚度已近万米。其间,蓝片岩完全退火,年龄被重置。中生代晚期区内地层普遍开始隆升,裂变径迹时钟重新开始计时;古新世开始有沉积作用发生,样品接受埋藏增温至部分退火带,随后可能由于印度-欧亚板块碰撞的远程效应,中新世地层重新开始隆升剥露。但是,对于阿克苏群变质岩的原岩是什么,目前争议较大,蔡士赐(1999)认为该群为变沉积碎屑岩组合,高振家(1993)认为该群原岩为偏基性火山岩和偏酸性火山岩,也有些学者认为该群原岩为中元古代岛弧火山岩系列和碎屑岩(Nakajima *et al.*, 1990; Liou *et al.*, 1996)。目前还没有利用地球化学数据对阿克苏群做过详细的原岩恢复工作,本文拟通过对阿克苏群变质岩地球化学特征的研究,探讨这套岩石的变质原岩、成因及形成环境,旨在为南

天山地区前寒武纪的大地构造背景提供约束。

1 地质概况

研究区处于塔里木板块西北缘及南天山华力西造山带西南段南缘(图1),受费尔干纳右旋走滑断裂及南北向挤压应力的共同作用,西部东阿赖地区总体构造线呈北北东向,托云地区呈北西向,阔克萨勒岭地区、迈丹-库阿特地区、柯坪地区呈北东-北东东向,其间夹有苏鲁克列、阿克苏及木扎特3个元古宙

地块(均属塔里木板块)。

区域上长城系阿克苏群分布于木扎尔特河至铁列克河一带,为本区出露的最古老地层。依其岩性、岩相可分为上、下两个亚群。阿克苏下亚群主要分布于木扎尔特河北部一带,下界不明,其上与阿克苏群上亚群呈整合接触,与上石炭统康克林组、喀拉治尔加组呈不整合接触,变质程度达到低压角闪岩相,并有混合岩化作用,属中级区域变质作用。岩性主要表现为黑云母长英片麻岩、含石榴石黑云母长英片麻岩、黑云母钾长片麻岩、二云母钾长片麻岩、含石

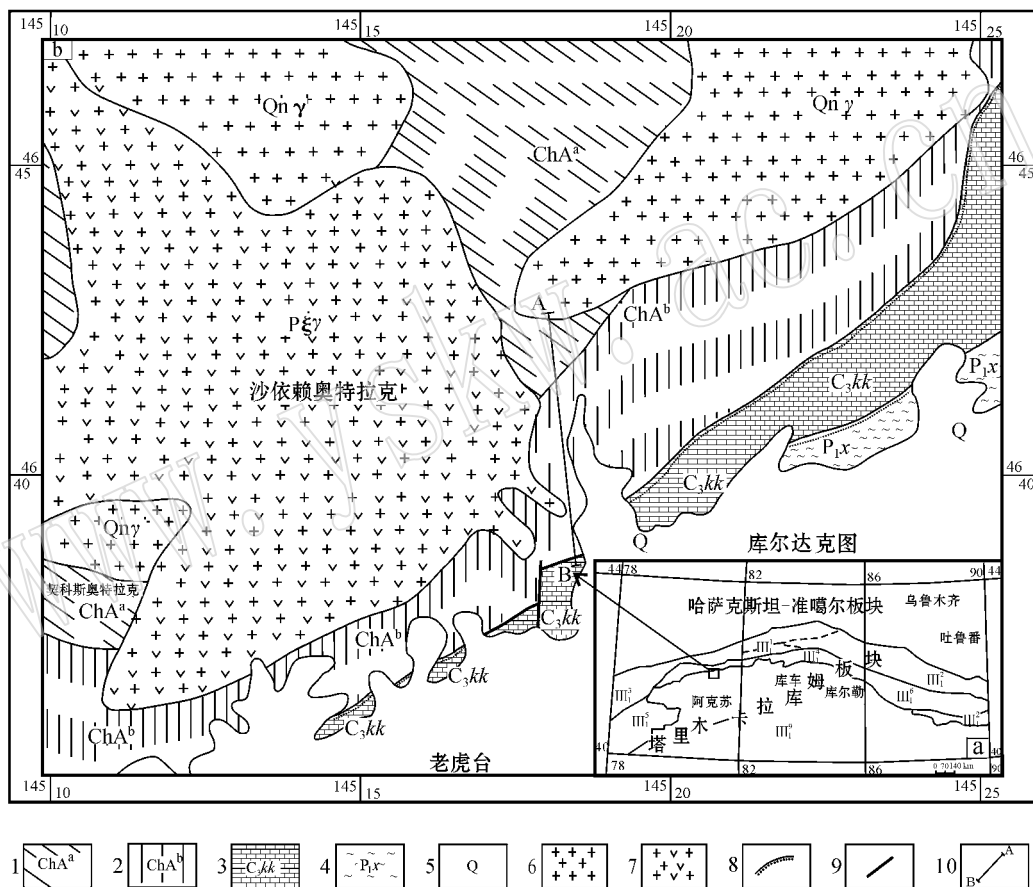


图1 新疆构造单元划分(a)和新疆阿克苏老虎台地区地质简图(b) [据新疆地质矿产局第八地质大队(2007)修改]

Fig. 1 Division of tectonic units in Xinjiang (a) and regional geological map (b) of Laohutai area of Aksu in Xinjiang (after No. 8 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, unpublished)

(a) III—塔里木-卡拉库姆板块; III₁—塔里木微板块; III₁—东阿莱-哈尔克古生代复合沟弧带; III₂—艾尔宾晚古生代残留盆地; III₃—麦兹-阔克塔勒晚古生代陆缘盆地; III₄—虎拉山晚古生代裂陷槽; III₅—柯坪前陆盆地; III₆—库鲁克塔格陆缘地块; III₈—塔里木中央地块;
(b) 1—长城系阿克苏下亚群; 2—长城系阿克苏上亚群; 3—上石炭统康克林组; 4—下二叠统小堤坎里克组; 5—第四系; 6—青白口纪花岗岩; 7—二叠纪钾长花岗岩; 8—不整合接触; 9—断层; 10—剖面位置

(a) III—Tarim-Karakum Plate; III₁—Tarim micro-plate; III₁—Dongalai-Haerke Paleozoic complex trench-arc zone; III₂—Aierbin late Paleozoic residues ramp basin; III₃—Maici-Kuoketale late Paleozoic shelf basin; III₄—Hulashan late Paleozoic rift trough; III₅—Keping foreland basin; III₆—Kuluketage shelf block; III₈—Tarim central block; (b) 1—Aksu upper subgroup of Changchengian System; 2—Aksu lower subgroup of Changchengian System; 3—Upper Carboniferous Kangkelin Formation; 4—Lower Permian Xiaodikanlike Formation; 5—Quaternary; 6—granites of Qingbaikouan System; 7—Carboniferous K-feldspar granite; 8—unconformable; 9—fault; 10—location of geological section

榴石二云母钾长片麻岩、二长片麻岩、二云母二长片麻岩、含石榴石二长片麻岩、夹少量含石榴石角闪钾长片麻岩、二云母斜长片麻岩、长石石英浅粒岩、白云母石英浅粒岩、黑云母石英斜长浅粒岩、白云母石英二长浅粒岩、绿黝帘石钾长变粒岩、角闪钾长变粒岩。阿克苏上亚群分布于木扎尔特河至铁列克厄肯一带,呈近东西向展布,与下亚群为整合或断层接触,上石炭统康克林组直接超覆不整合其上。上亚群的变质程度只达到绿片岩相,属低级的区域变质

作用,下部岩性主要为黑云母长英片岩、二云母长英片岩、二云母石英片岩、斜长石英片岩,夹少量斜长角闪片岩;上部为石英千枚岩、绢云千枚岩、绢云石英千枚岩及少量绿泥石英千枚岩、绿泥绢云母千枚岩^①。

本次研究的阿克苏群地层剖面位于拜城县老虎台乡,该剖面长约 2.8 km,下部被青白口纪片麻状花岗岩体侵入(图 2),顶部被晚石炭世康克林组底部的变质石英砂岩不整合覆盖(图 2、图 3)。该地层剖面出露阿克苏群上下两个亚群,出露岩性有白云母二

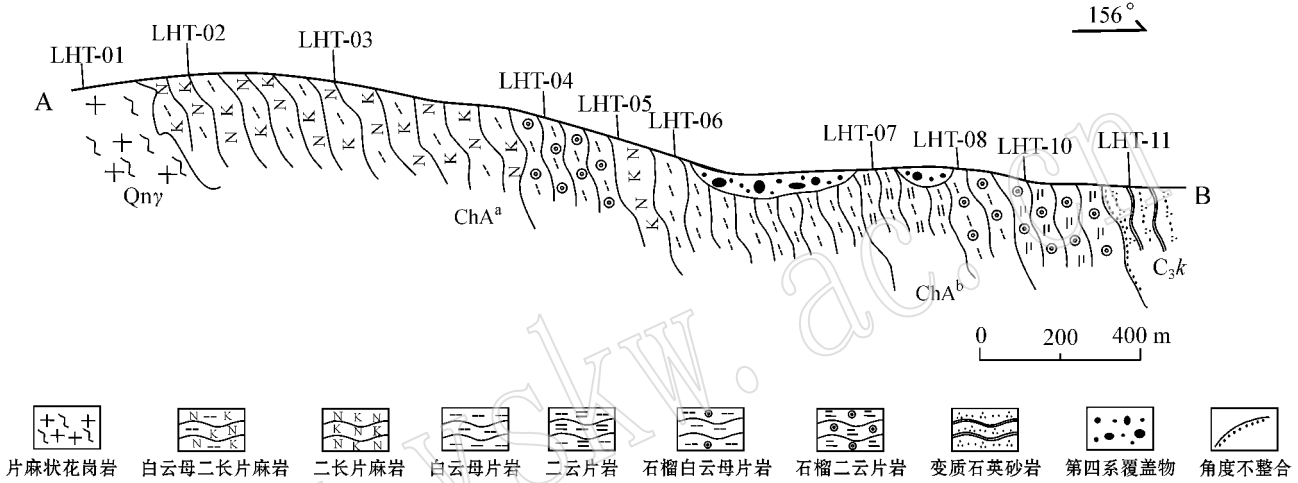


图 2 南天山阿克苏地区老虎台阿克苏群地层剖面图

Fig. 2 Geological section of Aksu Group of Aksu area, South Tianshan Mountains

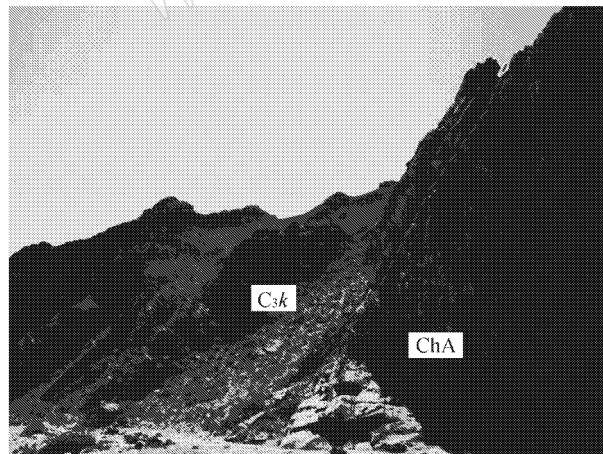


图 3 石炭系上统康克林组与阿克苏群不整合接触

Fig. 3 Angular unconformity between Upper Carboniferous Kangkelin Formation and Aksu Group
C_{3k}—康克林组; ChA—阿克苏群
C_{3k}—Kangkelin Formation; ChA—Aksu Group

长片麻岩、二长片麻岩、白云母片岩、二云母片岩、石榴白云母片岩、石榴二云母片岩,其中片麻岩属于阿克苏群下亚群,片岩属于阿克苏群上亚群。片麻岩片麻理产状 145°∠73°,片岩片理产状 185°∠85°。总厚度约为 1 500 m。各主要岩石类型的主要特征见表 1。

2 样品和分析方法

野外采集新鲜样品,采样位置如图 1 所示,主要岩性有片麻岩、云母片岩和角闪片岩。其中片麻岩为细-中粒鳞片粒状变晶结构,片麻状构造,主要组成矿物为斜长石+钾长石(50%~55%),石英(28%~30%),白云母(5%~15%),黑云母(3%~8%)及磁铁矿、磷灰石、锆石等,两种云母定向排列形成片麻理。样品中黑云母局部绿泥石化。角闪片岩镜下绿色,细粒纤状变晶结构,主要组成矿物为角闪石

① 西安地质矿产研究所. 2002. 西南天山地区矿产资源潜力评价.

表 1 阿克苏群岩石岩相学特征
Table 1 Petrofacies characteristics of Aksu Group

| 样品编号 | 岩石名称 | 岩石结构 | 主要及次要矿物百分含量/% | | | | | 副矿物及变质特征矿物 |
|--------|----------|--------------|---------------|-----|----|-----|-----|--------------------------|
| | | | 钾长石 | 斜长石 | 石英 | 白云母 | 黑云母 | |
| LHT-02 | 白云母二长片麻岩 | 细-中粒鳞片粒状变晶结构 | 23 | 30 | 30 | 10 | 5 | 阳起石、绿泥石、锆石、磷灰石 |
| LTH-03 | 白云母二长片麻岩 | 细-中粒鳞片粒状变晶结构 | 15 | 35 | 30 | 15 | 3 | 绿泥石、锆石、磷灰石 |
| LTH-04 | 石榴白云母片岩 | 细-中粒鳞片粒状变晶结构 | | 20 | 40 | 30 | 5 | 绿泥石、锆石、磷灰石、磁铁矿、石榴石、砂线石 |
| LHT-05 | 二长片麻岩 | 细-中粒鳞片粒状变晶结构 | 20 | 35 | 28 | 5 | 8 | 绿帘石、绿泥石、锆石、磁铁矿、磷灰石 |
| LHT-06 | 白云母片岩 | 细-中粒鳞片粒状变晶结构 | | 20 | 30 | 40 | 5 | 石榴石、砂线石、蓝晶石、绿泥石、磁铁矿、锆石 |
| LHT-07 | 二云片岩 | 细-中粒鳞片粒状变晶结构 | | 20 | 20 | 40 | 15 | 绿泥石、砂线石、磁铁矿、锆石 |
| LHT-08 | 石榴白云母片岩 | 细-中粒鳞片粒状变晶结构 | | 25 | 30 | 35 | 5 | 绿泥石、磁铁矿、石榴子石、锆石 |
| LHT-09 | 角闪片岩 | 细粒纤状变晶结构 | | 25 | | | | 70 绿帘石、绿泥石、磁铁矿、磷灰石、锆石 |
| LTH-10 | 石榴二云片岩 | 细-中粒鳞片粒状变晶结构 | 25 | 35 | 20 | 15 | | 石榴石、绿泥石、磷灰石、锆石 |

(70%)长石(25%)及磁铁矿(<5%),可见绿泥石、绿帘石特征变质矿物。云母片岩为白云母片岩及二云片岩,细-中粒鳞片变晶结构,片状构造,主要有组成矿物长石(20%~25%)、石英(20%~40%)、白云母(20%~40%)、黑云母(5%~15%)及磁铁矿、绿泥石、阳起石、石榴石、砂线石等组成,两种云母定向排列形成片理。样品中黑云母局部绿泥石化,部分样品出现少量毛发状的砂线石,在LHT-6、LHT-8、LHT-10中出现石榴石变质矿物。

采集的样品去皮后洗净烘干后在无污染条件下粉碎成200目。主量元素采用熔片法,在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室的PW 4400型X射线荧光光谱仪上分析,分析精度优于0.1%~1.0%,其中FeO含量用湿化学法测定,分析精度优于0.5%~1.0%。微量元素测定在该实验室的Finnigan MAT ELEMENT ICP-MS上完成,测试误差普遍小于10%,轻稀土等多数元素小于5%。

3 地球化学特征及原岩恢复

3.1 原岩恢复及分类

除伴有强烈交代作用的变质岩如各种交代蚀变岩和混合岩等外,所有变质岩都是特定原岩在相对封闭条件下经变质作用的产物,其成分变化基本上是等化学的,因而岩石化学和地球化学特征基本反

映原岩的特征,并主要受原岩形成作用和成岩构造环境所制约。本文在详细的薄片观察基础上,利用岩石化学和地球化学特征进行了原岩恢复。

西蒙南图解、K-A图解及DF指数($DF = -0.21 SiO_2 - 0.32 Fe_2O_3(\text{全铁}) - 0.98 MgO + 0.55 CaO + 1.46 Na_2O + 0.54 K_2O + 10.44$)判别法是最为常见且较为有效的变质岩原岩恢复方法(王仁民等,1987)。阿克苏群变质岩K-A图解及西蒙南图解原岩恢复结果如图4、图5所示。在K-A图解上,片麻岩及

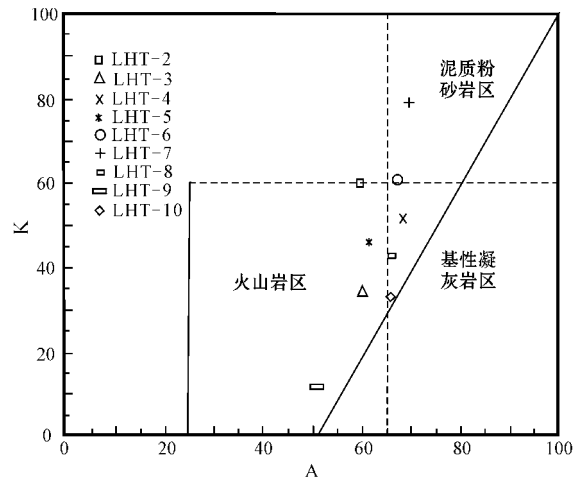


图 4 变质岩 K-A 图解(周世泰,1984)

Fig. 4 K versus A diagram of metamorphic rocks
(after Zhou Shitai, 1984)

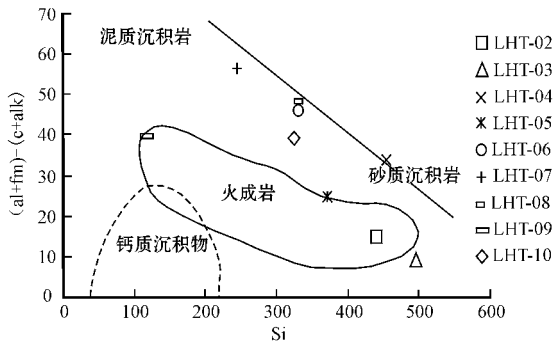


图 5 变质岩 $(al+fm)/(c+alk)$ -Si 西蒙南判别图解 (转引自王仁民等, 1987)

Fig. 5 $(al+fm)/(c+alk)$ versus Si diagram of metamorphic rocks (after Wang Renmin et al., 1987)

角闪片岩样品 LHT-2、LHT-3、LHT-5、LHT-9 落入火成岩区,DF 指数也为正值,为正变质岩,而 LHT-8 及 LHT-10 样品落在沉积岩与火山岩的边缘,并靠近火山岩,说明样品中还有火山岩的成分,其他样品落在沉积岩泥质粉砂岩区。西蒙南图解(图 5)进一步显示,LHT-2、LHT-5、LHT-9 样品落入沉积岩区,LHT-3 号样品落在沉积岩区但是较偏火山岩,且 DF 为正值,其他样品落入泥岩-砂岩区,且更偏泥质沉积岩。由图中点的分布及 DF 数值综合来看,LHT-2、LHT-3、LHT-5、LHT-9 为火山岩变质而成,属于正变质岩;其他点落在沉积岩区范围,为沉积岩经副变质作用变质而来。从岩性来看,片麻岩、角闪片岩原岩为火山岩,而云母片岩的原岩为沉积岩。因此,

阿克苏群变质岩的原岩不是单一的,而是由火山岩和沉积岩共同变质而形成,其中阿克苏群下亚群原岩为火山岩,阿克苏群上亚群原岩为火山岩及沉积岩。

对于正变质岩进一步划分,利用 Winchester 和 Floyd(1977)提出的不活动元素和 SiO_2 判别图(图 6)进行岩石判定,本文样品除 LHT-9 号样品落在亚碱性玄武岩区域外,其他基本落在流纹岩、流纹英安岩区域范围内,因此其原岩为偏酸性的火山岩和亚碱性玄武岩。对于副变质岩石进一步划分,米什金图解(图 7)判别结果表明阿克苏群变质沉积岩的原

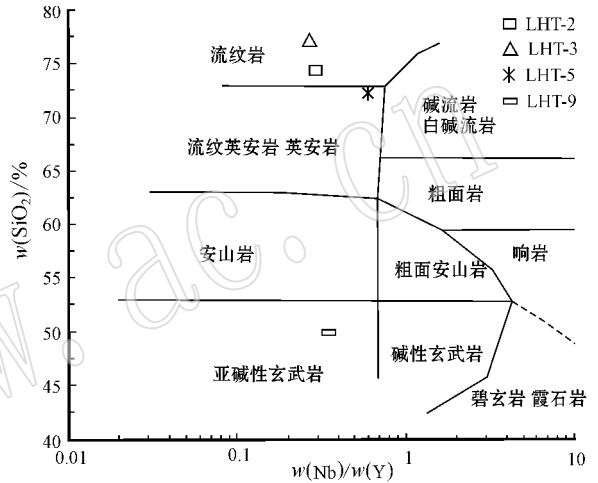


图 6 变质火山岩 SiO_2 -Nb/Y 判别图解 (Winchester and Floyd, 1977)

Fig. 6 SiO_2 versus Nb/Y diagram of metavolcanic rocks (Winchester and Floyd, 1977)

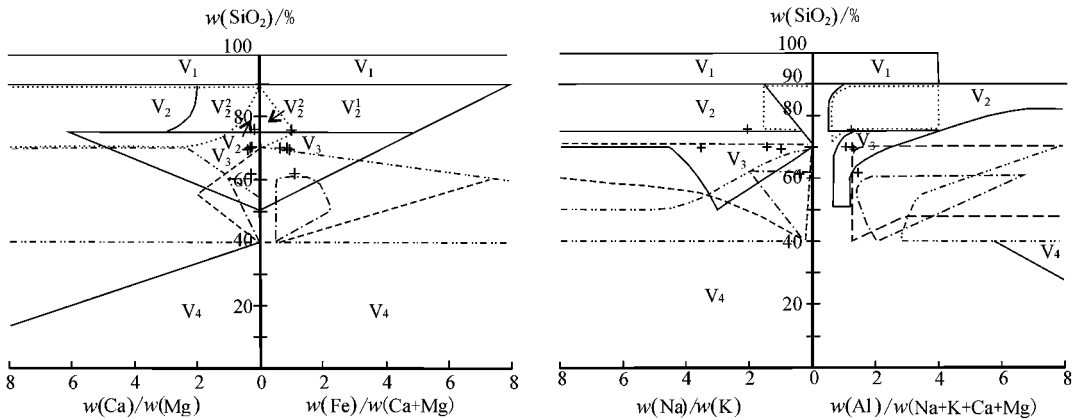


图 7 SiO_2 -Ca/Mg、 SiO_2 -Fe/(Ca+Mg) 和 SiO_2 -Na/K、 SiO_2 -Al/(Na+K+Ca+Mg) 图解 ($CaO < 5\%$) (转引自王仁民等, 1987)

Fig. 7 Diagrams of SiO_2 -Ca/Mg vs SiO_2 -Fe/(Ca+Mg) and SiO_2 -Na/K vs SiO_2 -Al/(Na+K+Ca+Mg) ($CaO < 5\%$)

(after Wang Renmin et al., 1987)

线条圈定范围:虚线-蒙脱石粘土;点虚线-水云母粘土;双点虚线-高岭石粘土;点线-长石砂岩和石英长石砂岩;实线- V_1 -石英岩、硅质岩; V_2 -亚杂砂岩; V_3 -杂砂岩; V_4 -铝土矿、粘土;+云母片岩

Dashed line: smectite clay; dotted-dashed line: hydromic clay; double dotted-dashed line: kaolinite clay; dotted line: feldspathic sandstone and quartzose-feldspathic sandstone; solid line: V_1 -quartzite and siliceous rocks; V_2 -subgraywacke; V_3 -graywacke; V_4 -bauxite and laterite; + mica-schist

表2 变质火山岩的全岩主量和微量元素分析结果

Table 2 Bulk-rock analytical results of major and trace elements in the metavolcanic rocks

| 样号 | LHT-02 | LHT-03 | LHT-04 | LHT-05 | LHT-06 | LHT-07 | LHT-08 | LHT-09 | LHT-10 |
|---------------------------------|--------------|--------------|-------------|---------|-----------|---------|-------------|--------|------------|
| 岩性 | 白云母 二长片麻岩 | 白云母 二长片麻岩 | 石榴白云 母片岩 | 二长片麻岩 | 白云母 片岩 | 二云片岩 | 石榴白云 母片岩 | 角闪片岩 | 石榴 二云片岩 |
| 原岩 | 火山岩 | 火山岩 | 沉积岩 | 火山岩 | 沉积岩 | 沉积岩 | 沉积岩 | 火山岩 | 沉积岩 |
| SiO ₂ | 74.21 | 77.29 | 75.53 | 72.36 | 69.18 | 61.51 | 69.68 | 49.88 | 69.91 |
| TiO ₂ | 0.20 | 0.11 | 0.35 | 0.42 | 0.67 | 0.96 | 0.74 | 2.27 | 0.67 |
| Al ₂ O ₃ | 13.33 | 12.28 | 12.57 | 13.55 | 14.18 | 16.77 | 14.16 | 12.90 | 13.66 |
| TFe ₂ O ₃ | 1.54 | 1.05 | 2.33 | 2.76 | 4.36 | 6.66 | 4.39 | 15.79 | 3.59 |
| FeO | 1.19 | 0.68 | 1.59 | 1.74 | 3.32 | 4.21 | 3.29 | 9.81 | 2.71 |
| MnO | 0.04 | 0.02 | 0.03 | 0.05 | 0.11 | 0.13 | 0.08 | 0.25 | 0.06 |
| MgO | 0.29 | 0.23 | 1.12 | 1.17 | 1.99 | 2.73 | 2.36 | 5.77 | 2.48 |
| CaO | 0.71 | 0.41 | 0.20 | 1.31 | 0.97 | 0.97 | 0.77 | 7.75 | 0.97 |
| Na ₂ O | 3.32 | 5.12 | 3.65 | 3.91 | 2.35 | 1.33 | 2.84 | 4.25 | 4.38 |
| K ₂ O | 4.93 | 2.59 | 2.71 | 3.30 | 3.61 | 5.01 | 2.99 | 0.55 | 1.90 |
| P ₂ O ₅ | 0.10 | 0.09 | 0.06 | 0.07 | 0.13 | 0.23 | 0.14 | 0.17 | 0.12 |
| LOI | 0.86 | 0.78 | 1.48 | 0.92 | 1.88 | 2.98 | 1.22 | 0.78 | 1.56 |
| TOTAL | 99.53 | 99.97 | 100.03 | 99.84 | 99.43 | 99.29 | 99.37 | 100.35 | 99.30 |
| DF | 1.98 | 2.76 | -0.36 | 1.43 | -1.51 | -2.10 | -1.73 | 0.02 | 0.14 |
| Li | 10.45 | 4.99 | 15.85 | 13.24 | 37.57 | 30.43 | 29.14 | 5.52 | 26.7 |
| Be | 3.28 | 2.18 | 1.87 | 1.68 | 2.33 | 2.75 | 2.29 | 1.2 | 1.68 |
| Sc | 3.57 | 2.72 | 5.21 | 6.84 | 11.48 | 19.75 | 13.38 | 45.14 | 10.64 |
| V | 6.75 | 0.46 | 25.94 | 39.43 | 72.5 | 128.72 | 82.77 | 441.65 | 80.83 |
| Cr | 5.87 | 1.94 | 11.31 | 13.75 | 43.39 | 81.2 | 56.84 | 51.11 | 45.02 |
| Co | 1.71 | 0.67 | 3.5 | 4.65 | 9.56 | 19.9 | 9.69 | 50.74 | 9.94 |
| Ni | 1.7 | 0.09 | 4.58 | 6.17 | 20.45 | 37.96 | 26.43 | 46.44 | 15.76 |
| Cu | 5.89 | 2.53 | 7.11 | 10.47 | 25.72 | 33.51 | 20.1 | 44.5 | 7.97 |
| Zn | 50.3 | 29.05 | 33.6 | 40.83 | 76.07 | 85.52 | 73.62 | 140.97 | 58.08 |
| Ga | 19.42 | 12.9 | 18.49 | 17.81 | 20.21 | 25.18 | 19.12 | 19.4 | 17.61 |
| Rb | 190.04 | 78.31 | 73.3 | 90.63 | 117.6 | 224.42 | 95.97 | 12.49 | 63.72 |
| Sr | 53.15 | 25.17 | 60.79 | 320.72 | 69.95 | 76.65 | 112.19 | 188.57 | 111.84 |
| Y | 42.15 | 31.14 | 23.93 | 17.78 | 27.41 | 22.12 | 30.86 | 35.27 | 18.87 |
| Zr | 105.92 | 62.26 | 182.19 | 190.21 | 232.23 | 213.13 | 196.43 | 149.48 | 190.53 |
| Nb | 12.13 | 8.36 | 12.17 | 10.09 | 13.62 | 15.97 | 13.7 | 12.49 | 11.25 |
| Cs | 4.74 | 1.63 | 5.87 | 3.32 | 9.47 | 24.6 | 4.95 | 1.08 | 3.77 |
| Ba | 283.66 | 111.87 | 584.31 | 1169.31 | 872 | 1191.74 | 694.45 | 60.8 | 629.16 |
| Hf | 3.67 | 2.66 | 5.78 | 5.61 | 6.87 | 6.49 | 5.85 | 4.51 | 5.6 |
| Ta | 1.14 | 1.53 | 1.1 | 0.8 | 1.08 | 1.29 | 0.98 | 0.86 | 0.87 |
| Tl | 0.8 | 0.28 | 0.31 | 0.43 | 0.58 | 1.27 | 0.44 | 0.1 | 0.32 |
| Pb | 20.96 | 4.81 | 4.01 | 17.16 | 6.94 | 8.26 | 8.89 | 5.07 | 5.54 |
| Bi | 0.08 | 0.1 | 0.13 | 0.09 | 0.17 | 0.57 | 0.09 | 0.08 | 0.05 |
| Th | 13.08 | 11.54 | 22.87 | 13.02 | 14.75 | 15.44 | 10.06 | 2.62 | 10.02 |
| U | 2.27 | 1.23 | 1.65 | 2.04 | 1.86 | 2.41 | 1.6 | 0.57 | 1.64 |
| La | 22.05 | 8.93 | 74.62 | 42.19 | 43.99 | 47.23 | 37.61 | 18.45 | 36.85 |
| Ce | 44.35 | 20.6 | 134.63 | 71.97 | 79.69 | 89.97 | 72.47 | 37.29 | 70.66 |
| Pr | 5.13 | 2.46 | 14.91 | 8.08 | 9.1 | 10.38 | 8.31 | 5.24 | 8.3 |
| Nd | 18.54 | 9.78 | 50.42 | 28.02 | 34.52 | 38.27 | 32.31 | 21.49 | 30.92 |
| Sm | 4.2 | 2.52 | 7.71 | 4.31 | 5.67 | 6.32 | 6.12 | 5.4 | 5.35 |
| Eu | 0.39 | 0.15 | 1.05 | 0.86 | 1.19 | 1.2 | 1.12 | 1.53 | 1.17 |
| Gd | 4.62 | 2.83 | 6.28 | 3.76 | 5.02 | 5.46 | 5.41 | 5.34 | 4.4 |
| Tb | 0.96 | 0.61 | 0.81 | 0.55 | 0.76 | 0.81 | 0.9 | 0.98 | 0.67 |
| Dy | 6.78 | 4.58 | 4.42 | 3.08 | 4.73 | 4.42 | 5.54 | 6.45 | 3.88 |
| Ho | 1.5 | 1.04 | 0.86 | 0.66 | 1.01 | 0.88 | 1.22 | 1.37 | 0.77 |
| Er | 4.39 | 3.11 | 2.43 | 1.88 | 2.82 | 2.44 | 3.31 | 3.82 | 1.99 |
| Tm | 0.68 | 0.49 | 0.37 | 0.28 | 0.43 | 0.38 | 0.51 | 0.58 | 0.3 |
| Yb | 4.51 | 3.21 | 2.44 | 1.95 | 2.81 | 2.55 | 3.23 | 3.62 | 1.93 |
| Lu | 0.69 | 0.49 | 0.38 | 0.32 | 0.43 | 0.42 | 0.48 | 0.57 | 0.29 |
| ∑REE | 118.79 | 60.8 | 301.33 | 167.91 | 192.17 | 210.73 | 178.54 | 112.13 | 167.48 |
| ∑LREE | 94.66 | 44.44 | 283.34 | 155.43 | 174.16 | 193.37 | 157.94 | 89.4 | 153.25 |
| ∑HREE | 24.13 | 16.36 | 17.99 | 12.48 | 18.01 | 17.36 | 20.6 | 22.73 | 14.23 |
| LREE/HREE | 3.92 | 2.72 | 15.75 | 12.45 | 9.67 | 11.14 | 7.67 | 3.93 | 10.77 |
| δEu | 0.27 | 0.17 | 0.45 | 0.64 | 0.67 | 0.61 | 0.58 | 0.86 | 0.71 |
| (La/Yb) _N | 3.51 | 2 | 21.94 | 15.52 | 11.23 | 13.29 | 8.35 | 3.66 | 13.7 |
| (La/Sm) _N | 3.39 | 2.29 | 6.25 | 6.32 | 5.01 | 4.82 | 3.97 | 2.21 | 4.45 |
| (Gd/Yb) _N | 0.85 | 0.73 | 2.13 | 1.6 | 1.48 | 1.77 | 1.39 | 1.22 | 1.89 |

岩主要是杂砂岩。

3.2 阿克苏群变质火山岩主要元素和微量元素

阿克苏群变质岩的主要元素分析结果如表 2 所示。其中，正变质岩中片麻岩 SiO₂ 含量为 72.36% ~ 77.29%，平均为 74.6%；Al₂O₃ 含量为 12.28% ~ 13.55%，平均为 13.05%；而 TiO₂、Fe₂O₃、FeO、MnO、MgO 和 CaO 的含量较低，其中 Fe₂O₃ (Fe₂O₃ = TF₂O₃ - 0.899 8 FeO) 为 0.44% ~ 1.2%，FeO 为 0.68% ~ 1.74%，MgO 为 0.23% ~ 1.17%，CaO 为 0.41% ~ 1.31%；岩石明显富含 Na₂O、K₂O，其中 Na₂O + K₂O 含量为 7.21% ~ 8.25%，显示出富硅、铝、贫镁、铁的特点，σ 指数 1.8 ~ 2.3，属于钙碱性系列。原岩为亚碱性玄武岩的角闪片岩 SiO₂ 含量为 49.88%，Al₂O₃ 含量为 12.9%，TiO₂、TF₂O₃、MgO 和 CaO 的含量较高，TiO₂ 为 2.27%，TF₂O₃ 为 15.79%，MgO 为 5.77%，CaO 为 7.75%，Na₂O 含量高为 4.25%，K₂O 含量比较低为 0.55%，特征与拉斑玄武岩相同。

从稀土元素球粒陨石标准化图解(图 8)中可以看出，轻稀土元素相对重稀土元素明显富集，重稀土元素相对平坦，具有较强的轻、重稀土元素分馏。不同样品稀土元素含量变化较大，对于变质原岩为偏酸性的片麻岩，除样品 LHT-03 的轻、重稀土元素含量较低(LREE = 44.44 × 10⁻⁶，HREE = 16.36 × 10⁻⁶)外，其余样品含量较高，其 LREE/HREE = 2.92 ~ 12.45，其中(La/Yb)_N = 2.00 ~ 15.52 (La/Sm)_N = 2.21 ~ 6.32 (Gd/Yb)_N = 0.73 ~ 1.6，具有强烈至中等的负 Eu 异常，δEu = 0.17 ~ 0.64，平均值为 0.36。由稀土元素球粒陨石标准化曲线可以看出，与其他原岩为中酸性的样品相比，原岩为拉斑玄

武岩的样品 LHT-09 的曲线相对平缓，LREE/HREE = 3.93 (La/Yb)_N = 3.66 (La/Sm)_N = 2.21 (Gd/Yb)_N = 1.22，具弱的负异常，δEu 为 0.86。

在微量元素 MORB 标准化曲线(图 9)上，变质原岩为中酸性的片麻岩表现出强烈富集大离子亲石元素(K、Rb、Ba、Th)，除 LHT-03 样品 Ba 出现小的峰外，其他样品 Ba、Sr 呈负异常，有明显的 Rb、Th、K 峰，而相对亏损高场强元素，具有明显的 Nb、Ta、P、Ti 谷。原岩为拉斑玄武岩的样品 LHT-09 的蛛网图与其他样品蛛网图的形状有些不同，大离子亲石元素含量相对其他样品低，且 Ti 出现很小的峰，K 出现谷。

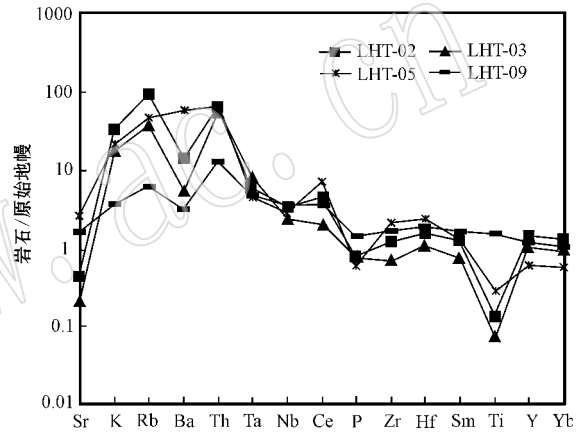


图 9 变质火山岩微量元素 MORB 标准化曲线 (MORB 数据据 Sun 和 McDoughn, 1989)

Fig. 9 MORB-normalized trace earth element patterns of metavolcanic rocks (MORB data after Sun and McDoughn, 1989)

3.3 变质沉积岩微量元素与稀土元素特征

阿克苏群云母片岩的原岩为杂砂岩，其主要元素、稀土元素和微量元素丰度见表 2，常量元素中 SiO₂ 含量为 61.51% ~ 75.53%，平均为 69.16%，TiO₂ 含量为 0.35% ~ 0.96%，平均为 0.68%，Al₂O₃ 含量为 12.57% ~ 16.77%，平均为 14.27%，TF₂O₃ + MgO 3.35% ~ 10.39%，平均为 6.00% (TF₂O₃ = FeO + 0.899 Fe₂O₃)，MgO 含量为 1.125% ~ 2.73%，平均为 2.14%，CaO 含量为 0.20% ~ 0.97%，平均为 0.78%，Na₂O 含量为 1.33% ~ 4.38%，平均为 2.91%，K₂O/Na₂O 为 0.43 ~ 3.77，与 PASS (Taylor and McLennan, 1985) 相比 SiO₂ 及 Na₂O 含量较高，Al₂O₃、TF₂O₃、MgO、CaO、Na₂O 含量较高。

稀土元素配分模式显示轻稀土元素相对重稀土

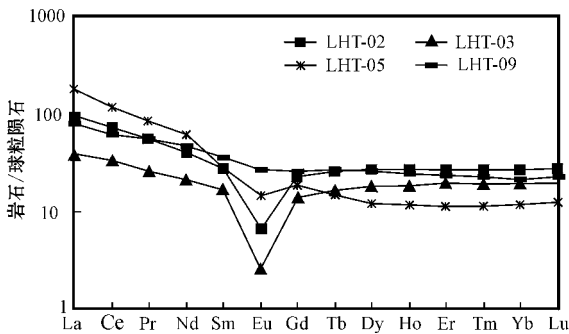


图 8 变质火山岩的稀土元素球粒陨石标准化曲线 (球粒陨石数据据 Sun 和 McDoughn, 1989)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns in metavolcanic rocks (chondrite data after Sun and McDoughn, 1989)

元素明显富集,重稀土元素相对平坦,具有较强的轻、重稀土元素分馏。云母片岩稀土元素总量元素偏高,轻重稀土元素比值 $LREE/HREE = 7.67 \sim 15.75$ (La/Yb)_N = 8.35 ~ 21.94 (La/Sm)_N = 3.97 ~ 6.25 (Gd/Yb)_N = 1.39 ~ 2.13, 上述比值均 > 1, 反映轻稀土元素相对富集、分馏程度较好,重稀土元素亏损、分馏程度低, $\delta Eu = 0.45 \sim 0.71$, 平均 0.60, 钕强烈到中等负异常。从球粒陨石标准化曲线看出,曲线总体呈不对称右倾,趋势较一致,反映了原成分的相似性(图 10),在球粒陨石和 PASS 标准化的稀土配分图解中类似于活动大陆边缘及大陆岛弧杂砂岩。

4 阿克苏群变质岩形成的构造环境判别

4.1 变质火山岩形成的构造环境判别

由阿克苏群变质火山岩的原岩恢复结果可知,其岩石组合主要以酸性火山岩为主,局部有少量的基性火山岩,地球化学特征显示了其基性和酸性岩石为钙碱性系列岩石(图 4)。在微量元素 MORB 标准化图解上(图 8),玄武岩显示出高场强元素和 MORB 一致的特点,而大离子亲石元素则有明显的富集,并存在明显的 Nb 和 Ta 的负异常,这些特点与岛弧环境的火山岩一致。在 Pearce 等(1984)定义的

花岗岩类形成构造环境的 $Rb - Y$ 、 $Rb - (Y + Nb)$ 判别图(图 11)上,酸性火山岩的投影点都落入火山弧花岗岩区。一般而言,大陆弧和大洋弧火山岩的岩石组合和地球化学特征基本相似,但是大陆弧由于有厚的大陆壳和大陆岩石圈,所以在岩石组合上比大洋弧出现更多的酸性火山岩,综合这些信息,可以推测该地区中元古代阿克苏群的变质火山岩形成于与俯冲作用相关的陆缘火山弧环境。

4.2 变质沉积岩形成的构造环境

阿克苏群变质沉积岩的原岩为杂砂岩,常量元素中 SiO_2 含量为 261.51% ~ 75.53%, 平均为 69.16%, TiO_2 含量为 0.35% ~ 0.96%, 平均为 0.68%, Al_2O_3 含量为 12.57% ~ 16.77%, 平均为 14.27%, $(Fe_2O_3 + MgO)$ 为 3.35% ~ 10.39%, 平均为 6.00%, 其含量变化区间较大,介于 Bhatia(1983)所统计的岛弧-活动陆缘型砂岩成分之间。Bhatia 研究砂岩成分与板块构造环境的关系时认为:常量元素中 $Fe_2O_3 + MgO$ 、 TiO_2 含量和 Al_2O_3/SiO_2 、 K_2O/Na_2O 、 $Al_2O_3/(CaO + Na_2O)$ 比值是判别构造环境最有意义的参数。从大洋岛弧 → 大陆岛弧 → 活动大陆边缘 → 被动大陆边缘, $Fe_2O_3 + MgO$ 、 TiO_2 含量及 Al_2O_3/SiO_2 减少, K_2O/Na_2O 、 $Al_2O_3/(CaO + Na_2O)$ 比值增加。 $Fe_2O_3 + MgO$ 对 TiO_2 、 Al_2O_3/SiO_2 (图 12) 变异图解反映阿克苏群变质沉积岩与岛弧-

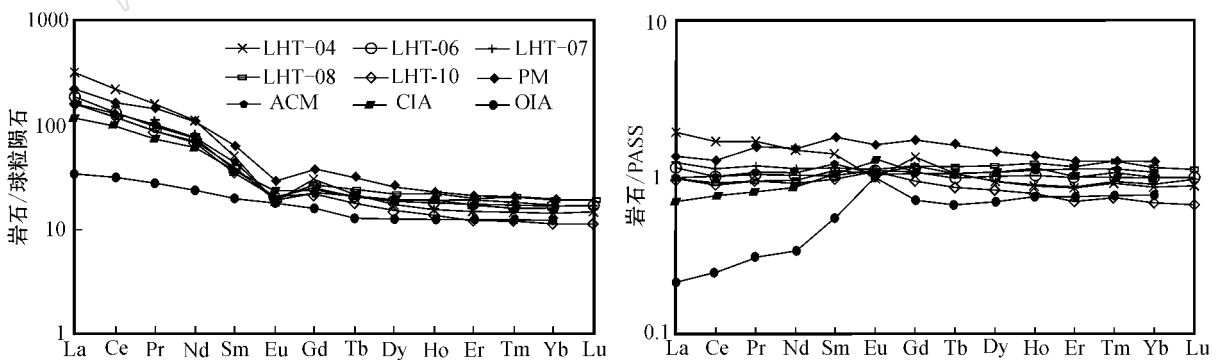


图 10 变质沉积岩稀土元素球粒陨石及 PASS 标准化曲线(球粒陨石数据据 Sun 和 McDough, 1989; PASS 数据据 McLenenan, 1989; 代表性构造环境碎屑沉积岩平均值来自 Bhatia, 1986)

Fig. 10 Chondrite-normalized and PASS-normalized REE patterns in metasedimentary rocks (chondrite data after Sun and McDough, 1989; PASS data after McLenenan, 1989; representative average tectonic clastic sedimentary rocks data after Bhatia, 1986)

OIA—大洋岛弧杂砂岩; CIA—大陆岛弧杂砂岩; ACM—活动大陆边缘杂砂岩; PM—被动大陆边缘泥岩及砂岩

OIA—oceanic arc graywacke; CIA—continental arc graywacke; ACM—active continental-margin graywacke; PM—passive continental-margin graywacke

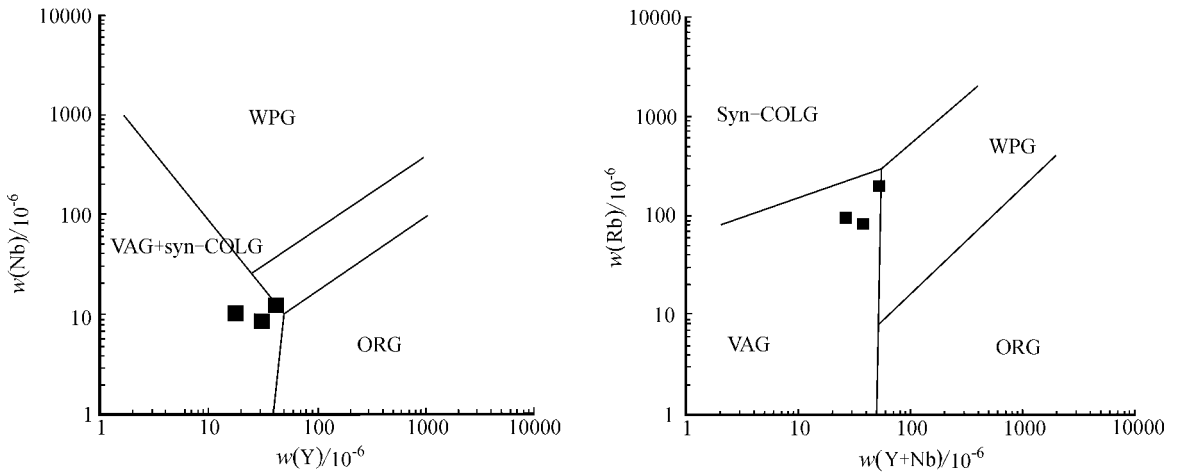


图 11 花岗岩成因的构造环境判别图解(据 Pearce 等,1984)

Fig. 11 Nb versus Y and Rb versus Nb + Y tectonic discrimination diagram of the granites (after Pearce *et al.*, 1984)

ORG—洋中脊花岗岩；VAG—火山弧花岗岩；WPG—板内花岗岩；Syn-COLG—同构造的碰撞带花岗岩

ORG—ocean ridge granite；VAG—volcanic island arc granite；WPG—intraplate granite；Syn-COLG—syn-collision granite

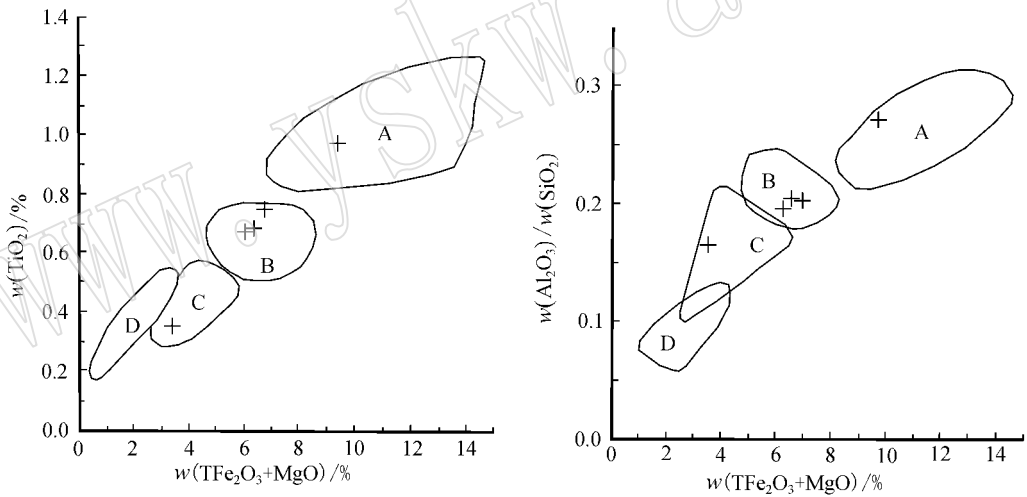


图 12 $TFe_2O_3 + MgO$ 对 TiO_2 、 Al_2O_3/SiO_2 图解(底图据 Bhatia,1983)

Fig. 12 Diagrams of $TFe_2O_3 + MgO$ vs. TiO_2 、 Al_2O_3/SiO_2 (after Bhatia, 1983)

A—大洋岛弧杂砂岩；B—大陆岛弧杂砂岩；C—活动大陆边缘杂砂岩；D—被动大陆边缘杂砂岩

A—oceanic arc graywacke；B—continental arc graywacke；C—active continental-margin graywacke；D—passive continental-margin graywacke

活动陆缘环境有关。稀土元素含量在碎屑沉积岩中是稳定的,受风化、成岩及变质作用的影响不明显(Nance and Taylor,1976),因而可以对沉积物的成因提供重要的约束。在 $La/Th - Th$ 图解中,大多数阿克苏群变质沉积岩样品点落到酸性岛弧区域,揭示其源区物质可能以岛弧酸性火山岩为主(图 13)。

据 Bhatia(1983,1986)的研究成果,不同的构造环境碎屑物质源区不同(如大洋岛弧碎屑沉积物来

自未切割的岩浆弧,大陆岛弧碎屑物来自切割的岩浆弧,活动大陆边缘碎屑沉积物来自抬升的盆地,被动大陆边缘碎屑沉积物来自克拉通内部高地或循环造山带),并具有明显不同的微量元素和稀土元素含量以及相关元素的比值。从大洋岛弧→大陆岛弧→活动大陆边缘→被动大陆边缘,其 La 、 Ce 、 Th 、 U 、 Hf 、 ΣREE 、 La/Yb 或 $(La/Yb)_N$ 明显升高, δEu 降低。阿克苏群变质沉积岩在球粒陨石和PASS标准

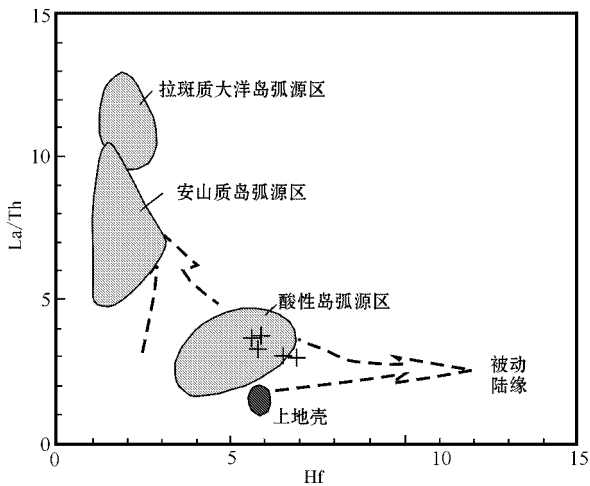


图 13 La/Th - Hf 图解 (Folyd 和 Leveridge, 1987)

Fig. 13 La/Th - Hf discrimination diagram (after Folyd and Leveridge, 1987)

化稀土元素分配图解中类似于活动大陆边缘及大陆岛弧杂砂岩(图 10),说明这些变质沉积岩可能形成于活动大陆边缘或大陆岛弧相关沉积盆地(Bhatia, 1986)。需要指出的是,Bhatia(1986)文中的活动大陆边缘指安第斯型的活动陆缘,不是广义的活动大陆边缘,不包括如日本弧那样的岛弧。因此,为了进一步区分这套变质沉积岩形成的构造背景,本文使用不活泼的微量元素进行研究(图 14)。在这两个图解中除一个样品外,其余数据均落入大陆岛弧区,说

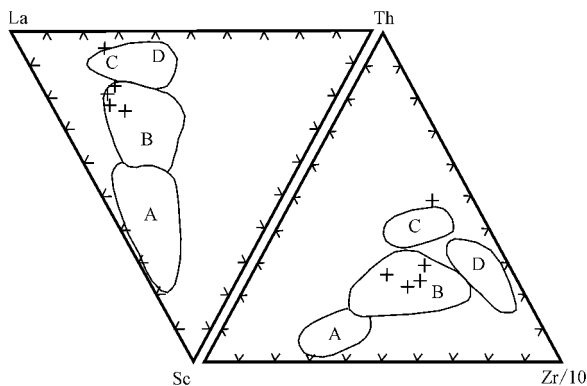


图 14 La - Sc - Th 图解和 Th - Sc - Zr/10 图解 (Bhatia 和 Crook, 1986)

Fig. 14 La - Sc - Th and Th - Sc - Zr/10 discrimination diagram (after Bhatia and Crook, 1986)

A—大洋岛弧; B—大陆岛弧; C—活动大陆边缘;
D—被动大陆边缘

A—oceanic island arc; B—continental arc;

C—active continental margin; D—passive continental margin

明该套岩石可能沉积于靠近大陆岛弧的相关盆地(Bhatia, 1983)。这种构造环境下形成的碎屑沉积物,主要来自长英质岩浆岩或火山岩。因此阿克苏群变质沉积岩的地球化学特征指示靠近大陆岛弧的活动大陆边缘构造环境,如弧间前弧或后弧盆地等。

4.3 大地构造意义

Rogers 和 Santosh 等(2002)提出哥伦比亚超大陆是在 1.9 G~1.5 G 期间,通过 Nena、Ur、Atlantic、3 个大陆块群体汇聚形成的超级大陆,它是前罗迪尼亚古-中元古时期的超大陆,从 1.5 Ga 开始的裂解作用使哥伦比亚超大陆逐步破裂,并在 1.0 Ga 左右这些破裂的大陆块体又重新汇聚形成罗迪尼亚超大陆。天山山脉地壳的形成与演化可以划分为太古宙至-古元古代、中元古代至-新元古代中期、新元古代晚期至石炭纪、二叠纪至上新世和第四纪以来 5 个构造阶段,分别对应着全球大陆演化的哥伦比亚超大陆、罗迪尼亚超大陆、潘吉亚超大陆和现今大陆的形成演化等阶段。发生在中元古代晚期-新元古代早期(1.2~0.9 Ga)的格林威尔造山事件,使塔里木地块与华南、澳大利亚等大陆碰撞、拼贴在一起,形成了 Rodinia 超大陆(Hoffman, 1991; Powell and Pisarevsky, 2002)。研究区长城纪阿克苏群的绿片岩和蓝片岩为塔里木古陆的基底(李锦铁等, 2006),出露在塔里木西北边缘的前寒武纪蓝闪石片岩就是格林威尔事件中碰撞造山事件的产物(王飞等, 2010)。张志勇等(2008)认为阿克苏群的高压变质作用发生在新元古代早中期,阿克苏蓝闪石片岩代表新元古代早期末古洋壳快速俯冲消减的产物,而发育在阿克苏地区的新元古界苏盖特布拉克组碱性玄武岩则是新元古代(830~750 Ma)地幔柱活动和 Rodinia 超大陆裂解作用的直接证据(王飞等, 2010)。Nakajima 等(1990)等提出了阿克苏蓝片岩形成的两种构造模型:①阿克苏蓝片岩形成于 700 Ma 前的古塔里木克拉通北部,并且推测那时古塔里木克拉通位于冈瓦纳大陆的最北缘;②阿克苏蓝片岩形成于一个位于塔里木克拉通北部的某未知克拉通的南缘,之后这个克拉通南侧出现裂解,阿克苏蓝片岩即是该裂解的克拉通向南拼接到塔里木克拉通上所形成,前者指示阿克苏蓝片岩是由大洋板块向南俯冲于古塔里木克拉通北部所形成,后者则指示阿克苏蓝片岩是由大洋板块向北俯冲于某未知克拉通南缘所形成,随后该克拉通南部裂解拼贴于古塔里木克拉通北部。黄文涛等(2009)利用蓝片岩中多硅白云

母计算得到的压力结果表明,压力明显南部大于北部,为模型①提供了证据,即阿克苏蓝片岩为古大洋板块向南俯冲于古塔里木克拉通之下形成。本次研究中,阿克苏群变质岩原岩为酸性火山岩、基性岩和杂砂岩,变质火山岩指示其构造环境为与俯冲作用有关的陆缘火山弧环境,变质沉积岩指示构造环境为靠近大陆岛弧的活动大陆边缘构造环境,指示了大陆的形成过程,由此推测,研究区中元古代的岩浆作用可能与全球的哥伦比亚超大陆的形成事件有关,这与前人的结论一致。结合前人的研究和认识,笔者认为,前寒武纪阿克苏群变质岩原岩在中元古代哥伦比亚超大陆形成时形成,在新元古代 Rodinia 超大陆形成阶段,发生高压变质作用形成一套蓝片岩变质岩系,长城纪阿克苏群变质岩为塔里木古陆的基底,在中元古代晚期-新元古代早期格林威尔造山事件后塔里木地块为 Rodinia 超大陆的一部分,在 830 ~ 750 Ma 从超大陆裂解出来。

5 结论

(1) 阿克苏群变质岩由变质火山岩和变质沉积岩组成,其中以变质沉积岩为主。变质火山岩原岩主要以酸性火山岩为主夹少量基性火山岩,基性和酸性火山岩均属于钙碱性系列,变质沉积岩的原岩为杂砂岩。

(2) 阿克苏群变质火山岩可能形成于与俯冲作用相关的陆缘火山弧环境,变质沉积岩的地球化学特征指示靠近大陆岛弧的活动大陆边缘构造环境,如弧间前弧或后弧盆地等。研究区中元古代的岩浆作用可能与全球的哥伦比亚超大陆的形成事件有关。

致谢 感谢中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室工作人员对论文数据的分析,感谢论文审稿人对论文提出的建设性修改意见。

References

Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. *Journal of Geology*, 91: 611~627.
 Bhatia M R. 1986. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: provenance and tectonic control[J]. *Sedimentary Geology*, 45: 97~113.
 Bhatia M R and Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of

graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basin [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92: 181~193.
 Cai Tuci. 1999. Xinjiang Uygur Autonomous Region Lithostratigraphic [M]. China University of Geosciences Press, 143~148 (in Chinese).
 Chen Y, Xu B, Zhan S, et al. 2004. First Mid-Neoproterozoic paleomagnetic results from the Tarim basin (NW China) and their geodynamic implications[J]. *Precambrian Research*, 133(3~4): 271~281.
 Floyd P A and Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones[J]. *Journal of the Geological Society of London*, 144: 531~542.
 Gao Zhenjia. 1993. Precambrian in Northern Xinjiang, Precambrian Geology No. 6 [M]. Beijing: Geological Publishing House, 27~28 (in Chinese).
 Hoffman L F. 1991. Did the Breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out? [J]. *Science*, 252: 1409~1412.
 Hu Aiqin. 1997. Geological Evolution of Northern Xinjiang and the Regulation of Diagenetic Mineralization [M]. Beijing: Science Press, 24~30 (in Chinese).
 Huang Wentao, Yu Junjie, Zheng Bihai, et al. 2009. Study of phengite of Precambrian blueschists in Aksu, Xinjiang [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29: 338~343 (in Chinese with English abstract).
 Li Jinyi, Wang Kezhao, Li Yaping, et al. 2006. Geomorphological features, crustal composition and geological evolution of the Tianshan Mountain [J]. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 895~909 (in Chinese with English abstract).
 Liou J G, Graham S A, Maruyama S, et al. 1996. Characteristics and tectonic significance of the Late Proterozoic Aksu blueschists and diabasic dikes, Northwest Xinjiang, China [J]. *International Geology Review*, 38(3): 228~244.
 McLennan S M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes [A]. Lipin B R and McKay G A. *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements*, Rev. Miner [C]. 21: 169~200.
 Nakajima T, Maruyama S, Uchiumi S, et al. 1990. Evidence for Late Proterozoic subduction from 700-Myr-old blueschists in China [J]. *Nature*, 346: 263~265.
 Nance W B and Taylor S R. 1976. Rare earth element patterns and crustal evolution I: Australian post-Archean sedimentary rocks [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40: 1539~1551.
 Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rock [J]. *Petrol.*, 25: 956~983.
 Powell C M and Pisarevsky S A. 2002. Late Neoproterozoic assembly of East Gondwana [J]. *Geology*, 30(1): 3~6.
 Rogers J J W and Santosh M. 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic Supercontinent [J]. *Gondwana Research*, 5(1): 5~22.
 Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics

- of oceanic basalts : implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in Ocean Basins* [C]. Geological Society , London , Special Publication , 42 : 313 ~ 345.
- Taylor S R and Mclennan S M. 1985. *The Continental Crust : Its Composition and Evolution* [M]. Blackwell : Oxford Press , 1 ~ 312.
- Wang Renmin , He Gaopin , Chen Zhenzhen , *et al.* 1987. *Metamorphic Rocks Combined with the Original Graphic Discriminanc* [M]. Geological Publishing House , 113 ~ 115 (in Chinese).
- Wang Fei , Wang Bo and Shu Liangshu. 2010. Continental tholeiitic basalt of the Akesu area (NW China) and its implication for the Neoproterozoic rifting in the northern Tarim [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 26(2) : 547 ~ 558 (in Chinese with English abstract).
- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements [J]. *Chem. Geol.* 20 : 325 ~ 343.
- Xiao Xuchang and Tang Yaoqing. 1991. *Tectonic Evolution Of the southern Margin of the Paleo-Asian Composite Megasuture* [M]. Beijing Science and Technology Publishing House , 1 ~ 29 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Jibin and Wang Wuyan. 1986. Pre-Sinian Preliminary study of Aksu Group [J]. *Xinjiang Geology* , 4(4) : 33 ~ 46 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhiyong , Zhu Wenbin , Shu Liangshu , *et al.* 2008. Thermo-tectonic evolution of Precambrian blueschists in Aksu , Northwest Xinjiang , China [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 24(12) : 2 849 ~ 2 856 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Shitai. 1984. Evaluation for the 17 geochemical methods of the protoliths recovery of metamorphic rock [J]. *Geological Review* , 30 (1) : 81 ~ 84 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Wenbin , Zhang Zhiyong and Shu Liangshu. 2009. Unravelling the exhumation history of the Precambrian basement rocks in the northern Tarim through apatite fission track thermochronology [J]. *Goldschmidt Conference Abstracts* , A1 532.

附中文参考文献

- 蔡土赐. 1999. 新疆维吾尔自治区岩石地层 [M]. 中国地质大学出版社 , 143 ~ 148.
- 陈义兵 , 胡霏琴 , 张国新 , 等. 2000. 西南天山前寒武纪基底时代和特征 : 锆石 U-Pb 年龄和 Nd-Sr 同位素组成 [J]. *岩石学报* , 16(1) : 91 ~ 98.
- 高振家. 1993. 前寒武纪地质 第 6 号 新疆北部前寒武系 [M]. 地质出版社 , 27 ~ 28.
- 胡霏琴. 1997. 新疆北部地质演化及成岩成矿规律 [M]. 北京 : 科学出版社 , 24 ~ 30.
- 黄文涛 , 于俊杰 , 郝碧海 , 等. 2009. 新疆阿克苏前寒武纪蓝片岩中多硅白云母的研究 [J]. *矿物学报* , 29 : 338 ~ 343.
- 李锦轶 , 王克卓 , 李亚萍 , 等. 2006. 天山山脉地貌特征、地壳组成与地质演化 [J]. *地质通报* , 25(8) : 895 ~ 909.
- 肖序常 , 汤耀庆. 1991. 古中亚复合巨型缝合带南缘构造演化 [M]. 北京 : 北京科学技术出版社 , 1 ~ 29.
- 王 飞 , 王 博 , 舒良树. 2010. 阿克苏南华纪大陆拉斑玄武岩对塔里木北缘新元古代裂解事件的制约 [J]. *岩石学报* , 26(2) : 547 ~ 558.
- 王仁民 , 贺高品 , 陈珍珍 , 等. 1987. 变质岩原岩图解判别法 [M]. 地质出版社 , 1 ~ 199.
- 熊纪斌 , 王务严. 1986. 前震旦纪阿克苏群的初步研究 [J]. *新疆地质* , 4(4) : 33 ~ 46.
- 张志勇 , 朱文斌 , 舒良树 , 等. 2008. 新疆阿克苏地区前寒武纪蓝片岩构造-热演化史 [J]. *岩石学报* , 24(12) : 2 849 ~ 2 856.
- 周世泰. 1984. 对 17 种恢复变质岩原岩的岩石化学方法的检验结果 [J]. *地质评论* , 30(1) : 81 ~ 84.