

doi: 10.12029/gc20180112

裴国栋, 弓小平, 马华东, 关传硕, 杜韦强, 刘洋洋, 欧阳承钊, 李晓光. 2018. 阿尔泰造山带喀纳斯群变质岩地球化学特征及形成环境[J]. 中国地质, 45(1): 141–154.

Pei Guodong, Gong Xiaoping, Ma Huadong, Guan Chuanshou, Du Weiqiang, Liu Yangyang, Ouyang Chengzhao, Li Xiaoguang. 2018. Geochemical characteristics and formation environments of metamorphic rocks in the Kanas Group of Altay tectonic belt[J]. Geology in China, 45(1): 141–154(in Chinese with English abstract).

## 阿尔泰造山带喀纳斯群变质岩地球化学特征 及形成环境

裴国栋<sup>1</sup> 弓小平<sup>1</sup> 马华东<sup>2</sup> 关传硕<sup>1</sup> 杜韦强<sup>1</sup> 刘洋洋<sup>1</sup> 欧阳承钊<sup>1</sup> 李晓光<sup>1</sup>

(1. 新疆大学地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐, 830049; 2. 新疆国家三〇五项目办公室, 新疆 乌鲁木齐, 830000)

**摘要:** 阿尔泰造山带喀纳斯群变质岩的地球化学研究表明, 该套变质岩的原岩主要为泥质沉积岩, 个别为砂质沉积岩, 源区物质主要为中—酸性大陆岛弧火山岩, 并夹杂少量其他碎屑物。尽管 16 个样品间岩性有差异, 但其化学蚀变指数(CIA)几乎全部小于 75, 成分变异指数(ICV)接近或大于 1, 指示源区物质绝大多数经历了温暖、湿润条件下的中等化学风化作用, 且成熟度较差, 为活动大陆边缘首次沉积的产物。该套变质岩中的 La、Ce、 $\Sigma$ REE、 $\delta$ Eu、LREE/HREE 的值显示其原岩主体形成于大陆岛弧背景。其地球化学特征表明, 喀纳斯群变质岩很可能沉积于活动大陆边缘的大陆岛弧相关环境, 推测喀纳斯群发生沉积作用与变质作用的时间在(550±18)Ma 至 430 Ma 之间; 并根据相关对应时间, 推测喀纳斯群变质期次为加里东期。

**关键词:** 地球化学; 阿尔泰造山带; 原岩恢复; 构造环境; 源区特征

中图分类号: P588.34; P595 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2018)01–0141–14

## Geochemical characteristics and formation environments of metamorphic rocks in the Kanas Group of Altay tectonic belt

PEI Guodong<sup>1</sup>, GONG Xiaoping<sup>1</sup>, MA Huadong<sup>2</sup>, GUAN Chuanshuo<sup>1</sup>, DU Weiqiang<sup>1</sup>,

LIU Yangyang<sup>1</sup>, OUYANG Chengzhao<sup>1</sup>, LI Xiaoguang<sup>1</sup>

(1. College of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830049, Xinjiang, China; 2. National 305 Project Office, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

**Abstract:** The geochemical study of metamorphic rocks of the Kanas Group in Altay tectonic belt shows that the metamorphic rocks are mainly argillaceous sedimentary rocks, with small amounts of sandy sedimentary rocks, Source material is mainly of acidic continental arc volcanic rocks mixed with a small amount of other debris. Although there are differences in lithology between 16 samples, the chemical etching of the variable indexes (CIA) is almost all less than 75, indexes of compositional variation (ICV) are close to or higher than 1, indicating that the source region must have experienced a warm, humid conditions of moderate chemical

收稿日期: 2016–04–01; 改回日期: 2017–08–16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41462004)及中国地质调查局项目(12120113041900)联合资助。

作者简介: 裴国栋, 男, 1990 年生, 硕士生, 主要从事成矿规律研究; E-mail: 595111896@qq.com.

通讯作者: 弓小平, 男, 1963 年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事综合信息成矿预测; E-mail: gxiaoping01@163.com.

weathering and the maturity was poor, being the first deposition product of active continental margin. The La, Ce,  $\Sigma$ REE, LREE/HREE, sigma delta Eu values of the metamorphic rocks indicate that the protolith formed in a continental arc setting. These geochemical characteristics suggest that the Kanas Group metamorphic rocks probably deposited on an active continental margin of continental island arc environment. It is inferred that Kanas Group sedimentation and metamorphism occurred between 550±18Ma to 430Ma and, according to the corresponding time, the metamorphism of the Kanas Group took place in Caledonian.

**Key words:** geochemistry; Altay orogenic belt; protolith reconstruction; tectonic setting; source characteristics

**About the first author:** PEI Guodong, male, born in 1990, master, mainly engages in the study of earth exploration and information technology; E-mail: 595111896@qq.com.

**About the corresponding author:** GONG Xiaoping, male, born in 1963, doctor, professor, engages in metallogenic prediction based on comprehensive information; E-mail: gxiaoping01@163.com.

**Fund support:** Supported by National Natural Science Foundation(No.41462004) and China Geological Survey Project(No. 12120113041900).

## 1 引 言

阿尔泰造山带位于哈萨克斯坦—准噶尔板块和西伯利亚板块的碰撞交汇处,中亚造山带的西段,是中亚造山带的重要组成部分,在中亚造山带中占据特殊的地位(曲胜国等,1991;何国琦等,1994;李天德等,2001),以其广泛发育中—低压型递增变质带和花岗岩浆带闻名中外,是研究和探讨碰撞带型递增变质作用的发生及演化过程的典型地区之一(郑常青等,2003)。

目前,学术界对阿尔泰造山带构造演化模式存在较大争议,一部分学者认为泥盆纪阿尔泰地区处于拉张的裂谷构造环境,构造模式为开合模式(何国琦等,1990;肖序常等,1992;何国琦等,1995);另一部分学者则认为阿尔泰造山带为岛弧增生模式,由长期存在的单一岛弧持续俯冲碰撞形成的(袁超等,2007;庄育勋等,1992;庄育勋等,1994)。另外,关于喀纳斯群依列克塔斯组片麻岩的成因和物源方面也存在较大的争议。众多学者通过一系列的同位素年龄测试,认为阿勒泰一带发育的片麻岩、混合岩、角闪片麻岩以及片麻状花岗岩等深成变质岩的成岩年龄应该在10~25亿年(何国琦等,1995),另外一些学者认为阿勒泰的片麻岩应该形成于古—中元古代,应该是古—中元古代的结晶基底(李天德等,2001),但后来学者通过详细的变质带划分研究,认为该段的片麻岩并非是简单的“基底”岩石,所呈现的较高的变质程度是区域动力变质作用所形成的递增变质带(庄育勋等,1994),对于其变质程度相对较高而将其归结为结晶基底的认识存

在一定的不合理性。

本次研究的是一套采自喀纳斯群的、具有喀纳斯群变质岩代表性的片岩和少量片麻岩,准确厘定这套变质岩的地层归属和变质时代以及变质期次、构造成因等问题,对阿尔泰地区地史演化、区域成矿作用的研究具有一定意义。

## 2 区域地质概况

本次研究区位于阿尔泰山脉南部,大地构造位置位于阿尔泰古生代陆缘弧带,由喀纳斯被动陆缘、诺尔特晚古生代弧背盆地、哈龙早古生代岩浆弧三个构造单元构成(李俊健等,2015;潘桂棠等,2009)(图1a)。阿尔泰造山带区域地质图见图1b。

新疆维吾尔自治区区域地层表编写组与新疆维吾尔自治区地质矿产局将喀纳斯群定义为一套巨厚的低绿片岩相浅变质碎屑岩系,主要由片岩、片麻岩、变质砂岩等组成。王乐民等(2016)提出了新疆阿尔泰地区喀纳斯群的形成时代及其解决方案,并将喀纳斯群自下而上分为依列克塔斯组、贝留特组、苏木代尔格组、哲里开特组。

研究区地层区划属北疆—兴安地层大区,北疆地层—阿尔泰地层分区,喀纳斯—青河地层小区。区内主要出露的地层有:震旦系—下寒武统喀纳斯群( $Z_{E_1}K$ ),为一套中浅变质岩系;上奥陶统东锡勒克组( $O_3d$ ),为一套中酸性火山岩系;第四系(图1c)。结合前人对于该区地层的划分和本次工作已经取得的成果,喀纳斯群地层由老到新有:

(1)依列克塔斯组( $Z_{E_1}Y$ ):主要分布在研究区西南部依列克塔斯、阿尤特山地区。该组与上覆贝留

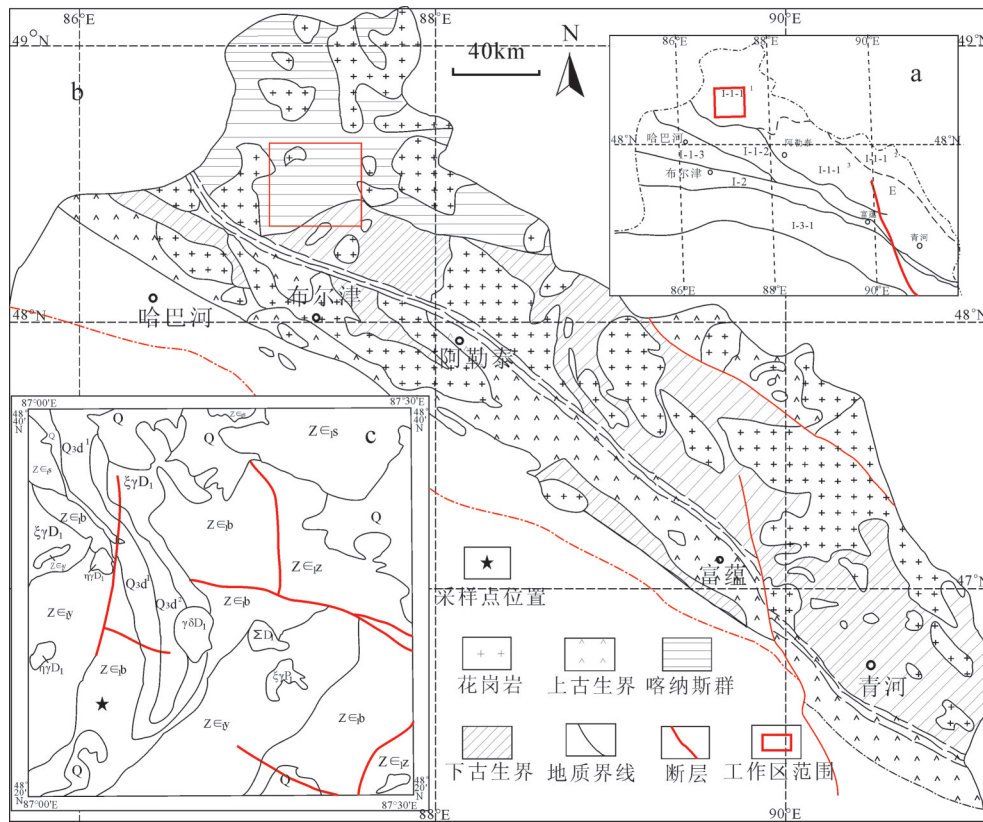


图1 新疆阿尔泰造山带邻区板块构造单元划分及地质概况

a—阿尔泰造山带构造单元划分图;b—阿尔泰造山带区域地质图;c—研究区地质概况;

a: I-1—阿尔泰弧盆系; I-1-1—阿尔泰古生代陆缘弧; I-1-1'—喀纳斯被动陆缘; I-1-1''—诺尔特晚古生代弧背盆地; I-1-1'''—哈龙早古生代岩浆弧; I-1-2—阿尔泰南缘增生弧; I-1-3—额尔齐斯复合增生楔;

c: Zε1y—依列克塔斯组; Zε1b—贝留特组; Zε1s—苏木代尔格组; Zε1z—哲里开特组; O3d—上奥陶统东锡勒克组

Fig. 1 Division of tectonic units and geological background of adjacent regions of Altay orogenic belt in Xinjiang

a—Tectonic sketch of Altay orogenic belt ; b—Regional geological map of Altay orogenic belt ; c—Geological map of the study area;

a: I-1—Altay arc basin system; I-1-1—Altay Paleozoic epicontinental arc; I-1-1'—Kanas passive margin; I-1-1''—Noel late Paleozoic arc basin; I-1-1'''—Halon early Paleozoic magmatic arc; I-1-2—The southern margin of Altay accretionary arc; I-1-3—Erqis composite accretionary wedge;

c: Zε1y—Yiliektas Formation; Zε1b—Beliut Formation; Zε1s—Sumderg Formation; Zε1z—Zjelikait Formation; O3d—Donxilek Formation of Upper Ordovician

特组(Zε1b)为过渡接触关系。为一套深变质片麻岩建造,主要岩石类型有:黑云斜长片麻岩、斜长片麻岩、变粒岩、角闪片麻岩、黑云角闪片麻岩、混合岩、深灰色花岗质片麻岩。岩石具鳞片变晶结构、粒状变晶结构,条纹状、条带状、片麻状构造及塑性流变构造,岩石中长英质矿物呈脉状、透镜状、团块状集合体,与暗色矿物以深浅不同的色调相间。该组西段被早泥盆世二长花岗岩体侵入,靠近岩体地区片麻岩中长英质条带揉皱现象强烈,变形变质程度较高。

(2)贝留特组(Zε1b):主要分布在研究区中部,贝留特、阿尤特山、土尔盖提溪等地,大面积出露。与下

伏依列克塔斯组(Zε1y)整合接触,与上覆苏木代尔格组(Zε1s)整合、断层接触。为一套低角闪岩相结晶片岩建造,主要岩石类型有:红柱石片岩、黑云母片岩、堇青石片岩、矽线石片岩、绿泥绢云石英片岩、黑云石英片岩夹变质砾岩。岩层由东向西变质程度逐渐增强,以发育灰色多褶曲黑云母片岩为特征。

(3)苏木代尔格组(Zε1s):主要分布在研究区东北部,禾木河上游地区,岩性以灰、灰绿色中薄层状变质中粒、细粒砂岩为主,夹少量粉砂岩。该组在测区内下未见底,上与喀纳斯群哲里开特组呈整合接触。为一套高绿片相变质砂岩—粉砂岩建造,主要岩石



类型为:变质细砂岩、变质岩屑石英砂岩、变质粉砂岩、绢云绿泥片岩、变质黑云母石英砂岩、二云母片岩;其原岩为中—细粒岩屑长石石英砂岩夹少许粉砂岩,经区域低温动力变质作用,变质程度达高绿片岩相。野外宏观上,岩石风化面多呈灰色,岩层多呈中层状、中—薄层状。

(4)哲里开特组( $Z_{E1z}$ ):该组为一套陆源碎屑岩建造,受区域低温动力变质作用,岩石达低绿片岩相变质粉砂岩—泥岩建造。有由中粒砂岩、细砂岩、细砂质粉砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩等组成的中、小旋回韵律沉积。岩石多具变余砂状、粉砂状结构、鳞片粒状变晶结构、显微鳞片变晶结构,定向构造、片状构造。上述情况表明该组碎屑岩成分成熟度和结构成熟度为中等—较高。岩石中粒状矿物均全部或部分细粒化重结晶,部分残留原砂屑形态,填隙物均已变质重结晶成显微粒状长英质和片状、显微鳞片状云母、绿泥石等。

(5)上奥陶统东锡勒克组( $O_3d$ ):主要分布于研究区西部布尔津林场道班—贾登裕—哈纳斯大桥一带。呈近南北向展布,形成宽缓的向斜。研究区火山岩主要分布在该组,为一套中酸性火山岩含霏细岩、英安岩、安山岩、熔结凝灰岩等,底部为灰绿色凝灰质底砾岩不整合于下伏地层之上,其上为白哈巴组( $O_3bh$ )整合或假整合所覆,为一套浅变质的灰、灰绿色钙质粉砂岩、含砾砂岩、生物灰岩所组成,上部灰岩中含 *Plasmoporella*, *Helisites* 等晚奥陶世卡拉道克—阿什极尔期分子。由晚奥陶世火山—磨拉石建造以区域性角度不整合覆于震旦—早奥陶世地层之上,属阿尔泰造山带主碰撞期弧后前陆盆地相的楔顶盆地亚相,同时还有大量同碰撞片麻状花岗岩、二长花岗岩及英云闪长岩等侵入。

(6)第四系:以上更新统、全新统为主。主要由冰碛层、沼泽沉积层、残坡积层、冲积层、冲洪积层组成。

### 3 样品测试结果

#### 3.1 样品特征

本次研究所用样品采于  $48^{\circ}20.201'N$ 、 $87^{\circ}01.124'E$  至  $48^{\circ}30.045'N$ 、 $87^{\circ}14.698'E$ ,大致位于依列克塔斯组( $Z_{E1y}$ )与贝留特组( $Z_{E1b}$ )。样品主要岩性有:黑云斜长片麻岩3个(样号1、2、3,记为第1组);

红柱石石英片岩5个(样号4、5、6、7、8,记为第2组);黑云红柱石石英片岩8个(样号9、10、11、12、13、14、15、16,记为第3组)。其中,黑云斜长片麻岩为深灰色,具片麻状构造,余鳞片状粒状变晶结构,主要矿物有石英(30%~40%),黑云母(10%~15%),斜长石(40%~50%),黑云母呈鳞片状,大致呈定向排列,岩层节理裂隙发育,沿裂隙发育轻微褐铁矿化。红柱石石英片岩一般为灰绿色,具片状构造,主要矿物为红柱石(15%~20%)、石英(50%~60%),另有少量白云母(5%左右),其中红柱石为表面凸起的长柱状,粒度为0.5~1.5 cm。黑云红柱石石英片岩,深灰色,具片状构造,主要矿物为石英(50%~60%)、黑云母(10%左右)、红柱石(15%~20%),黑云母呈细小鳞片状,大致呈定向排列。

#### 3.2 测试方法

样品处理及分析测试均在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。主要检测项目、参数、方法与仪器见表1。

#### 3.3 岩石地球化学特征

##### 3.3.1 主量元素

主要化学组成分析结果见表2。

在依列克塔斯组的3个样品中, $SiO_2$ 含量为63.39%~74.46%, $Al_2O_3$ 含量11.74%~17.37%, $Fe_2O_3^T$ (全铁)、 $MgO$ 、 $CaO$ 含量分布于4.25%~7.26%、2.77%~4.59%、0.73%~1.16%的范围内, $K_2O$ 、 $Na_2O$ 的含量变化于1.93%~3.27%、2.07%~2.28%, $TiO_2$ 的含量为0.62%~0.84%。

贝留特组片岩(样品4~16) $SiO_2$ 含量为61.3%~76.11%,平均含量65.42%; $Al_2O_3$ 含量为10.73%~19.02%,平均含量16.53%; $Fe_2O_3 + FeO$ =4.56%~8.31%,平均含量6.75%,均小于9%; $MgO$ =2.77%~5.24%, $CaO$ =0.61%~1.98%, $MnO$ =0.06%~1.15%, $Na_2O$ =1.50%~3.28%, $K_2O$ =1.93%~4.17%, $P_2O_5$ =

表1 检测项目、参数、方法与仪器

Table 1 Test items, parameters, methods and instruments

检测项目与参数	检测方法代号	主要检测仪器
主量元素 Zr	GB/T14506.28-2010	Axios <sup>max</sup> X 射线荧光光谱仪
灼减量	DZG20-1 16.2	P1245 电子分析天平
FeO	GB/T14506.14-2010	50 mL 滴定管
稀土 Y 等 15 元素	DZG20-1 84.2.8	X Serise2 等离子体质谱仪
微量 Li-U 等 26 元素	GB/T14506.30-2010	X Serise2 等离子体质谱仪

表2 阿勒泰喀纳斯群变质岩主要化学组成(%)

Table 2 The major chemical compositions (%) of the metamorphic rocks in the Kanas Group of Altay

样号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	Total
1	61.03	16.55	0.81	3.34	3.98	0.70	4.42	2.80	2.19	0.12	0.20	3.72	99.88
2	73.61	11.61	0.61	1.85	2.93	1.15	2.73	1.91	2.10	0.07	0.17	1.14	99.89
3	61.68	16.86	0.80	3.70	3.65	0.96	3.85	3.17	2.01	0.07	0.16	2.97	99.87
4	63.28	16.24	0.80	2.30	4.78	1.13	4.52	2.76	1.95	0.12	0.20	1.79	99.88
5	60.81	17.31	0.87	1.87	4.28	1.94	3.68	3.31	3.21	0.10	0.10	2.37	99.85
6	61.82	16.37	0.89	2.65	4.12	1.07	4.38	2.44	2.38	0.11	0.17	3.48	99.86
7	75.16	10.60	0.51	1.54	2.95	0.96	2.84	2.08	1.80	0.06	0.16	1.25	99.92
8	68.45	14.25	0.72	1.04	4.22	0.59	3.12	2.91	1.45	0.06	0.16	2.89	99.88
9	59.89	18.50	0.84	1.89	5.08	1.05	3.79	4.05	1.76	0.09	0.17	2.74	99.84
10	58.76	17.39	0.92	2.65	5.32	0.90	5.02	2.67	1.84	0.12	0.13	4.15	99.88
11	60.33	18.33	0.87	1.75	5.25	1.07	3.82	3.97	1.80	0.09	0.18	2.39	99.85
12	61.38	17.67	0.80	3.86	4.02	1.02	4.17	2.44	1.92	0.14	0.33	2.12	99.87
13	61.71	17.19	0.84	2.92	4.45	1.05	4.47	2.84	2.00	0.12	0.20	2.10	99.88
14	65.21	16.11	0.66	2.40	3.58	1.27	3.73	2.38	2.48	0.10	0.23	1.73	99.88
15	63.12	16.74	0.78	3.14	3.82	1.00	4.06	3.04	2.10	0.13	0.20	1.74	99.88
16	65.41	16.14	0.68	2.42	3.48	1.25	3.40	2.13	2.44	0.10	0.20	2.21	99.87

0.10%~0.33%。

可以看出,不论是依列克塔斯组的黑云斜长片麻岩,还是贝留特组的红柱石石英片岩和黑云红柱石石英片岩,它们与岩屑砂岩、长石砂岩的SiO<sub>2</sub>含量比较接近(分别为66.1%和68.3%),与典型的石英砂岩差别较大(SiO<sub>2</sub>含量为95.4%)。喀纳斯群变质岩的Na<sub>2</sub>O含量为2.07%~3.28%,Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O值为0.43~1.14,均值为0.78,且除了1号、14号、16号三个样品的Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O值大于1,其余均小于1,表明喀纳斯群变质岩为相对富钾型。而古生代花岗岩类中的Na<sub>2</sub>O含量为小于3.2%,Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O值绝大多数小于1(郑常青等,2003),与喀纳斯群变质岩十分相似。分别求取研究区变质岩3组的16个样品主量元素氧化物平均值,并与地壳元素丰度进行对比(表3),发现喀纳斯群变质岩的主量元素氧化物平均含量大致接近上地壳的平均组成,说明变质岩母岩主要由大陆上地壳物质组成。

### 3.3.2 微量元素

各类岩石都是由岩浆岩演化而来,因此开展微量元素和稀土元素的分析对研究形成变质岩的各种原岩具有重要的指示意义(孙卉等,2009)。喀纳斯群变质岩的微量元素分析数据见表4。

由表中数据可见,喀纳斯群变质岩中Rb、Ba、Sr等大离子亲石元素(LILE)的含量较高,其中Rb含量为 $37.57 \times 10^{-6}$ ~ $106.72 \times 10^{-6}$ ,Ba为 $171.12 \times 10^{-6}$ ~ $537.12 \times 10^{-6}$ ,Sr为 $101.15 \times 10^{-6}$ ~ $231.46 \times 10^{-6}$ 。Rb/Sr的比值介于0.25~0.82,Sr/Ba=0.22~0.73,具有大陆造山带花岗岩的特征(郑常青等,2003)。而Ni、Co等过渡元素含量普遍较高且变化幅度不大,含量分别为 $52.73 \times 10^{-6}$ ~ $124.87 \times 10^{-6}$ 、 $13.13 \times 10^{-6}$ ~ $25.96 \times 10^{-6}$ 。高场强元素(HFSE)如Ta、Nb、Y等,它们的地球化学特征一般比较稳定,不太容易受到变质、蚀变和风化等作用的影响,后两者测试结果分别为 $2.75 \times 10^{-6}$ ~ $11.96 \times 10^{-6}$ 、 $18.43 \times 10^{-6}$ ~ $32.66 \times 10^{-6}$ 。它们的变化范围不大,表明这些元素的地球化学性质较稳定,受到的变质作用影响不大,也反映了高场强元素的含量受重矿物的控制(Haskin et al,1968)。Ba/Sr范围为1.38~4.52,均值为2.53,略高于上地壳值(1.57),很接近中国东部地壳值(2.55)(杨敬奎,2014),表明源区物质可能来源于上地壳。

利用原始地幔标准化数据对样品微量元素进行标准化,从绘制的原始地幔标准化蛛网图(图2)中可看出,阿勒泰喀纳斯群变质岩不论是片岩还是片麻岩,大都显示出大离子亲石元素Rb、Th、Ce、Zr、Hf等

表3 喀纳斯群变质岩主量元素均值与地壳元素丰度比较(%)

Table 3 Comparison of major element abundances between the metamorphic rocks in the Kanas Group and the earth's crust (%)

比较对象	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO
黑云斜长片麻岩	67.14	15.43	4.45	0.96	3.78	2.70	2.16	0.76	0.18	0.09
红柱石石英片岩	67.46	15.61	5.80	0.88	3.91	2.90	1.74	0.78	0.19	0.10
黑云红柱石石英片岩	63.49	17.69	6.37	1.10	4.16	3.01	2.09	0.82	0.21	0.16
大陆上地壳	66.00	15.20	4.50	4.20	2.20	3.40	3.90	0.65	0.15	0.08
大陆中地壳	52.30	15.50	6.40	5.10	3.40	2.01	3.20	0.70	0.10	0.10
大陆下地壳	59.10	16.60	8.14	9.40	7.10	0.60	2.60	0.80	0.10	0.10
大洋地壳		16.60	10.50	11.30	7.70	0.14	2.80	1.50		0.13

注:(1)Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup>为全铁含量;(2)表中大陆上地壳、大陆中地壳、大陆下地壳及大洋地壳的元素丰度数据引自文献孙卉等,2009。

表4 喀纳斯群变质岩微量元素组成(10<sup>-6</sup>)Table 4 The trace element compositions (10<sup>-6</sup>) of the the metamorphic rocks in the Kanas Group

样号	Rb	Ba	Th	Co	Cu	Zn	Ni	Pb	Sr	Hf	Nb	Zr	Y	Zn
1	41.11	326.08	4.72	24.20	23.26	86.80	104.98	15.08	132.09	4.61	5.87	153.54	24.40	86.80
2	59.66	171.12	6.82	13.13	21.46	50.58	57.25	11.10	124.19	6.95	6.39	204.43	20.73	50.58
3	71.32	392.88	5.92	19.07	22.26	46.79	87.47	11.25	136.68	4.62	5.01	150.03	18.43	46.79
4	57.48	274.24	6.19	21.21	16.55	78.82	91.80	12.26	126.48	4.80	9.39	163.50	24.28	78.82
5	106.72	375.44	10.52	15.14	30.11	72.46	54.43	19.66	231.46	8.02	11.95	207.29	30.81	72.46
6	74.94	426.88	10.26	25.96	31.16	94.51	124.87	19.86	222.79	7.16	5.45	192.84	28.07	94.51
7	77.64	205.44	6.23	15.77	21.97	60.86	62.49	13.38	130.56	3.94	7.62	125.10	19.89	60.86
8	83.10	456.72	10.25	14.24	26.06	69.32	52.73	17.00	101.15	6.56	8.27	221.43	27.97	69.32
9	74.43	537.12	7.75	16.29	30.27	58.01	66.53	20.17	120.62	5.08	11.82	174.10	31.26	58.01
10	46.89	265.04	6.69	25.72	25.35	103.19	116.11	14.42	124.53	5.59	2.75	173.49	28.70	103.19
11	95.58	487.04	9.16	17.55	32.65	61.61	65.95	26.73	120.11	5.02	11.69	172.51	32.66	61.61
12	37.57	374.56	5.25	18.98	5.83	72.91	82.96	15.44	148.07	5.10	7.42	155.56	21.72	72.91
13	52.53	328.64	7.11	23.60	9.56	87.98	102.60	15.57	137.19	5.17	10.73	165.77	23.04	87.98
14	46.46	330.96	5.81	19.72	25.22	76.93	85.85	17.71	174.08	5.28	8.18	151.04	22.64	76.93
15	53.68	330.00	5.77	19.25	28.97	71.57	83.37	13.93	125.46	4.80	7.91	152.66	20.89	71.57
16	41.36	286.32	5.69	14.99	16.98	53.28	66.73	15.78	158.53	4.91	6.33	162.61	20.99	53.28

显著富集,而高场强元素 Ta、Nb、Sr、Ba 等大多为亏损状态,这反映出与岛弧岩浆活动相似的特征。其中, Pb 的显著正异常表现出大陆地壳微量元素分布特征(韩吟文等,2003), Sr 的亏损可能是因为斜长石在风化作用中 Sr 发生了丢失(杨敬奎,2014)。

### 3.3.3 稀土元素

研究区变质岩的稀土元素丰度详见表 5。其中,  $\sum \text{REE} = 70.94 \times 10^{-6} \sim 199.05 \times 10^{-6}$ ,  $(\text{La}/\text{Lu})_N = 2.95 \sim 8.71$ ,  $\delta \text{Eu} = 0.66 \sim 0.83$ , 呈现出负铕异常,球粒陨石标准化稀土分布模式为 LREE 富集、重稀土(HREE)比

较平坦,弱负 Eu 异常的右倾直线型(图 3)。 $\delta \text{Eu}$  的值小于 1,表明源区存在分异或其源区为 Eu、Ce 亏损区(Whitney et al.,1998), Eu 的异常主要取决于含钙造岩矿物(斜长石、含钙辉石等)的聚集和迁移。由于 Ca、Eu 两种元素晶体化学性质接近,在结晶变质过程中, Eu 会伴随 Ca 进入到斜长石之中。绝大多数样品的稀土元素球粒陨石标准化分布型式曲线都很相似,并且表现出几乎平行的特征,表明稀土含量的变化大致相同,总体为具有“铕谷”的两段式(许威,2014),反映了喀纳斯群变质岩中黑云斜长

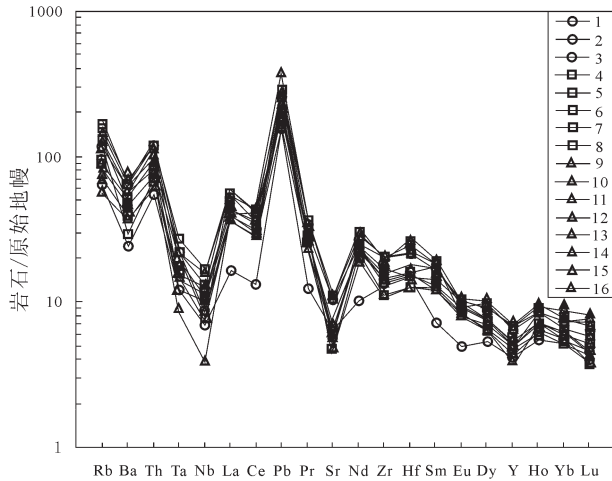


图2 微量元素原始地幔标准化蛛网图(原始地幔标准化数据引自 Thompson,1982)

Fig.2 Primitive mantle normalized trace element spidergram of the the metamorphic rocks in the Kanas Group (primitive mantle normalized data after Thompson R N,1982)

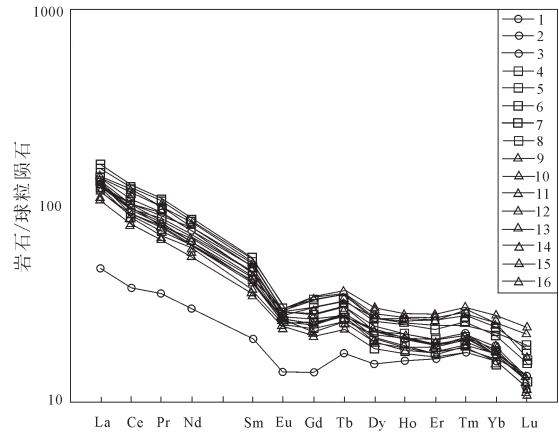


图3 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(球粒陨石数据引自 McLennan,1993)

Fig.3 Chondrite-normalized REE spider diagram (chondrite-normalized data after McLennan S M,1993)

片麻岩、红柱石石英片岩、黑云红柱石石英片岩原岩成分的相似性。对比北美页岩(NASC)标准化(Haskin et al.,1968)的稀土配分曲线(图4),可发现喀纳斯群变质岩样品具有较为平缓的配分曲线,具有一定程度的负Ce异常和轻微的正Eu异常,轻微的Eu正异常应该与岩石中斜长石含量相比北美页岩较高有关。表明喀纳斯群变质岩样品具有不同于北美页岩的稀土元素特征,推测可能有其他物质。

喀纳斯群变质岩样品的Th/Sc值为0.36~0.88,与形成于大洋岛弧、活动大陆边缘和被动大陆边缘的砂岩中的Th/Sc值(分别为0.15、2.59、3.06)明显不同,而与形成于大陆岛弧砂岩中的Th/Sc值(0.85)以及上地壳平均值(0.97)大致相似。另外,喀纳斯群变质岩样品中La/Sc比值为0.88~3.26,明显不同于形成于大洋岛弧、活动大陆边缘和被动大陆边缘的砂岩La/Sc值(分别为0.55、4.55、6.24),与形成于大陆岛弧的砂岩中的La/Sc值(1.82)及上地壳平均值(2.73)类似(沈瑞峰等,2015),这为后文中原岩构造环境的判别提供了证据。

## 4 讨论

### 4.1 原岩恢复

原岩恢复是变质岩研究的重要内容之一,通过原岩恢复可以了解喀纳斯群变质岩的原岩类型以

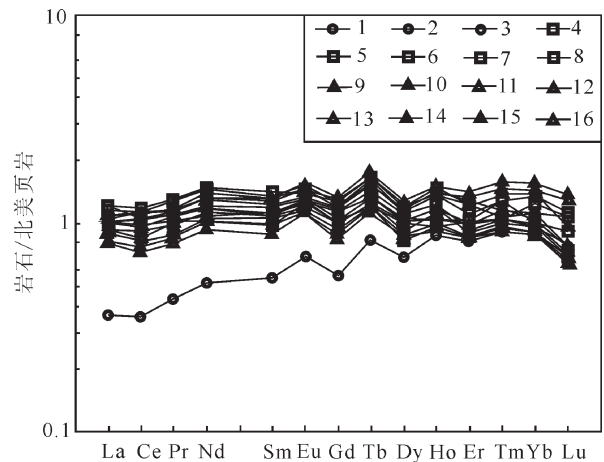


图4 喀纳斯群变质岩稀土元素北美页岩标准化配分曲线(北美页岩数据引自 Haskin et al.,1968)

Fig.4 NASC-normalized REE patterns of the metamorphic rocks in the Kanas Group (NASC-normalized data after Haskin et al.,1968)

及沉积环境。A-K图解法、西蒙南图解以及DF指数判别法是最为常用且较为有效的变质岩原岩恢复方法(王仁民等,1987;龙晓平等,2008)。根据表2中喀纳斯群变质岩主量元素氧化物的分析结果,可以计算出相关系数,列于表6中。喀纳斯群变质岩A-K图解法原岩恢复结果如图5所示,西蒙南图解法原岩恢复结果见图6。在A-K图解(图5)上,样品全部落入泥质粉砂岩区,DF指数也为负值(表



表5 喀纳斯群变质岩稀土元素组成( $10^{-6}$ )Table 5 Rare earth element compositions ( $10^{-6}$ ) of the metamorphic rocks in the Kanas Group

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	$\Sigma$ REE	$\delta$ Eu
1	29.01	55.72	7.43	29.75	6.35	1.58	5.26	1.05	5.74	1.20	3.35	0.57	3.29	0.34	150.64	0.81
2	32.29	59.28	7.73	30.33	6.38	1.48	5.11	0.98	5.19	1.05	2.89	0.46	2.66	0.28	156.11	0.77
3	11.40	23.50	3.39	13.89	3.21	0.82	2.90	0.66	4.00	0.91	2.73	0.46	2.77	0.30	70.94	0.81
4	31.80	61.90	8.16	33.36	7.07	1.67	5.82	1.16	6.09	1.25	3.43	0.56	3.11	0.33	165.71	0.77
5	36.23	73.46	9.93	39.48	8.24	1.69	6.73	1.33	6.99	1.48	4.24	0.70	4.01	0.46	194.97	0.67
6	33.89	66.90	8.93	35.45	7.51	1.74	6.23	1.22	6.57	1.40	3.89	0.66	3.67	0.40	178.46	0.76
7	29.13	53.21	6.99	28.01	5.61	1.42	4.64	0.91	4.73	1.00	2.82	0.45	2.61	0.28	141.81	0.83
8	37.83	75.74	10.19	40.11	8.29	1.68	6.88	1.34	6.79	1.43	3.89	0.64	3.75	0.49	199.05	0.66
9	30.83	63.83	8.71	35.14	7.48	1.53	6.19	1.26	7.04	1.52	4.43	0.73	4.31	0.56	173.56	0.67
10	33.70	75.65	9.07	36.43	7.81	1.79	6.33	1.21	6.76	1.46	4.18	0.72	4.31	0.43	189.85	0.75
11	33.31	69.96	9.55	38.61	7.95	1.72	6.89	1.38	7.61	1.59	4.58	0.78	4.63	0.60	189.16	0.69
12	25.69	49.25	6.44	25.50	5.38	1.37	4.48	0.90	4.99	1.08	3.08	0.51	2.95	0.32	131.94	0.83
13	29.29	58.56	8.06	32.49	7.00	1.61	5.70	1.10	5.77	1.17	3.19	0.53	2.98	0.32	157.77	0.76
14	30.86	58.13	7.76	31.19	6.65	1.71	5.66	1.12	5.83	1.16	3.23	0.51	2.98	0.32	157.11	0.83
15	28.31	54.32	7.18	29.14	6.28	1.52	5.16	1.02	5.34	1.08	2.88	0.48	2.75	0.29	145.75	0.79
16	25.33	50.65	6.78	27.99	5.90	1.46	4.84	0.98	5.14	1.05	2.94	0.50	2.70	0.28	136.54	0.81

6),显示为正常碎屑沉积岩特征。在西蒙南图解(图6)中可以进一步看出:除了1个黑云斜长片麻岩样品和2个红柱石片岩样品的投影点落入砂岩区域外,其余样品的投影点几乎都落入了泥岩区域。也就是说,所有样品均落入泥岩-砂岩区域,没有一个样品投影在火山岩区域。综上所述,喀纳斯群变质岩的原岩应该为泥砂质沉积岩,且以泥质沉积岩为主。

#### 4.2 源区风化沉积特征

上文通过几种方法推测出喀纳斯群变质岩的原岩为泥砂质沉积岩,而泥砂质沉积岩属于碎屑沉积岩范畴。已有研究显示,碎屑岩的化学组成容易受到源区岩石性质和化学风化作用强度的制约(沈瑞峰等,2015)。Nesbitt et al.(1989)在研究加拿大古元古代Huronian超群的碎屑岩时发现上地壳的化学风化作用能够使长石分解并形成黏土矿物,伴随活泼阳离子如 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 等的流失, $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Ti}^{4+}$ 等残留元素与活泼元素的比值会变大,而CIA(Chemical Index of Alteration,化学蚀变指数)就是通过元素比值的变化来反映源区风化程度的一种比较准确的方法。CIA < 70反映源区经历了在寒冷、干燥的条件下发生较弱的化学风化作用;CIA = 70~75,反映源区经历了温暖、湿润条件下的中等化

学风化作用;CIA > 75则说明源区经历了炎热、潮湿条件下的强烈化学风化作用(龙晓平等,2008)。由于黏土矿物比非黏土矿物含有较高的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,而 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 和 $\text{CaO}$ 含量较低,因此ICV(成分变异指数,index of compositional variability)可以反映碎屑岩的成分成熟度,判别碎屑岩石经历了活动大陆边缘初次循环还是被动大陆边缘多次再循环过程。因此,ICV > 1.0,指示原岩中含有少量黏土矿物,碎屑岩的成熟度差,代表活动大陆边缘的首次循环产物;反之,ICV < 1.0,指示原岩中含有大量的黏土矿物,碎屑岩的成熟度较高,反映了被动大陆边缘多次循环过程或者化学风化条件下的首次沉积过程(龙晓平等,2007)。

由表6,喀纳斯群变质岩样品CIA指数范围为67~77,平均值为73,除了2号(69)、5号(67)、7号(69)样品的CIA低于70,10号(76)、12(77)号样品的CIA值略大于75外,其余11个样品的CIA值均在70~75。上述CIA值的分布特征表明,喀纳斯群变质岩中的黑云斜长片麻岩和红柱石石英片岩的源区物质可能经历了寒冷—温暖、干燥—湿润条件下的较弱—中等程度的化学风化作用,而黑云红柱石石英片岩的源区物质大部分经历了相对温暖、湿润



表6 喀纳斯群变质岩原岩恢复相关系数计算结果

Table 6 The indexes for recovering protoliths of the metamorphic rocks in the Kanas Group

样号	A	K	DF	al	fm	c	alk	Si	(al+fm)-(c+alk)	CIA	ICV	原岩
1	74	56	-4	37.86	44.00	2.93	15.21	237	64	74	1.04	泥质岩
2	69	48	-4	36.67	39.23	6.60	17.50	395	52	69	1.10	砂质岩
3	73	61	-4	39.39	40.77	4.07	15.78	245	60	73	1.01	泥质岩
4	74	59	-5	36.54	44.89	4.63	13.95	242	63	74	1.08	泥质岩
5	67	51	0	37.24	36.11	7.58	19.07	222	47	67	1.07	泥质岩
6	74	51	-4	37.45	43.08	4.46	15.01	240	61	74	1.05	泥质岩
7	69	54	-5	35.25	41.60	5.80	17.35	425	54	69	1.15	砂质岩
8	74	67	-5	40.07	41.31	3.01	15.61	327	63	74	0.96	砂质岩
9	73	70	-3	40.31	39.63	4.17	15.88	222	60	73	0.97	泥质岩
10	76	59	-5	36.88	47.07	3.48	12.57	212	68	76	1.07	泥质岩
11	73	69	-3	39.85	40.08	4.24	15.82	223	60	73	0.98	泥质岩
12	77	56	-4	39.89	42.86	4.18	13.07	235	65	77	0.97	砂质岩
13	75	59	-4	38.02	43.67	4.22	14.08	232	63	75	1.03	泥质岩
14	72	49	-3	38.95	39.34	5.59	16.12	268	57	72	0.98	泥质岩
15	73	59	-4	38.68	41.50	4.20	15.63	248	60	73	1.02	泥质岩
16	73	47	-3	40.31	38.19	5.68	15.81	278	57	73	0.93	泥质岩

注:相关系数计算方法:(1)A-K图解法: $A=Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO+Na_2O+K_2O) \times 100$ ;  $K=K_2O/(Na_2O+K_2O) \times 100$ ;  $DF=-0.21 \times SiO_2-0.32 \times Fe_2O_3-0.98 \times MgO+0.55 \times CaO+1.46 \times Na_2O+0.54 \times K_2O+10.44$ 。(2)西蒙南图解法: $Si'=SiO_2/60$ ,  $al'=Al_2O_3/102$ ,  $fm'=Fe_2O_3/160+MgO/40+MnO/71$ ,  $c'=CaO/56$ ,  $alk'=Na_2O/62+K_2O/94$ ,  $Total=al'+fm'+c'+alk'$ ,  $al=al'/Total$ ,  $fm=fm'/Total$ ,  $c=c'/Total$ ,  $alk=alk'/Total$ ;(3)CIA-ICV图解法: $CIA=Al_2O_3/(AlO+CaO+Na_2O+K_2O)$ (其中氧化物为摩尔分数,  $CaO^*$ 为硅酸盐矿物中的CaO,上述数据已校正),  $ICV=(Fe_2O_3+K_2O+Na_2O+CaO+MgO+TiO_2)/Al_2O_3$ (摩尔分数)。算法引自汤中清,1989。

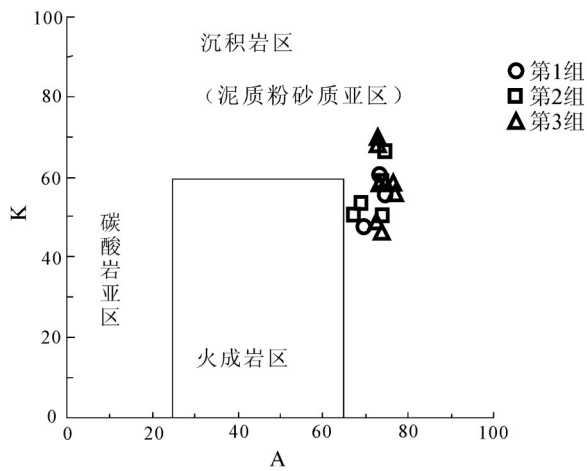


图5 A-K图解(底图据王仁民等,1987)  
Fig.5 A-K plot (after Wang Renmin et al.,1987)

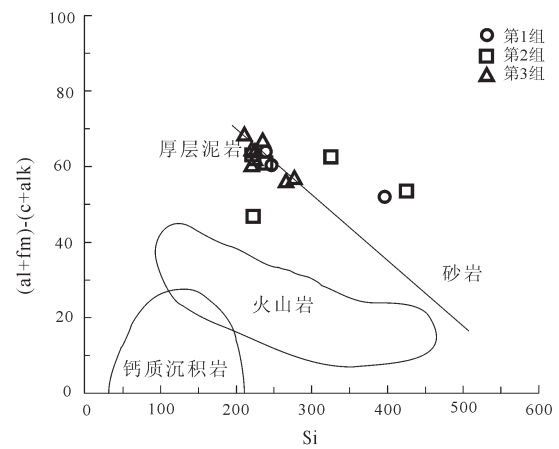


图6 喀纳斯群变质岩的西蒙南图解(底图据王仁民等,1987)  
Fig.6 Simonen plot of the metamorphic rocks in the Kanas Group (after Wang Renmin et al.,1987)

条件下的中等化学风化作用。

喀纳斯群变质岩样品中,ICV的值分布在0.93~1.15(表6),平均值为1.03,总体显示 $ICV > 1.0$ 。除了8号、9号、11号、12号、14号、16号样品的ICV值略小于1.0外,其余样品都大于1.0。指示其原岩中含有少量黏土矿物,碎屑岩的成熟度较差,并且大部分很可能代表活动大陆边缘首次直接沉积的产物(图7),而8号(CIA=74)、9号(CIA=73)、11号(CIA=73)、14号(CIA=72)、16号(CIA=73)很可能反映出经历了多次循环再沉积或在温暖、湿润条件下的中等化学风化条件下的首次沉积过程,且原岩中含有大量的黏土矿物,碎屑岩的成熟度较高;而样品12号(CIA=77)则可能是经历多次循环再沉积或在炎热、潮湿条件下的强烈化学风化条件下的首次沉积过程,原岩中含有大量的黏土矿物,碎屑岩的成熟度较高。

#### 4.3 源区物质组成

碎屑沉积岩的地球化学特征对确定他们的源区性质有重要的意义。碎屑沉积岩在风化、成岩、变质等地质作用过程中主要化学组成会受到一定的影响,但是抗风化能力较强的稀土和其他不活泼的微量元素可以进行有效的源区示踪(沈瑞峰等,2015)。在Hf-La/Th图解(图8)中,大多数样品落在了长英质源区,部分落入了由长英质源区向安山弧源区过渡的长英质/基性岩混合源区,远离被动边缘源区以及大洋岛弧源区,指示源区物质可能以中—酸性大陆岛弧火山岩为主。

#### 4.4 构造环境判定

由于碎屑沉积岩的地球化学特征主要取决于其物质组成,而物质组成又与其物源和大地构造环境有着非常密切的关系,因此碎屑沉积岩地球化学数据可以用来恢复构造背景(龙晓平,2007)。

沉积岩的沉积大地构造环境可以利用 $Al_2O_3$ 的含量与 $Al_2O_3+Fe_2O_3$ 的含量之比 $\omega(Al_2O_3)/\omega(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ 的值来判别,一般在大陆边缘环境其值为0.6~0.9,远洋深海环境其值为0.4~0.7,洋脊海岭环境(许威,2014)比值为0.1~0.40,研究区 $\omega(Al_2O_3)/\omega(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ 的值介于0.71~0.76,平均值0.73,该比值变化幅度相对很小,且该值落在大陆边缘环境判别区间的下限附近,恰好超过远洋深海环境区间的上限,充分反映了喀纳斯群变质岩的原岩主要沉积

于大陆边缘环境。另外,安达和博斯特伦等研究发现,沉积岩中的MnO含量与大洋深部热液作用有关, $TiO_2$ 含量则与陆源物质的介入有关,喀纳斯群变质岩样品的MnO/ $TiO_2$ 比值范围为0.09~0.18,表明其原岩具有大陆边缘沉积岩的特征。从表7中可以看出,喀纳斯群变质岩原岩形成环境的稀土元素值更接近于大陆岛弧的稀土元素特征。由Th-Hf-Co图解(图9),喀纳斯群变质岩的母岩大部分为处于岛弧环境内

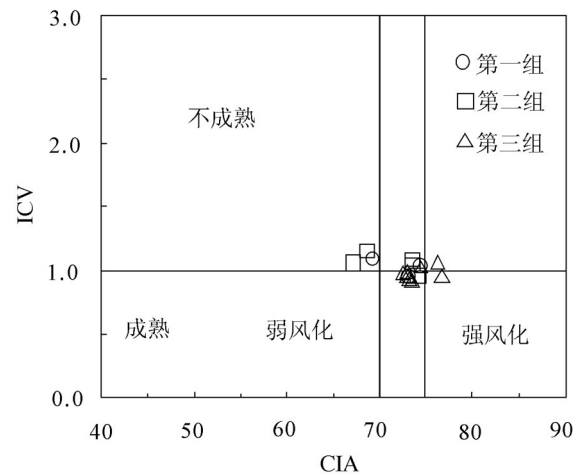


图7 喀纳斯群变质岩的ICV-CIA指数图解  
(据王仁民等,1987)

Fig.7 CIA-ICV plot of the metamorphic rocks in the Kanas Group (after Wang Renmin et al,1987)

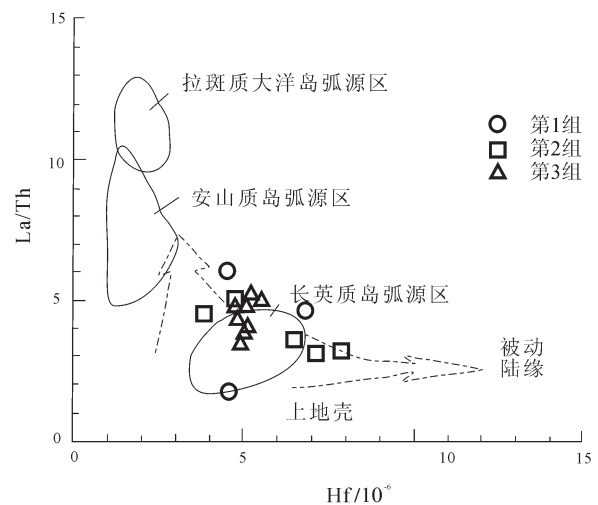


图8 喀纳斯群变质岩的Hf-La/Th图解(据龙晓平等,2008)  
Fig.8 Hf-La/Th plot of the metamorphic rocks in the Kanas Group (after Long Xiaoping et al.,2008)

的杂砂岩,个别为长石砂岩。

在  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O/Na}_2\text{O}$  图解中,除了2个红柱石石英片岩落在了被动大陆边缘范围内,其余样品都落入了活动大陆边缘区(图10a)。使用不活泼的微量元素研究沉积环境构造背景,利用  $\text{Th-Sc-Zr/10}$ (图10b)和  $\text{La-Th-Sc}$  图解(图10c)来进一步区分这套变质岩的原岩的构造背景。在  $\text{Th-Sc-Zr/10}$ (图10b)中,喀纳斯群变质岩样品全部落在大陆岛弧区;在  $\text{La-Th-Sc}$  图(图10c)中,有1个黑云斜长片麻岩样落在大洋岛弧区域内,大部分样品都落在大陆岛弧内,少数样品在大陆岛弧区域的边缘。这说明喀纳斯群变质岩不论片麻岩和片岩,它们的形成背景类似,可能沉积于靠近大陆岛弧的相关盆地。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。所以可以得出结论,喀纳斯群变质岩的地球化学特征指示其原岩为以泥质沉积岩为主的泥砂质沉积岩,其沉积环境为靠近活动大陆边缘的大陆岛弧构造环境,例如弧后盆地等,且源区物质主要为中-酸性大陆岛弧火山岩,并夹杂少量其他碎屑物。又因为上奥陶统东锡勒克组( $O_3d$ )不整合上覆于喀纳斯群之上,而东锡勒克组为一套中酸性火山岩含霏细岩、英安岩、安山岩、熔结凝灰岩等,可以推测喀纳斯群发生沉积作用与变质作用的时间应该在晚奥陶世之前。一些学者(刘源等,2013)通过对喀纳斯群的碎屑锆石及侵入到喀纳斯群的变质花岗岩的锆石  $\text{U-Pb}$  测年,显示喀纳斯群中碎屑锆石最年轻的年龄为  $(550\pm 18)\text{Ma}$ ,证明阿尔泰造山带存在前寒武大陆地壳基底。综上所述,推测喀纳斯群发生沉积作用与变质作用的时间在  $550\sim 523\text{Ma}$ ;并根据相关对应时间,推测喀纳斯群变质期次为加里东期。

表7 喀纳斯群变质岩原岩的构造环境判别

Table 7 The discrimination of protolith tectonic background of the metamorphic rocks in the Kanas Group

序号	构造环境	La	Ce	$\Sigma\text{REE}$	$\delta\text{Eu}$	$\text{LREE/HREE}$
1	大洋岛弧	$8\pm 1.7$	$19\pm 3.7$	$52\pm 10$	$1.04\pm 0.11$	$3.8\pm 0.9$
2	大陆岛弧	$27\pm 4.5$	$59\pm 8.2$	$146\pm 20$	$0.79\pm 0.13$	$7.7\pm 1.7$
3	活动大陆边缘	37	78	186	0.6	09.1
4	被动大陆边缘	39	85	210	0.56	8.5
5	喀纳斯群变质岩	30	59	159	0.76	6.33

注:序号1-4据许威(2014),序号5为喀纳斯群变质岩样品的均值。

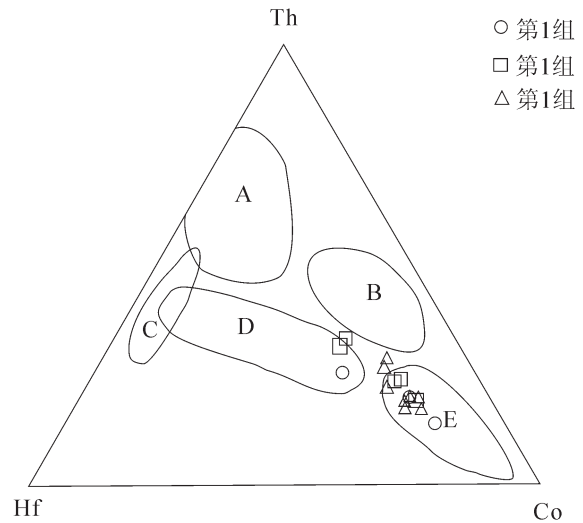


图9 喀纳斯群变质岩的Th-Hf-Co图解(据龙晓平,2007)  
A—长英质火山岩;B—页岩(克拉通盆地);C—石英岩(克拉通盆地);D—长石砂岩;E—杂砂岩(岛弧)

Fig.9 Th-Hf-Co plot of the metamorphic rocks in the Kanas Group (after Long Xiaoping, et al., 2007)  
A-Quartz-feldspathic volcanic rock; B-Shale (craton); C-Quartzite (craton); D-Arkose; E-Greywacke (island arc)

一些学者(柴凤梅等,2012;陈斌等,2001;袁超等,2005;胡霭琴等,2001;蔡克大,2007)对阿尔泰地区哈巴河群、康布铁堡组、阿勒泰组的碎屑沉积岩、浅变质碎屑沉积岩的地球化学特征、碎屑锆石  $\text{U-Pb}$  测年以及  $\text{Hf}$  同位素等研究结果也表明其形成于大陆岛弧相关的构造环境,并存在前寒武大陆基底(彭昌文等,1991),变质期次为加里东期(胡霭琴等,1994),与本文观点一致。

## 5 结 论

喀纳斯群变质岩的地球化学特征表明:

(1)该套变质岩的原岩主要为泥砂质沉积岩,包含少量火山岩或其风化剥蚀的碎屑。

(2)CIA 分布特征表明,喀纳斯群变质岩中的黑云斜长片麻岩和红柱石石英片岩的源区物质可能经历了寒冷—温暖、干燥—湿润条件下的较弱—中等程度的化学风化作用,而黑云红柱石石英片岩的源区物质大部分经历了相对温暖、湿润条件下的中等化学风化作用。

(3)喀纳斯群变质岩的ICV 指数总体大于1,反映了原岩中含有少量黏土矿物,碎屑岩的成熟度较

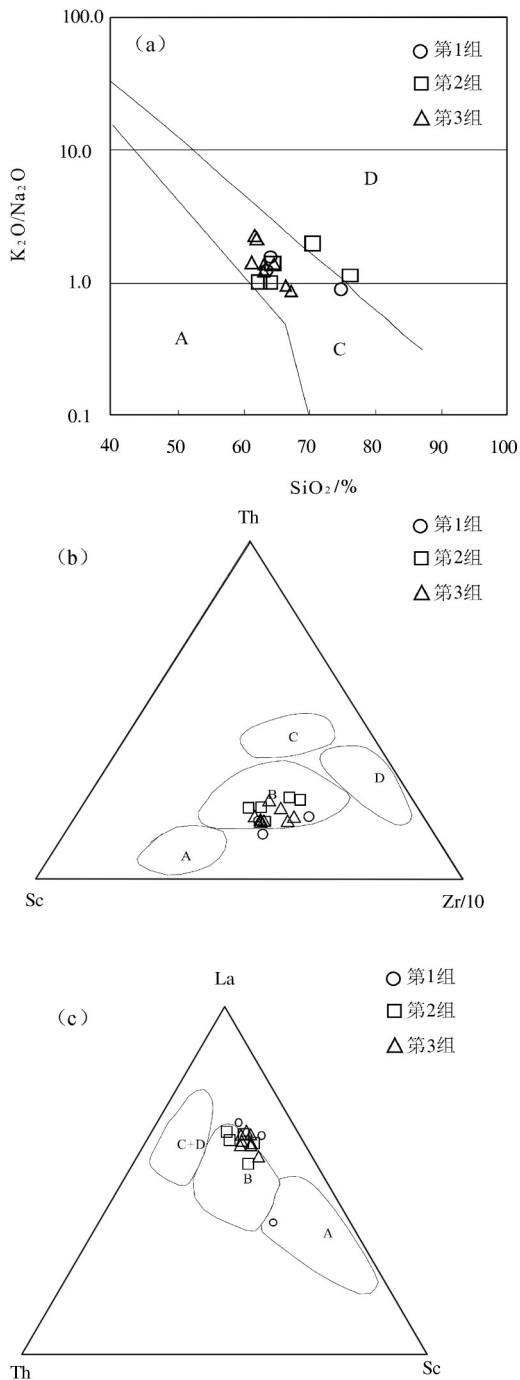


图 10 喀纳斯群变质岩原岩的沉积岩构造环境判别图解  
(据 Roser et al., 1986)

构造环境缩写: A—大洋岛弧; B—大陆岛弧; C—活动大陆边缘;  
D—被动大陆边缘

Fig.10 Discrimination diagrams of tectonic settings for the metamorphic rocks in the Kanas Group (after Roser et al., 1986).

Abbreviation for tectonic settings: A—Oceanic island arc; B—Active continental margin; C—Continental arc; D—Passive continental margin

差,并且大部分很可能代表活动大陆边缘首次直接沉积的产物,个别样品的  $ICV < 1$ , 指示原岩成熟度较高,经过多次循环的再沉积或在温暖—炎热、湿润—潮湿条件下的中等—强烈化学风化条件下的首次直接沉积过程。

(4)主要化学组成和微量元素组成反映了喀纳斯群变质岩的原岩为以泥质沉积岩为主的泥砂质沉积岩,其沉积环境为靠近大陆岛弧的活动大陆边缘构造环境,例如弧后盆地等,且源区物质主要为中—酸性大陆岛弧火山岩,并夹杂少量其他碎屑物。

(5)推测喀纳斯群发生沉积作用与变质作用的时间在 550~523 Ma;并根据相关对应时间,推测喀纳斯群变质期次为加里东期。

**致谢:**野外工作得到了新疆维吾尔自治区地质调查院的帮助和大力支持,审稿专家和责任编辑对本文提出了十分宝贵的修改意见和建议,在此一并表示衷心的感谢!

## References

- Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywacks and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92: 181–193.
- Cai Keda. 2007. Time of magmatism, Petrogenesis and the Tectonic Implication of the Western Chinese Altai Orogen, Northwest China[D]. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science( in Chinese with English abstract).
- Chai Fengmei, Mao Jingwen, Dong Lianhui. 2007. SHRIMP Zircon U–Pb dating for metarholites of the Kangbutiebao formation at the Abagong iron deposit in the southern margin of the Altai, Xinjiang and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82 (11): 1592– 1601 (in Chinese with English abstract).
- Chai Fengmei, Yang Fuquan, Liu Feng, Geng Xinxia, Jiang Liping, Lv Shuping, Guo Jijun, Chen Bin. 2012. Geochronology and genesis of meta-felsic volcanic rocks from the Kangbutiebao formation in Chonghuer basin on southern margin of Altai, Xinjiang[J]. *Geological Review*, 58(6): 1023– 1037 (in Chinese with English abstract).
- Chen Bin, Jahn B M, Wang Shiguang. 2012. Nd isotopic characteristics of Palaeozoic metamorphosed sedimentary rocks in Altai, Xinjiang, and its restriction on crustal evolution [J]. *Science in China(D)*, 31(3): 226–232 (in Chinese).
- Han Yinwen, Ma Zhendong. 2003. *Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 204– 206 (in Chinese).
- Haskin L A, Haskin M A, Frey F A. 1968. Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths[J]. *Origin and Distribution of the Elements*, 1: 889–911.



- He Guoqi, Han Baofu, Yue Yongjun. 1990. Tectonic division and crustal evolution of the Altai Orogenic Belt in China [J]. *Geoscience of Xinjiang*, 2(9): 9–20 (in Chinese with English abstract).
- He Guoqi, Li Maosong, Liu Dequan. 1994. Paleozoic crustal evolution and mineralization in Xinjiang of China[M]. Xinjiang People's Publishing House, Hongkong: Educational and Cultural Press LTD, 1994 (in Chinese).
- He Guoqi, Liu Dequan, Li Maosong. 1995. The five stages mode of crust development and metallogenic series of main orogenic belt in Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 13(2): 99–194 (in Chinese with English abstract).
- Hu Aiqin, Zhang Guoxin, Li Qixin, Fan Sikun, Zhang Qianfeng. 1994. Geological evolution and its relation to mineralization in the northern Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 12(1): 32–39 (in Chinese with English abstract).
- Hu Aiqin, Zhang Guoxin, Chen Yibing, Zhang Qianfeng. 2001. A model of division of the continental crust basement and the time scales of major geological events in the Xinjiang–based on studies isotopic geochronology and geochemistry[J]. *Xinjiang Geology*, 19(1): 12–19 (in Chinese with English abstract).
- Li Junjian, Zhang Feng, Ren Junping. 2015. Tectonic units in China–Mongolia border area and their fundamental characteristics[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(4): 636–661 (in Chinese with English abstract).
- Li Tiande, Poliyangsi B H. 2001. Tectonics and crustal evolution of Altai in China and Kazakhstan[J]. *Xinjiang Geology*, 19(1): 27–32 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yuan, Yang Jiayi, Hu Jianmin, Wang Yanfei, Wang Yuan. 2013. Restricting the deposition age of the Kanas Group of Altai tectonic belt and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 887–898 (in Chinese with English abstract).
- Long Xiaoping, Yuan Chao, Sun Min, Xiao Wenjiao, Lin Shoufa, Wang Yujing, Cai Keda. 2005. Geochemical characteristics and sedimentary environments of Devonian low metamorphic clastic sedimentary rocks in the southern margin of the Chinese Altai, North Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 718–732 (in Chinese with English abstract).
- Long Xiaoping. 2007. The Sedimentary Timing, Source Provenance and Tectonic Setting of Paleozoic Clastic Sedimentary Rocks in the Altai Orogen, Xinjiang[D]. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science (in Chinese with English abstract).
- McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation[J]. *Journal of Geology*, 101(2): 295–303.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299(5885): 715–717.
- Nesbitt H W, Young G M. 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles[J]. *Journal of geology*, 97(2): 129–147.
- Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian. 2009. Subdivision of tectonic units in China[J]. *Geology in China*, 36(1): 1–28 (in Chinese with English abstract).
- Pen Changwen, Gao Zhenjia, Lu Songnian. 1991. Division and Correlation of Precambrian system in Northern Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 9(4): 329–339 (in Chinese).
- Qu Guosheng, Chong Meiyong. 1991. Lead isotope geology and its tectonic implications in Altai, China[J]. *Geoscience*, 5(1): 100–110 (in Chinese with English abstract).
- Shen Ruifeng, Zhang Hui, Tang Yong, Lv Zhenghang. 2015. Geochemical characteristics of Paleozoic strata and its restriction on depositional environment in Altai orogen, north Xinjiang, China[J]. *Geochemica*, 44(1): 43–60 (in Chinese with English abstract).
- Roser B P, Korsch R J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone–mudstone suite using SiO<sub>2</sub> content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratio[J]. *Journal of Geology*, 94(5): 635–650.
- Sun Hui, Bian Shaozhi, Song Bairong, Zhao Zhonghua, Sun Shangyu, Zhang Hongbin. 2009. Geochemical characteristics of metamorphic rocks in Xinglongtai Buried Mountain, Liaohe depression, Bohai bay basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 31(6): 602–607 (in Chinese with English abstract).
- Tang Zhongqing. 1989. Method and program for identifying metamorphic rock[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 9(3): 63–67 (in Chinese).
- Thompson R N. 1982. Magmatism in the British Tertiary volcanic province[J]. *Scottish Journal of Geology*, 18: 49–107.
- Wang Lemin, Zhao Tongyang, Zhu Zhixian, Zheng Jiaxing, Tang Zhi, Han Qiong, Li Chongbo, Wang Tuo, Liu Jingwen. 2016. A discussion on Stratigraphy and Age of the “Kanas Group” in the Altai, Xinjiang[J]. *Journal of Stratigraphy*, 40(1): 67–75 (in Chinese with English abstract).
- Wang Renmin, He Gaopin, Chen Zhenzhen. 1987. The Plot for Recovering Protoliths of Metamorphic Rocks[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–199 (in Chinese with English abstract).
- Weaver C. 1989. Clays, Muds, and Shales: Development in Sedimentology[M]. Amsterdam: Elsevier, 1–210.
- Whitney P R, Olmsted J F. 1998. Rare earth element metasomatism in hydrothermal systems: the Willsboro–Lewis wollastonite ores, New York, USA[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(17): 2965–2977.
- Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Feng Yimin. 1992. Tectonic Evolution of Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–162 (in Chinese).
- Xu wei. 2014. The Geochemical Characteristics and Protolith Recovery of Yungou Formation Metamorphic Rock, Western Yunnan [D]. Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingkui. 2014. Study on the Geochemical Characteristics of the Metamorphic Series in Upper Section of Shigu Group,

- Northwestern Yunnan [D]. Kunming University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Yuan Chao, Sun Min, Xiao Wenjiao. 2005. Zircon U-Pb chronology and geochemistry of granites in southern margin of the Altai Mountains[C]//2005's National Symposium on Petrology and Geodynamics, Paper Abstracts. 418 (in Chinese).
- Yuan Chao, Sun Min, Long Xiaoping, Xia Xiaoping, Xiao Wenjiao, Li Xianhua, Lin Shoufa, Cai Keda. 2007. Constraining the deposition time and tectonic background of the Habahe Group of the Altai[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(7): 1635-1644 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Changqing, Xu Xuechun, He Zhengwei. 2003. Study on the characteristics and genesis of plagioclase-monzonitic granitic gneiss in Altai orogen[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 23(2):1-5 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Gang, Zhang Zhaochong, He Bin. 2006. SHRIMP zircon U-Pb dating of Gneisses in the Mayin Obo fault belt, northern Xinjiang, and its significance[J]. Geology in China, 33(6): 1209-1216 (in Chinese with English abstract).
- Zhuang Yuxun, Chen Bin. 1992. The formation and evolution of metamorphic tectonic dome of Altai orogenic belt Chinese[J]. Bulletin of the Institute of Geology Chinese Academy of Geological Sciences, 25:37-52 (in Chinese).
- Zhuang Yuxun. 1994. The metamorphism and tectonic thermal evolution of PTSt- gneiss dome formation mechanism of Altai Chinese orogenic zone[J]. Acta Geologica Sinica, 68 (1): 35-47 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 蔡克大. 2007. 阿尔泰山造山带西段岩浆活动的时代, 成因机制及其构造意义[D]. 中国科学院广州地球化学研究所.
- 柴凤梅, 毛景文, 董连慧. 2009. 新疆阿尔泰山南缘阿巴官铁矿区内康布铁堡组变质火山岩年龄及地质意义[J]. 地质学报, 82(11): 1592-1601.
- 柴凤梅, 杨富全, 刘锋, 耿新霞, 姜丽萍, 吕书君, 郭旭吉, 陈斌. 2012. 阿尔泰山南缘冲乎尔盆地康布铁堡组变质酸性火山岩年龄及岩石成因[J]. 地质论评, 58(6): 1023-1037.
- 陈斌, Jahn B M, 王式洗. 2001. 新疆阿尔泰山古生代变质沉积岩的Nd同位素特征及其对地壳演化的制约[J]. 中国科学(D辑), 31(3): 226-232.
- 韩吟文, 马振东. 2003. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 204-206.
- 何国琦, 韩宝福, 岳永君. 1990. 中国阿尔泰山造山带的构造分区和地壳演化[J]. 新疆地质科学, 2(9): 9-20.
- 何国琦, 李茂松, 刘德权. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 香港: 香港文化教育出版社.
- 何国琦, 刘德权, 李茂松. 1995. 新疆主要造山带地壳发展的五阶段模式及成矿系列[J]. 新疆地质, 13(2): 99-194.
- 胡霭琴, 张国新, 李启新, 范嗣昆, 张前锋. 1994. 新疆北部地质演化及其与成矿的关系[J]. 新疆地质, 12 (1): 32-39.
- 胡霭琴, 张国新, 陈义兵, 张前锋. 2001. 新疆大陆基底分区模式和主要地质事件的划分[J]. 新疆地质, 19(1):12-19.
- 李俊健, 张锋, 任军平. 2015. 中蒙边界地区构造单元划分[J]. 地质通报, 34(4): 636-661.
- 李天德, 波里扬斯基 B H. 2001. 中国和哈萨克斯坦阿尔泰山大地构造及地壳演化[J]. 新疆地质, 19(1):27-32.
- 刘源, 杨家喜, 胡健民, 王雁飞, 王媛. 2013. 阿尔泰山构造带喀纳斯群时代的厘定及其意义[J]. 岩石学报, 29(3): 887-898.
- 龙晓平, 袁超, 孙敏, 肖文交, 林寿发, 王毓婧, 蔡克大. 2005. 北疆阿尔泰山南缘泥盆系浅变质碎屑沉积岩地球化学特征及其形成环境[J]. 岩石学报, 24 (4): 718-732.
- 龙晓平. 2007. 新疆阿尔泰山古生代碎屑沉积岩的沉积时代, 物质来源及其构造背景[D]. 中国科学院广州地球化学研究所.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年. 2009. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 36(1): 1-28
- 彭昌文, 高振家, 陆松年. 1991. 新疆北部前寒武系划分和对比[J]. 新疆地质, 9(4): 329-339.
- 曲国胜, 崇美英. 1991 阿尔泰山造山带的铅同位素地质及其构造意义[J]. 现代地质, 5(1): 100-110.
- 沈瑞峰, 张辉, 唐勇, 吕正航. 2015. 阿尔泰山造山带古生代地层的地球化学特征及其对沉积环境的制约[J]. 地球化学, 44(1):43-60.
- 孙卉, 边少之, 宋柏荣, 赵中华, 孙尚宇, 张洪彬. 2009. 渤海湾盆地辽河拗陷隆台潜山变质岩地球化学特征[J]. 石油实验地质, 31 (6):602-607.
- 汤中清. 1989. 判别变质岩原岩方法及其程序[J]. 四川地质学报, 9 (3):63-67.
- 王乐民, 赵同阳, 朱志新, 郑加行, 唐智, 韩琼, 李崇博, 王拓, 刘静雯. 2016. 新疆阿尔泰山地区“喀纳斯群”的形成时代及其解体方案初论[J]. 地层学杂志, 40(1):67-75.
- 王仁民, 贺高品, 陈珍珠. 1987. 变质岩原岩图解判别法[M]. 北京: 地质出版社, 1-199.
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京: 地质出版社, 1-162.
- 许威. 2014. 滇西允沟岩组地球化学特征与原岩恢复[D]. 成都理工大学.
- 杨敬奎. 2014. 滇西北巴迪地区石鼓群上段变质岩系地球化学特征研究[D]. 昆明理工大学.
- 袁超, 孙敏, 肖文交. 2005. 阿尔泰山南缘花岗岩的锆石 U-Pb 年代学及其地球化学特征[C]. 2005 年全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要. 418.
- 袁超, 孙敏, 龙晓平, 夏小平, 肖文交, 李献华, 林寿发, 蔡克大. 2007. 阿尔泰山哈巴河群的沉积时代及其构造背景[J]. 岩石学报, 23[7]: 1635-1644.
- 周刚, 张招崇, 何斌. 2006. 新疆北部玛因鄂博断裂带中片麻岩锆石 U-Pb SHRIMP 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 33(6): 1209-1216.
- 郑常青, 徐学纯, 何政伟. 2003. 阿尔泰山造山带晚古生代斜长—二长花岗岩片麻岩特征及成因研究[J]. 矿物岩石, 23(2):1-5.
- 庄育勋, 陈斌. 1992. 中国阿尔泰山造山带递进变质构造穹窿的形成演化[J]. 中国地质科学院地质研究所所刊, 25:37-52.
- 庄育勋. 1994. 中国阿尔泰山造山带变质作用 PTSt 演化和热—构造—片麻岩穹窿形成机制[J]. 地质学报, 68 (1): 35-47.