

# 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\*

龙晓平<sup>1</sup> 袁超<sup>1</sup> 孙敏<sup>2</sup> 肖文交<sup>3</sup> 林寿发<sup>4</sup> 王毓婧<sup>1</sup> 蔡克大<sup>2</sup>

LONG Xiaoping<sup>1</sup>, YUAN Chao<sup>1</sup>, SUN Min<sup>2</sup>, XIAO Wenjiao<sup>3</sup>, LIN Shoufa<sup>4</sup>, WANG Yujing<sup>1</sup> and CAI KeDa<sup>2</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

2. 香港大学地球科学系, 香港薄扶林道

3. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈构造演化重点实验室, 北京 100029

4. 滑铁卢大学地球科学系, 滑铁卢 ON N2L 3G1, 加拿大

1. *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China*

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

3. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

4. *University of Waterloo, Department of Earth Sciences, Waterloo, ON N2L 3G1, Canada*

2008-01-20 收稿, 2008-04-05 改回.

**Long XP, Yuan C, Sun M, Xiao WJ, Lin SF, Wang YJ and Cai KD. 2008. Geochemical characteristics and sedimentary environments of Devonian low metamorphic clastic sedimentary rocks in the southern margin of the Chinese Altai, North Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4):718-732**

**Abstract** Devonian is a key period for the tectonic evolution of the Chinese Altai and several competitive models, e. g. active continental margins and passive continental margins, have been suggested for this region. These models were mainly based on studies of the Devonian volcanic rocks in the southern margin of the Chinese Altai, and geochemical research for the sedimentary rocks is still rare. In this paper, systematic geochemical study for the Devonian low-grade metamorphosed clastic rocks was conducted to constrain the tectonic background of this orogen. The major element data show that protoliths for the metaclastic rocks are dominated by argillaceous and arenaceous sedimentary rocks. Although differing in major element contents among rocks of various types, their low Chemical Index of Alteration ( $CIA < 75$ ), Plagioclase Index of Alteration (mean  $PIA = 70$ ) and Index of Compositional Variability ( $ICV \leq 1.0$ ) indicate relatively low maturity and weak chemical weathering for their source. The samples are moderately enriched in light REE ( $La_N/Yb_N = 2.88 \sim 9.90$ ) and show flat heavy REE with strong negative Eu anomalies ( $Eu/Eu^* = 0.45 \sim 0.89$ ). Most samples have high  $La/Sc$  ( $1 \sim 3$ ),  $La/Y$  ( $0.5 \sim 1$ ),  $Ti/Zr$  ( $10 \sim 35$ ) and low  $Sc/Cr$  ( $0.1 \sim 0.3$ ) ratios, which are similar to clastic rocks deposited in continental arc settings. In both  $La-Th-Sc$  and  $Th-Sc-Zr/10$  discriminate diagrams, almost all of the clastic rocks plot in the continental arc field. These geochemical characteristics are different from those of sedimentary rocks deposited in oceanic island arcs or passive continental margins and suggest a sedimentary environment related to continental island arcs for the Devonian clastic rocks in the southern margin of the Chinese Altai.

**Key words** Geochemistry; Clastic sedimentary rocks; Altai orogen; North Xinjiang; Tectonic setting

**摘要** 对于北疆阿尔泰山地区泥盆纪所处的大地构造环境, 目前仍旧存在不同观点。前人基于阿尔泰山南缘泥盆纪火山岩地球化学研究, 分别提出了活动大陆边缘和被动大陆边缘裂谷等不同构造观点。阿尔泰山造山带南缘的泥盆纪浅变质碎屑沉积岩地球化学研究表明, 该套浅变质碎屑沉积岩原岩主要为泥质或砂质沉积岩。尽管不同岩性样品主量元素含量不同, 但其化学蚀变指数(CIA)小于75, 成分变异指数(ICV)接近或小于1.0, 斜长石蚀变指数(PIA)平均70, 说明其源区物质比较新鲜, 成熟度相对较低, 化学风化作用较弱。同样, 不同岩性样品微量元素含量差别较大, 但表生过程中不活泼的微量元素比值却

\* 国家973项目(2007CB411308), 自然科学基金(40772130, 40572043), 香港RGC项目(HKU7040/04P), 香港大学研究项目(200711159058)和中国科学院知识创新工程领域前沿项目(GIGCX-07-03)资助成果。

第一作者简介: 龙晓平, 男, 1979年生, 博士, 助理研究员, 地球化学专业, E-mail: longxp@gig.ac.cn

比较一致,轻稀土(LREE)中度富集( $La_N/Yb_N = 2.88 \sim 9.90$ ),重稀土(HREE)比较平坦,并伴有明显的Eu负异常( $Eu/Eu^* = 0.45 \sim 0.89$ )。绝大多数样品具有高的La/Sc(1~3)、La/Y(0.5~1)和Ti/Zr(10~35),以及较低的Sc/Cr(0.1~0.3)比值,类似于大陆岛弧相关环境碎屑沉积物。在La-Th-Sc和Th-Sc-Zr/10构造环境判别图解中,除一千枚岩样品外,其他所有样品均落入大陆岛弧区。以上地球化学特征明显不同于大洋岛弧和被动陆缘沉积物,说明该套浅变质碎屑沉积岩可能沉积于活动大陆边缘的大陆岛弧相关环境,为认识阿尔泰山带泥盆纪岛弧增生构造演化过程提供了一个重要证据。

**关键词** 地球化学;碎屑沉积岩;阿尔泰山带;北疆;构造环境

**中图法分类号** P588.21, P595

北疆阿尔泰山带位于西伯利亚克拉通和华北-塔里木克拉通之间,地处中亚造山带的中部。目前,学术界对阿尔泰山带构造演化模式存在不同看法(黄汲清等,1990;肖序常等,1990;何国琦等,1995;陈哲夫等,1997;Windley *et al.*, 2002; Xiao *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2006; Yuan *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2007)。现有的构造模式可以概括为开合构造和岛弧增生两种基本模式,开合模式认为泥盆纪阿尔泰山地区处于拉张的裂谷构造环境(黄汲清等,1990;肖序常等,1992;何国琦等,1995;陈哲夫等,2002),而岛弧增生模式则认为这时期阿尔泰山处于俯冲消减相关构造环境(Sengör *et al.*, 1993; Xiao *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2006; Yuan *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2007)。上述分歧主要缘于对该区泥盆纪火山岩成因的不同认识。通过对阿尔泰山南缘火山岩的地球化学研究,前人分别得出了活动大陆边缘(李春昱等,1982;刘标峰,1984;牛贺才等,1999;Xu *et al.*, 2003;张海洋等,2004;陈汉林等,2006)和被动大陆边缘裂谷等截然不同的认识(韩宝福和何国琦,1991;陈毓川等,1996;牟传龙等,1996;陈哲夫,2002)。在该地区除了火山岩,泥盆纪还发育了一套浅变质的碎屑沉积岩(新疆维吾尔自治区地质矿产局,1993)。由于重结晶程度较高,传统的碎屑组成研究难以恢复其形成时的构造环境,因此这套浅变质碎屑沉积岩的构造环境研究未能引起足够的重视。

由于碎屑沉积岩包含了丰富的源区物质组成、构造环境及早期地壳生长演化的信息(Dickinson and Suczek, 1979; Cox *et al.*, 1995; Hofmann, 2005; Sugitani, *et al.*, 2006),其地球化学研究目前已经被广泛地应用于制约物源区特征(Taylor and McLennan, 1985; McLennan *et al.*, 1995),恢复沉积盆地构造环境(Bhatia, 1983; Roser and Korsch, 1988)和揭示碎屑沉积岩成因及古风化条件(Nesbitt and Young, 1982; McLennan *et al.*, 1990, 1995; Roser *et al.*, 2002)。尽管砂岩和泥岩由于比较均匀且微量元素含量较高,已经成为碎屑沉积岩地球化学研究的首选对象(Nance and Taylor, 1976; Condie, 1986; McLennan *et al.*, 2000; Roser *et al.*, 2002; Joo *et al.*, 2005),但近年来浅变质碎屑沉积岩也被广泛用于碎屑沉积物成因和地壳演化研究(McLennan *et al.*, 1995; Gao *et al.*, 1999)。因此,本文通过对阿尔泰山南缘泥盆纪浅变质碎屑沉积岩地球化学研究,深入探讨了这套岩石的成因及形成环境,为恢复阿尔泰山地区泥盆纪的大地构造背景提供一定的制约。

## 1 样品地质背景

北疆阿尔泰山带位于准噶尔盆地的北侧(肖序常等,1992),是中亚造山带的重要组成部分(Coleman, 1989)。近年来研究表明,中亚造山带是全球最大的显生宙巨型造山带之一,是由大量岛弧水平增生及幔源物质垂向增生的产物,其中包括了岛弧、海山及微陆块等地体(Sengör and Natal'in, 1996; Windley *et al.*, 2002; Khain *et al.*, 2003; Jahn, 2004; Dobretsov *et al.*, 2004; Kuzmichev *et al.*, 2005; Helo *et al.*, 2006)。目前对于是否将阿尔泰山带作为中亚造山带中的一个具有前寒武纪基底的微陆块,以及对阿尔泰山带早期的构造演化模式仍旧存在不同看法(肖序常等,1990;何国琦等,1995;李天德等,1996;Windley *et al.*, 2002; Xiao *et al.*, 2004; Sun *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2006; 李会军等,2006;龙晓平,2007)。阿尔泰山带内北西向断层比较发育,根据地层及岩浆岩发育情况将额尔齐斯断裂带以北部分,划分为四个构造带,边界断裂由南往北依次为特斯巴汗断裂、阿巴宫-库尔提断裂和库热克特断裂(图1)。北阿尔泰山与南阿尔泰山构造带类似,地层发育泥盆纪-石炭纪碎屑沉积岩及火山碎屑岩组合,岩浆岩以晚古生代的I型花岗岩为主。但在南阿尔泰山构造带出露有少量奥陶纪的花岗质岩石(Sun *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2006)。中阿尔泰山构造带发育大量的早古生代浅变质及未变质的碎屑沉积岩,主要为哈巴河群。该构造带岩浆岩以泥盆纪I型花岗岩为主(Yuan *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2006),仅在喀纳斯湖和禾木地区出露泥盆纪S型花岗岩(蔡克大,2007)。额尔齐斯构造带主要分布一套片麻岩系,早期作为石炭系地层,形成时代争议较大。更为详细的地质情况参见何国琦等(1990)及Windley *et al.* (2002)论著。

本次研究的泥盆纪浅变质碎屑沉积岩出露于南阿尔泰山构造带(图1),样品主要采自泥盆系康布铁堡组和阿勒泰组。前者为一套中酸性火山岩及其凝灰岩夹浅变质碎屑沉积岩,主要分布于康布铁堡及冲乎尔盆地东南,总厚度大于1670米,其中火山岩单颗粒锆石U-Pb年龄为 $407.3 \pm 9.2$  Ma(张进红等,2000);后者为一套浅变质的正常海相碎屑岩,局部为酸性火山岩及其凝灰岩夹灰岩透镜体,广泛分布于哈巴河-阿勒泰-富蕴一线,总厚度超过2000米,产大量的古生物化石,并在富蕴库尔提河中游角度不整合于前者之上

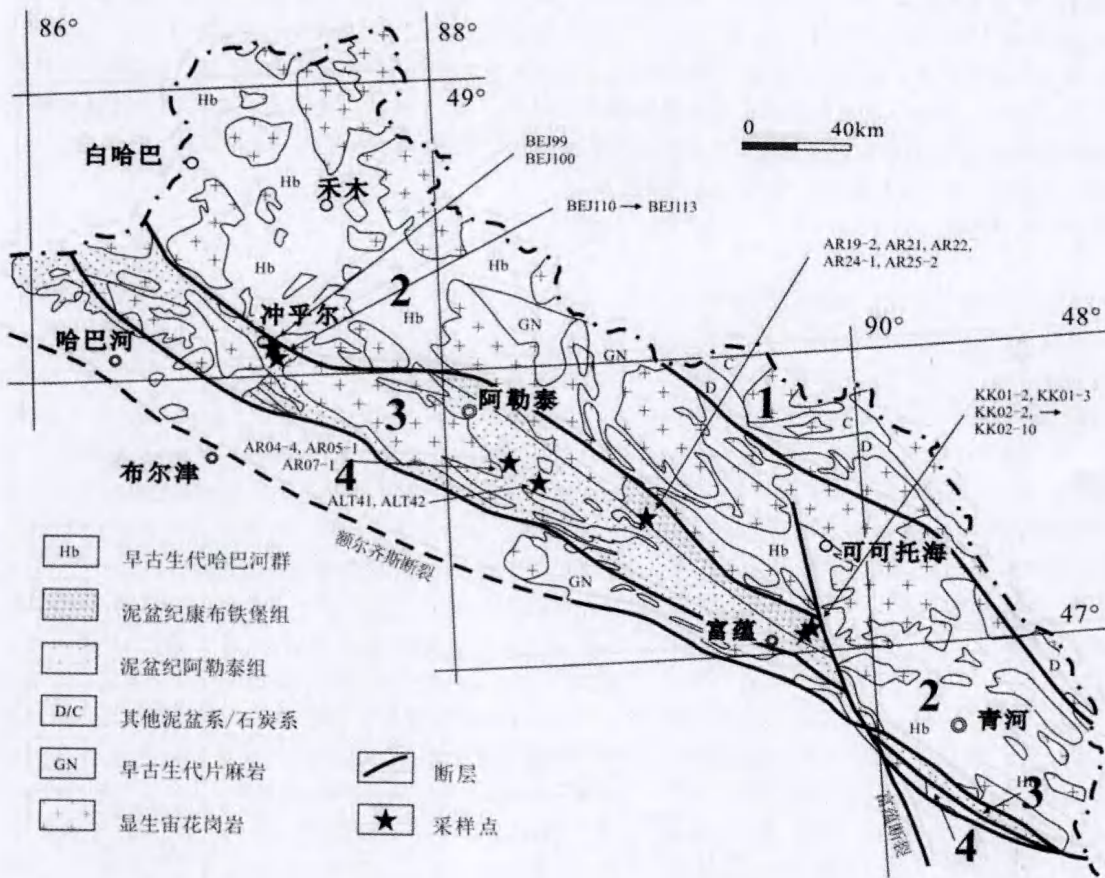


图1 阿尔泰山南缘浅变质碎屑沉积岩样品采样位置  
(据何国琦等,1990; Windley *et al.*, 2002; Yuan *et al.*, 2007; Long *et al.*, 2007 修改)

1 北阿尔泰构造带; 2 中阿尔泰构造带; 3 南阿尔泰构造带; 4 额尔齐斯构造带

Fig.1 Simplified geological map of the Chinese Altai orogen.

1, North Altai Terrane; 2, Central Altai Terrane; 3, South Altai Terrane; 4, Erqis Terrane.

(新疆维吾尔自治区区域地质表编写组, 1981; 新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993)。该套浅变质碎屑沉积岩区域上被大量晚古生代中-晚期的花岗岩侵入, 局部片理化或糜棱岩化(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993)。

## 2 样品描述及分析方法

采样位置如图1所示, 样品主要岩性为云母片岩、含绿泥石片岩和千枚岩, 样品新鲜。其中, 云母片岩为深灰色, 主要矿物为斜长石(30%~40%)、石英(35%~40%)和黑云母(<15%), 此外有少量微斜长石(<5%)、白云母(<5%)及磁铁矿(<2%), 两种云母定向排列形成片理(图2A), 部分样品中出现少量毛发状矽线石(图2B)。含绿泥石片岩为灰绿色, 具片状构造, 主要矿物为斜长石(30%~40%)、石英(35%~45%)和绿泥石(10%~15%), 此外有少量磁铁矿(<2%), 绿泥石形成片理(图2D)。千枚岩则为浅灰色, 具

千枚构造, 主要由细小的重结晶矿物石英(40%~60%)、黑云母(10%~20%)及少量斜长石(20%~30%)组成, 个别样品中出现自形的石榴石, 磁铁矿含量小于2%(图2C)。

样品的主量元素和微量元素分析均在香港大学地质系实验室完成。主量元素通过 Phillip XRF 分析测试, 微量元素的分析在 VG Elemental Plasma Quad Excell ICP-MS 上进行, 溶样和分析流程采用 Qi *et al.* (2000)。上述分析中主量元素的分析精度优于2%, 微量元素的分析精度可达5%, 主量元素分析结果列于表1中。

## 3 地球化学特征及原岩恢复

### 3.1 地球化学特征

阿尔泰山南缘浅变质碎屑沉积岩主量和微量元素分析结果见表1。康布铁堡组含绿泥石片岩具有相对集中的主量元素含量( $SiO_2 = 61\% \sim 64\%$ ,  $Al_2O_3 = 15\% \sim 18\%$ ,  $Fe_2O_3^T =$

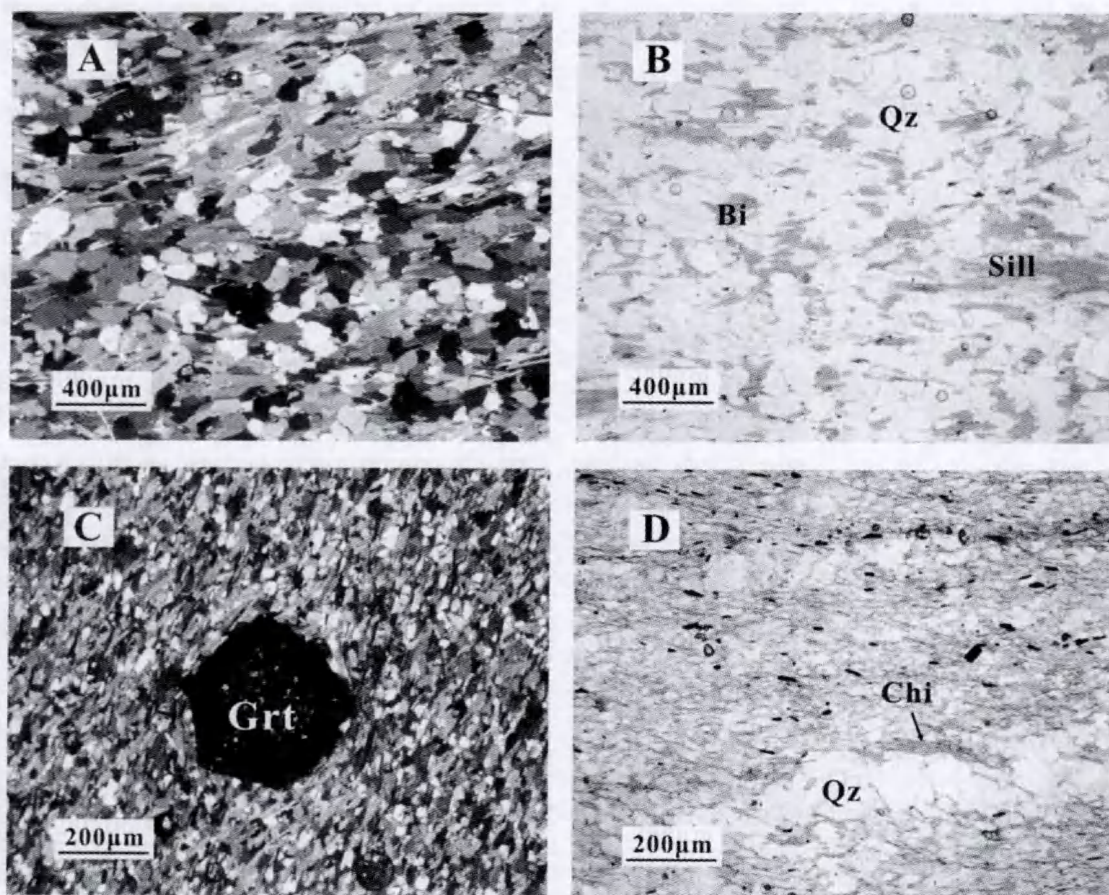


图2 阿尔泰南缘浅变质碎屑沉积岩岩石结构

照片说明: A 黑云母石英片岩, 鳞片状变晶结构; B 含矽线石黑云母石英片岩, 鳞片状变晶结构, 矽线石毛发状; C 含石榴石黑云母石英片岩, 鳞片状变晶结构, 粒状石榴石为变质矿物; D 含绿泥石片岩, 鳞片状变晶结构。上述样品重结晶程度非常高, 无残留的碎屑结构。矿物名称缩写: Qz, 石英; Bi, 黑云母; Sill, 矽线石; Grt, 石榴子石; Chi, 绿泥石。A, C 正交偏光; B, D 单偏光。

Fig.2 Textural characteristics of low metamorphic clastic sedimentary rocks from the South Altai Terrane.

7.5% ~ 8.0%, MgO = 3.3% ~ 3.7%, CaO = 0.6% ~ 1.1%, Na<sub>2</sub>O = 1.2% ~ 1.8%, K<sub>2</sub>O = 2.4% ~ 2.9%), 与后太古代澳大利亚页岩 (PAAS) (Taylor and McLennan, 1985) 具有一致的 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 K<sub>2</sub>O, 较低的 Na<sub>2</sub>O 和 CaO, 以及较高的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup> 和 MgO 含量, 接近上地壳的平均组成。该组云母片岩主量元素含量变化较大 (SiO<sub>2</sub> = 63% ~ 77%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 11% ~ 17%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup> = 3.5% ~ 6.2%, MgO = 0.8% ~ 3.4%, CaO = 0.7% ~ 3.8%, Na<sub>2</sub>O = 0.7% ~ 4.0%, K<sub>2</sub>O = 1.7% ~ 3.9%), 其 SiO<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>O、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup>、MgO 和 CaO 含量均不同程度低于上地壳平均值。千枚岩样品 SiO<sub>2</sub> 含量约 73%, 类似 SiO<sub>2</sub> 含量高的云母片岩, 其他氧化物含量变化较大 (表 1)。相比 PAAS, 康布铁堡组浅变质碎屑岩具有比较一致的高场强元素 (如 Nb、Ta、Zr、Hf、Y 等) 含量和大离子亲石元素 Sc、Th 和 U 含量, 以及较低的 Rb 和 Sr 含量。除个别云母片岩 (样品 BEJ111 和 BEJ113) 外, 其他康布铁堡组浅变质碎屑岩样品均呈明显的 LREE 富集 (La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> = 2.88 ~ 8.24), HREE 平坦, 并伴有明显的 Eu 负异常 (Eu/Eu\* = 0.45 ~

0.89)。在球粒陨石和 PAAS 标准化的稀土配分图解中, 康布铁堡组浅变质碎屑沉积岩的 REE 平均组成与活动大陆边缘及大陆岛弧杂砂岩配分模式一致 (图 3A 和 B)。

阿尔泰组云母片岩主量元素含量比较一致, 与 PAAS 相比具有较高的 SiO<sub>2</sub> (SiO<sub>2</sub> = 72% ~ 79%), 较低的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup>、MgO、CaO 和 Na<sub>2</sub>O 含量 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 10% ~ 13%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup> = 3.4% ~ 5.5%, MgO = 2.3% ~ 2.9%, CaO = 0.5% ~ 1.0%, Na<sub>2</sub>O = 0.2% ~ 1.2%)。阿尔泰组千枚岩样品中, 样品 AR05-1 和 AR07-1 主量元素组成类似该组的云母片岩, 而样品 AR21 和 AR22 则不同, 反而与 PAAS 主量元素组成完全一致 (表 1)。该组云母片岩和千枚岩具有比较一致的稀土配分模式, 呈明显的轻稀土 (LREE) 富集 (La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> = 4.29 ~ 9.90), 重稀土 (HREE) 比较平坦, 并伴有明显的 Eu 负异常 (Eu/Eu\* = 0.46 ~ 0.65), 类似于康布铁堡组浅变质碎屑沉积岩的稀土配分模式, 在球粒陨石和 PAAS 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 (图 3A 和 B)。

表1 阿尔泰山南缘浅变质碎屑沉积岩地球化学组成

Table 1 Geochemical composition of the low metamorphic clastic sedimentary rocks from the South Altai Terrane

所属地层	康布铁堡组													
岩性	云母片岩						含绿泥石片岩							
样品编号	BEJ99	BEJ100	BEJ110	BEJ111	BEJ112	BEJ113	KK01-2	KK01-3	KK02-2	KK02-3	KK02-4	KK02-5	KK02-6	KK02-7
SiO <sub>2</sub>	70.1	68.8	65.7	65.0	63.3	65.0	76.8	75.1	62.7	63.2	62.2	64.0	62.2	60.6
TiO <sub>2</sub>	0.60	0.69	0.77	0.57	0.67	0.59	0.45	0.50	0.71	0.71	0.72	0.72	0.68	0.82
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.3	14.5	15.5	16.4	17.3	16.2	10.7	12.2	16.7	16.5	16.5	16.2	16.6	17.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.50	4.18	5.27	5.99	6.16	5.84	4.26	4.60	7.79	7.87	7.61	7.51	7.86	8.03
MnO	0.09	0.09	0.06	0.06	0.06	0.06	0.04	0.06	0.17	0.16	0.17	0.16	0.11	0.09
MgO	0.79	0.90	2.82	3.42	3.32	3.35	1.94	2.08	3.47	3.65	3.55	3.37	3.30	3.46
CaO	3.03	3.80	3.08	0.71	1.27	0.91	0.82	0.88	0.88	0.82	1.11	0.65	0.85	0.98
Na <sub>2</sub> O	4.04	3.80	3.54	0.73	1.37	1.05	1.34	1.49	1.51	1.40	1.64	1.45	1.32	1.64
K <sub>2</sub> O	2.06	1.72	1.93	3.90	3.81	3.59	1.74	1.90	2.53	2.57	2.78	2.66	2.68	2.88
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.16	0.14	0.17	0.08	0.11	0.07	0.09	0.11	0.10	0.11	0.11	0.10	0.10	0.14
LOI	0.43	0.50	1.01	2.44	2.36	2.62	1.06	1.13	3.17	3.17	3.81	2.98	3.47	3.61
Total	99.2	99.2	99.9	99.3	99.7	99.3	98.8	99.6	99.1	99.5	99.5	99.1	98.5	99.2
Sc	11.2	13.6	11.1	8.18	9.83	8.35	7.01	12.1	19.0	10.5	18.9	17.2	10.1	19.3
Cr	14.9	4.26	101	101	103	96.8	43.8	76.6	122	64.3	116	109	56.5	117
Ni	8.55	6.08	43.5	47.9	47.6	50.6	9.70	20.9	45.8	14.6	46.0	42.7	14.1	41.9
Ga	15.4	16.7	20.9	20.2	21.1	19.2	12.1	14.9	22.9	20.3	21.1	20.7	20.9	22.8
Rb	73.0	61.3	112	118	118	118	75.8	84.6	107	108	119	108	105	114
Sr	84.8	134	204	57.2	87.9	71.2	103	118	175	170	154	165	140	140
Ba	309	239	104	601	477	512	228	346	403	361	403	383	409	368
Y	24.9	31.4	31.8	12.3	15.3	13.9	27.2	28.9	34.4	22.6	30.0	27.0	25.8	38.1
Zr	224	289	150	138	155	147	177	159	137	115	134	132	123	153
Nb	9.19	8.33	11.7	12.1	12.2	12.7	5.62	8.05	9.65	7.63	9.65	9.74	7.63	8.99
Hf	7.48	8.94	5.35	5.26	5.56	5.10	4.46	4.77	3.83	3.56	3.88	3.95	3.25	4.95
Ta	0.48	0.57	0.34	0.33	0.36	0.33	0.20	0.57	0.72	0.35	0.69	0.67	0.28	0.77
Pb	9.79	10.6	27.3	15.2	19.7	15.9	4.44	5.27	15.8	13.7	22.6	16.0	12.9	15.1
Th	9.48	8.04	14.5	10.7	9.07	10.3	9.40	10.1	10.9	8.46	9.96	11.2	10.0	11.9
U	1.59	2.40	1.86	1.52	2.42	1.47	2.54	2.97	1.87	1.51	1.96	1.79	1.73	2.88
La	12.3	23.2	104	18.0	23.9	11.7	24.6	26.0	25.7	22.1	22.4	25.7	24.4	28.7
Ce	24.6	41.9	178	28.0	38.1	30.3	53.4	56.3	55.5	43.5	49.5	58.6	48.5	61.7
Pr	2.92	5.67	25.1	2.39	5.11	2.35	5.89	6.44	6.19	4.52	5.37	6.65	5.07	6.83
Nd	12.0	23.9	101	9.40	19.6	9.10	24.3	25.2	24.4	20.6	21.5	26.0	22.4	27.8
Sm	2.99	5.40	19.0	1.77	3.73	1.69	5.11	5.25	5.42	4.13	4.84	5.37	4.48	5.89
Eu	0.68	1.17	2.06	0.55	0.72	0.52	0.84	0.98	0.94	0.71	0.81	0.96	0.76	1.00
Gd	2.58	4.80	10.1	2.05	4.21	1.91	4.45	4.15	4.14	3.83	3.81	4.05	4.36	4.88
Tb	0.52	0.88	1.39	0.32	0.63	0.30	0.59	0.68	0.73	0.59	0.67	0.66	0.54	0.83
Dy	3.97	6.08	7.66	2.29	3.94	2.20	4.12	4.18	4.77	3.91	4.25	4.03	3.84	5.26
Ho	0.98	1.36	1.47	0.57	0.92	0.57	0.90	0.80	1.01	0.89	0.84	0.78	0.95	1.05
Er	2.98	3.70	4.17	1.97	2.39	1.91	2.66	2.35	2.85	2.02	2.47	2.39	2.48	2.98
Tm	0.49	0.55	0.62	0.33	0.36	0.34	0.33	0.33	0.44	0.45	0.38	0.35	0.42	0.49
Yb	3.06	3.58	3.65	2.18	2.47	2.18	2.34	2.26	2.98	2.36	2.53	2.36	2.37	3.28
Lu	0.50	0.58	0.59	0.37	0.41	0.37	0.37	0.35	0.45	0.34	0.41	0.38	0.36	0.49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	0.14	0.12	0.12	0.24	0.22	0.22	0.16	0.16	0.15	0.16	0.17	0.16	0.16	0.16
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0.51	0.45	0.54	5.37	2.79	3.42	1.30	1.28	1.68	1.84	1.70	1.83	2.03	1.76
CIA	50	49	53	71	67	69	66	67	71	71	68	72	72	70
PIA	50	49	54	83	74	79	70	71	77	78	74	79	79	76
ICV	0.98	1.04	1.12	0.93	0.96	0.94	0.99	0.94	1.01	1.03	1.05	1.01	1.00	1.01
Th/U	5.96	3.35	7.77	7.04	3.75	7.00	3.70	3.39	5.84	5.60	5.08	6.26	5.78	4.14
Rb/Sr	0.86	0.46	0.55	2.07	1.35	1.66	0.74	0.72	0.61	0.64	0.77	0.65	0.75	0.81
La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	2.88	4.65	20.4	5.92	6.96	3.84	7.55	8.24	6.20	6.72	6.35	7.82	7.39	6.28
Eu/Eu*	0.75	0.70	0.45	0.89	0.55	0.88	0.54	0.64	0.61	0.55	0.58	0.63	0.53	0.57
ΣREE	71	123	458	70	106	65	130	135	136	110	120	138	121	151

续表 1

Continued Table 1

岩性	康布铁堡组					阿勒泰组								页岩
	含绿泥石片岩			千枚岩		云母片岩			千枚岩		PAAS			
样品编号	KK02-8	KK02-9	KK02-10	AR24-1	AR25-2	ALT41	ALT42	AR04-4	ARI9-2	AR05-1		AR07-1	AR21	AR22
SiO <sub>2</sub>	61.8	64.4	64.4	73.0	73.6	78.7	71.9	75.2	77.0	79.0	76.4	62.4	62.6	62.8
TiO <sub>2</sub>	0.72	0.65	0.72	0.50	0.47	0.40	0.57	0.51	0.52	0.34	0.32	0.75	0.77	1.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.0	15.3	16.1	10.9	11.6	9.53	12.6	11.2	9.97	9.36	11.9	16.9	16.6	18.9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.91	7.50	7.80	6.87	4.38	3.42	4.56	4.43	5.49	3.24	2.70	7.07	6.99	6.50
MnO	0.13	0.17	0.15	0.07	0.17	0.12	0.18	0.15	0.03	0.06	0.05	0.14	0.08	0.11
MgO	3.46	3.59	3.34	1.62	0.89	2.32	2.90	2.85	2.52	1.64	1.14	3.13	3.15	2.20
CaO	0.78	0.73	0.72	0.67	2.32	0.48	0.98	0.64	0.56	0.47	0.49	2.70	3.87	1.30
Na <sub>2</sub> O	1.75	1.27	1.49	1.12	2.57	0.58	1.18	0.49	0.16	1.31	3.13	1.48	1.95	1.20
K <sub>2</sub> O	2.53	2.70	2.46	4.05	1.84	2.92	2.89	2.74	1.96	2.18	2.01	3.20	2.46	3.70
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.10	0.09	0.11	0.04	0.08	0.00	0.02	0.04	0.16	0.27	0.02	0.13	0.13	0.16
LOI	3.08	3.10	2.93	0.57	2.19	1.04	1.39	1.05	0.73	0.97	0.60	1.37	0.93	
Total	98.6	98.9	99.5	98.8	99.7	99.5	99.3	98.9	98.7	98.5	98.5	98.7	98.9	99.9
Sc	9.60	19.3	18.4	5.99	4.99	5.87	7.18	12.2	7.71	7.69	10.1	11.4	9.86	16
Cr	58.9	117	113	17.7	2.48	48.3	55.3	46.2	44.3	30.3	2.63	54.5	55.6	110
Ni	14.4	47.6	42.0	6.12	4.56	8.32	18.1	5.80	12.3	16.6	5.30	15.5	13.8	55
Ga	19.4	21.4	20.0	14.0	20.1	12.6	16.2	15.8	12.8	14.5	14.8	22.8	19.3	20
Rb	99.2	125	105	197	72.9	77.9	72.3	96.2	99.1	84.8	81.3	163	135	160
Sr	162	147	172	42.4	84.5	32.7	56.0	63.4	30.9	114	100	136	171	200
Ba	296	375	358	210	231	188	266	263	193	393	235	368	245	650
Y	22.2	27.4	25.4	34.8	70.3	10.9	16.8	20.3	20.3	29.4	48.1	39.3	33.7	27
Zr	117	121	128	171	424	87.9	128	130	149	120	232	184	155	210
Nb	7.58	8.32	8.56	7.58	12.8	9.63	14.0	14.1	7.78	13.1	9.48	11.1	10.8	19
Hf	3.51	3.43	3.64	4.26	10.4	3.19	4.36	3.74	3.91	3.84	7.05	5.50	4.28	
Ta	0.30	0.57	0.63	0.23	0.49	0.21	0.28	0.93	0.30	0.92	0.70	0.49	0.40	
Pb	14.3	14.7	15.0	3.63	8.35	18.2	22.6	22.8	3.69	35.1	4.50	17.2	21.1	20
Th	8.05	8.64	9.76	6.29	5.04	6.22	8.38	8.46	8.19	10.1	13.4	12.6	10.4	14.6
U	1.69	1.64	1.60	1.06	2.19	1.23	1.77	1.54	2.38	2.38	3.15	2.68	2.09	3.1
La	21.6	19.8	23.1	21.2	29.1	16.5	28.4	20.4	20.2	23.8	28.5	27.4	27.8	38
Ce	46.0	45.0	53.0	46.2	69.7	33.4	53.1	45.6	47.6	55.5	67.1	66.1	58.6	80
Pr	4.57	4.67	5.54	5.15	8.50	3.60	5.78	4.56	4.26	5.37	7.52	7.49	6.05	8.83
Nd	21.9	19.5	21.8	21.8	38.3	14.1	22.9	17.8	20.7	21.0	29.4	28.7	24.7	33.9
Sm	4.27	4.09	4.77	5.12	8.77	2.70	4.09	3.57	4.04	4.52	6.59	6.12	4.99	5.60
Eu	0.78	0.76	0.85	0.84	1.74	0.47	0.67	0.65	0.76	0.69	0.87	1.05	1.01	1.10
Gd	4.02	3.39	3.74	4.91	10.0	3.02	4.66	2.82	4.18	3.74	5.05	5.62	4.59	4.66
Tb	0.54	0.57	0.60	0.76	1.54	0.46	0.69	0.47	0.60	0.62	0.91	0.82	0.66	0.77
Dy	4.04	3.86	3.77	5.42	11.6	2.86	4.29	2.93	3.91	4.00	6.39	6.13	4.93	4.40
Ho	0.86	0.77	0.72	1.20	2.75	0.55	0.75	0.58	0.84	0.80	1.37	1.55	1.14	0.99
Er	2.35	2.43	2.13	3.02	6.97	1.40	2.18	1.76	2.13	2.40	4.31	3.65	3.00	2.85
Tm	0.34	0.36	0.30	0.52	1.15	0.21	0.32	0.27	0.32	0.35	0.67	0.60	0.49	0.40
Yb	2.24	2.44	2.14	3.41	7.19	1.39	2.06	1.70	1.98	2.35	4.77	4.25	3.06	2.80
Lu	0.35	0.38	0.35	0.59	1.12	0.23	0.33	0.28	0.30	0.37	0.74	0.61	0.53	0.43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	0.15	0.18	0.15	0.37	0.16	0.31	0.23	0.25	0.20	0.23	0.17	0.19	0.15	0.20
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1.45	2.13	1.65	3.62	0.72	5.01	2.45	5.59	12.3	1.66	0.64	2.16	1.26	3.08
CIA	71	71	71	59	53	66	65	69	75	64	59	61	56	69
PIA	77	78	78	68	53	78	72	81	86	70	62	65	58	77
ICV	1.01	1.07	1.03	1.37	1.08	1.06	1.04	1.04	1.12	0.98	0.82	1.08	1.16	0.84
Th/U	4.76	5.27	6.10	5.93	2.30	5.05	4.72	5.49	3.44	4.25	4.26	4.68	4.97	4.71
Rb/Sr	0.61	0.85	0.61	4.63	0.86	2.38	1.29	1.52	3.21	0.74	0.81	1.20	0.79	0.80
La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	6.92	5.82	7.73	4.46	2.90	8.55	9.90	8.59	7.33	7.26	4.29	4.63	6.53	9.73
Eu/Eu*	0.58	0.62	0.62	0.51	0.57	0.51	0.47	0.63	0.57	0.51	0.46	0.55	0.65	0.66
ΣREE	114	108	123	120	198	81	130	103	112	125	164	160	142	185

备注：CIA = [ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / ( Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + CaO \* + Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O ) ] × 100 和 PIA = [ ( Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - K<sub>2</sub>O ) / ( Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + CaO \* + Na<sub>2</sub>O - K<sub>2</sub>O ) ] × 100，  
 其中 CaO \* 仅代表硅酸盐矿物中的 Ca，氧化物为摩尔百分含量；ICV = ( Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O + CaO + MgO + TiO<sub>2</sub> ) / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>；  
 PAAS 据 Taylor and McLennan (1985)；Eu/Eu\* = 2 × Eu<sub>N</sub> / ( Sm<sub>N</sub> + Gd<sub>N</sub> )

表2 阿尔泰山南缘浅变质碎屑岩原岩恢复相关系数计算结果

Table 2 The indexes for recovering protoliths of low metamorphic rocks from the South Altai Terrane

样品编号	岩性	A	K	DF	al	fm	c	alk	Si	al + fm - c - alk	原岩
康布铁堡组											
BEJ99	云母片岩	61	34	2	40.56	18.67	15.63	25.14	338	18	火山岩
BEJ100	云母片岩	61	31	2	38.96	20.75	18.52	21.76	313	19	火山岩
BEJ110	云母片岩	64	35	0	36.06	32.53	13.02	18.39	259	37	泥质岩
BEJ111	云母片岩	75	84	-5	41.43	41.58	3.25	13.73	280	66	泥质岩
BEJ112	云母片岩	73	74	-3	40.77	38.72	5.44	15.07	254	59	泥质岩
BEJ113	云母片岩	75	77	-4	41.00	40.64	4.17	14.20	279	63	泥质岩
KK01-2	云母片岩	73	56	-6	39.95	39.11	5.60	15.34	489	58	砂质岩
KK01-3	云母片岩	74	56	-5	41.18	38.11	5.43	15.28	432	59	砂质岩
KK02-2	含绿泥石片岩	77	63	-5	39.30	44.66	3.76	12.28	250	68	泥质岩
KK02-3	含绿泥石片岩	78	65	-5	38.71	45.86	3.50	11.93	252	69	泥质岩
KK02-4	含绿泥石片岩	75	63	-4	38.22	43.90	4.67	13.21	244	64	泥质岩
KK02-5	含绿泥石片岩	77	65	-5	39.47	44.80	2.88	12.84	265	69	泥质岩
KK02-6	含绿泥石片岩	77	67	-5	39.75	44.42	3.70	12.13	253	68	泥质岩
KK02-7	含绿泥石片岩	76	64	-4	39.70	43.18	4.02	13.10	232	66	泥质岩
KK02-8	含绿泥石片岩	77	59	-4	39.46	44.22	3.29	13.03	243	67	泥质岩
KK02-9	含绿泥石片岩	77	68	-5	37.71	46.67	3.27	12.35	270	69	泥质岩
KK02-10	含绿泥石片岩	77	62	-5	39.02	45.36	3.18	12.43	266	69	泥质岩
AR24-1	千枚岩	65	78	-4	34.67	41.51	3.90	19.93	396	52	砂质岩
AR25-2	千枚岩	63	42	-1	38.48	26.86	14.02	20.65	415	31	砂质岩
BJ98-08 *	片岩	63	28	2	37.04	26.65	20.92	15.39	239	27	火山岩
BJ98-09 *	片岩	76	59	-3	36.79	46.61	4.23	12.37	156	67	泥质岩
BJ98-14 *	板岩	63	24	1	33.93	32.85	16.30	16.92	238	34	火山岩
阿勒泰组											
ALT41	云母片岩	71	83	-7	38.16	41.83	3.51	16.50	536	60	砂质岩
ALT42	云母片岩	71	71	-5	38.33	40.83	5.43	15.41	371	58	泥质岩
AR04-4	云母片岩	74	85	-7	38.21	44.88	3.98	12.92	437	66	砂质岩
AR19-2	云母片岩	79	92	-8	37.13	50.17	3.80	8.90	488	75	砂质岩
AR05-1	千枚岩	70	62	-5	40.46	36.30	3.70	19.54	580	54	砂质岩
AR07-1	千枚岩	68	39	-2	44.79	24.21	3.36	27.64	490	38	砂质岩
AR21	千枚岩	70	68	-3	37.63	38.27	10.95	13.15	236	52	泥质岩
AR22	千枚岩	67	56	-2	35.61	36.64	15.14	12.62	229	44	泥质岩
BJ98-04 *	石英片岩	69	48	-4	41.35	31.22	7.62	19.81	511	45	砂质岩
BJ98-05 *	石英片岩	68	40	-8	44.78	25.06	3.51	26.65	1873	40	砂质岩
BJ98-06 *	石英片岩	68	25	-7	41.80	27.16	7.71	23.34	1289	38	砂质岩
BJ98-07 *	片岩	79	78	-4	43.69	41.37	1.74	13.20	251	70	泥质岩

备注: 标注星号的样品均来自 Chen and Jahn (2002), 相关系数计算方法: 西蒙南图解的  $Si' = SiO_2/60$ ,  $al' = Al_2O_3/102$ ,  $fm' = Fe_2O_3 T/160 + MgO/40 + MnO/71$ ,  $c' = CaO/56$ ,  $alk' = Na_2O/62 + K_2O/94$ ,  $Total = al' + fm' + c' + alk'$ ,  $al = al'/Total$ ,  $fm = fm'/Total$ ,  $c = c'/Total$ ,  $alk = alk'/Total$ ; A - K 图解法的  $A = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O) \times 100$ ,  $K = K_2O / (Na_2O + K_2O) \times 100$ ;  $DF = -0.21 \times SiO_2 - 0.32 \times Fe_2O_3 T - 0.98 \times MgO + 0.55 \times CaO + 1.46 \times Na_2O + 0.54 \times K_2O + 10.44$ , 转引自王仁民等 (1987) 专著。

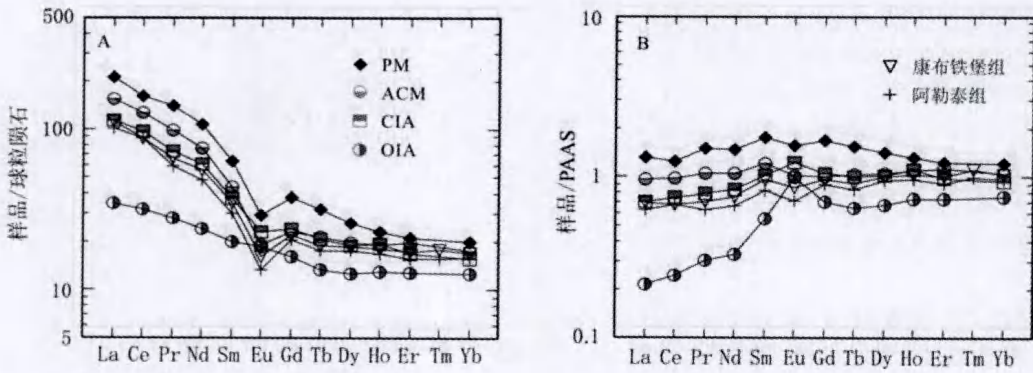


图3 阿尔泰山南缘浅变质碎屑沉积岩球粒陨石标准化蛛网图

(球粒陨石标准值引自 Sun and McDonough, 1989; 代表性构造环境碎屑沉积岩平均值来自 Bhatia, 1986)

平均值缩写: 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杂砂岩

Fig. 3 Chondrite-normalized and PAAS-normalized REE patterns of low metamorphic clastic sedimentary rocks from the South Altai Terrane.

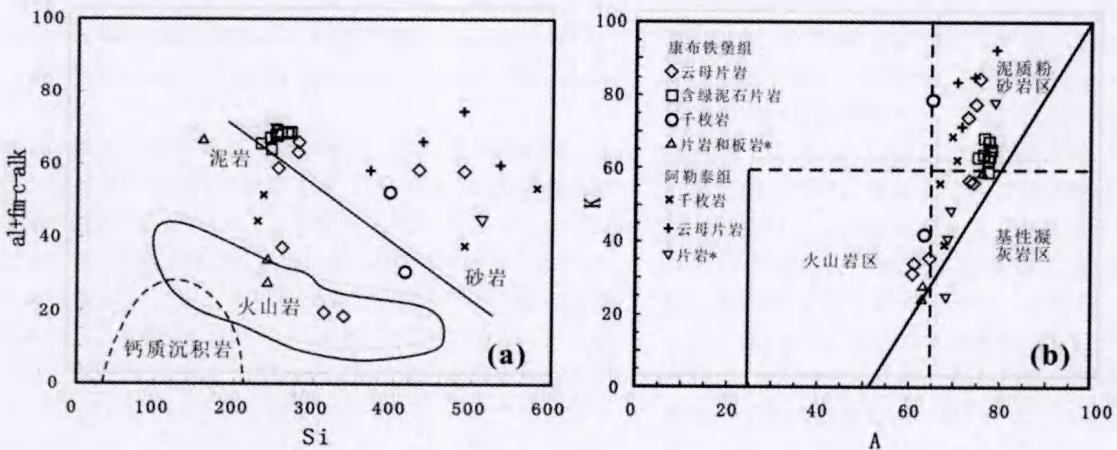


图4 阿尔泰山南缘浅变质岩西蒙尼图解和 A-K 图解 (Simonen, 1953; 周世泰, 1984)

Fig. 4 Simonen and A-K plot for low metamorphic clastic sedimentary rocks from the South Altai Terrane (after Simonen, 1953; Zhou, 1984).

### 3.2 原岩恢复

由于阿尔泰山南缘的浅变质碎屑岩重结晶程度高, 局部地区变形强烈, 因而在野外难以确认样品的原岩类型。西蒙南图解、A-K 图解及 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)。据表 1 中所列的浅变质碎屑岩主量元素分析结果, 计算出相关系数并列于表 2 中。阿尔泰山南缘浅变质碎屑岩西蒙南图解及 A-K 图解法原岩恢复结果如图 4 所示。在 A-K 图解上, 样品几乎全部落入泥质粉砂岩区 (图 4a), DF 指数也为负值, 显示正常碎屑沉积岩特征。西蒙南图解进一步显示, 尽管康布铁堡组两个云母片岩和 Chen and Jahn (2002) 的两个早泥盆世片岩样品投影点落入火山岩区域, 但该组绝大多数样品及所有阿勒泰组样品均落入泥岩-砂岩区域, 说明阿尔泰山南缘泥盆纪浅

变质碎屑岩原岩应为泥砂质沉积岩 (图 4b)。其中康布铁堡组浅变质碎屑岩原岩主要以泥质沉积岩为主, 而阿勒泰组浅变质碎屑岩原岩则以砂质沉积岩为主。

## 4 讨论

### 4.1 源区风化沉积特征

尽管碎屑沉积岩的化学组成受到源区岩石组成以及一些外生地质作用的影响, 如化学风化作用、搬运分选作用、沉积成岩作用及区域变质作用, 但碎屑沉积岩的地球化学研究仍被广泛应用到解释源区的矿物组成及其风化作用特征等研究领域 (Nesbitt and Young, 1982; Taylor and McLennan, 1985; McLennan *et al.*, 1993; Fedo *et al.*, 1995; Gao *et al.*, 1999; Bhat and Ghosh, 2001; Joo, *et al.*, 2005)。研究表明,



化学蚀变指数(CIA)、斜长石蚀变指数(PIA)、成分变异指数(ICV)及相关微量元素比值均可以示踪碎屑沉积物的源区物质和成因。在计算 CIA 和 PIA 指数时,所用 CaO 的含量仅指硅酸盐中的 CaO 含量。由于阿尔泰南缘浅变质碎屑沉积岩没有发生明显的碳酸盐蚀变作用,且绝大多数样品的 CaO 含量低( $<1.2$  wt%),因而直接用样品中的 CaO 含量计算 CIA 和 PIA 指数。阿尔泰南缘浅变质碎屑沉积岩相关指数计算结果详见表 1。

研究表明中生宙页岩的 CIA 值通常介于 70 到 75 之间,反映源区中存在白云母、伊利石和蒙托石矿物,并揭示出中等程度的化学风化作用(Nesbitt and Young, 1984; Fedo *et al.*, 1995)。康布铁堡组云母片岩和含绿泥石片岩 CIA 全部小于 75,且 ICV 接近 1.0,显示原岩成熟度中等,经历了相对弱的化学风化作用(图 5)。该组千枚岩和片岩也具有较低的 CIA( $<70$ ),以及相对较高的 ICV,显示源区化学风化程度弱。阿勒泰组云母片岩 CIA 值介于 65~75,ICV 值略大于 1.0,揭示其源区物质成熟度及其化学风化程度都较低。阿尔泰组千枚岩的 CIA 值明显低于该组云母片岩,其 ICV 值变化较大,显示其源区物质经历了轻微的化学风化作用。整个阿尔泰南缘浅变质碎屑沉积岩 ICV 值接近早古生代碎屑沉积岩,可能经历了类似的风化过程(Long *et al.*, 2008)。由于粘土矿物具有低的 ICV 值(Cox *et al.*, 1995),因而具有低 ICV 值的碎屑沉积岩被认为来自成熟的并含有大量粘土矿物的沉积源区,指示被动构造环境下沉积物的再循环(Kamp and Leake, 1985)。相反,ICV 值高的碎屑沉积岩则指示活动构造环境下的沉积物的初次循环(Kamp and Leake, 1985)。阿尔泰南缘浅变质碎屑沉积岩 ICV 值介于 0.82~1.37,显示相对较高的 ICV 值(表 1),说明其来源于不成熟的物质源区,显示活动构造环境碎屑沉积物特征。我们注意到 Chen 和 Jahn(2002)的石英片岩样品 ICV 值小于 1.0,虽然碎屑岩的成熟度较高,但也经历了较弱的化学风化作用(图 5)。

斜长石蚀变指数(PIA)常用来单独指示斜长石的风化状况(Fedo *et al.*, 1995)。新鲜岩石 PIA 指数为 50,而粘土矿物,如高岭石、伊利石及蒙托石的 PIA 指数则接近 100(Fedo *et al.*, 1995)。阿尔泰南缘浅变质碎屑沉积岩 PIA 指数较低(49~86,平均 70,图 6 右图),表明多数样品的源区物质比较新鲜,碎屑物质中斜长石的风化蚀变作用较弱。由于岩石经过化学风化作用,其成分在 A-CN-K 图解中将沿实线箭头方向变化,而 K 质交代作用将使成分沿虚线箭头方向变化(图 6 左图),因此,阿尔泰南缘的浅变质碎屑沉积岩可能来源于相当于英云闪长岩或花岗闪长岩成分的物质源区,经历了较弱的化学风化作用。这些特征也类似于活动构造环境下碎屑沉积岩的风化特征。

研究表明,Th/U 比值的增加可以示踪风化及沉积过程特征(McLennan and Taylor, 1980)。阿尔泰南缘的多数浅变质碎屑岩 Th/U 比值(3.3~6.0)接近 PAAS(4.97),略微高

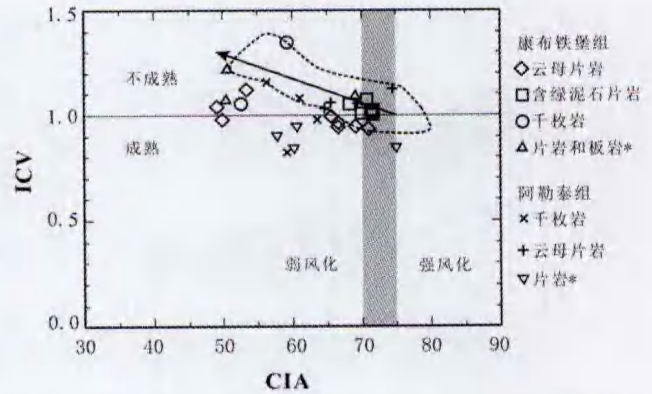


图 5 阿尔泰南缘浅变质碎屑沉积岩 CIA-ICV 指数图解 (据 Nesbitt and Young, 1982; Cox *et al.*, 1995; 图中星号标注样品来自 Chen and Jahn, 2002, 后文同; 虚线所示区域为阿尔泰西北碎屑沉积岩范围据 Long *et al.*, 2008)

Fig. 5 CIA-ICV plot for low metamorphic clastic sedimentary rocks from the South Altai Terrane (after Nesbitt and Young 1984; Cox *et al.* 1995). The dash line shows the range of sedimentary rocks of the Habahe Group (Long *et al.*, 2008).

于上地壳平均值(3.8),表明该套岩石源区经历了相对简单的沉积演化过程(图 7a)。而少量片岩样品 Th/U 比值较高(大于 6.0),显示其源区可能遭受了较强的氧化条件下的风化作用。由于风化和成岩作用可以导致碎屑沉积岩的 Rb/Sr 比值明显升高,因而高的 Rb/Sr 比值( $>0.5$ )也可以用来示踪风化及沉积作用循环(McLennan *et al.*, 1993)。阿尔泰南缘浅变质碎屑沉积岩的 Rb/Sr 比值变化较大,其中康布铁堡组含绿泥石片岩(Rb/Sr 平均 0.70)和云母片岩(Rb/Sr 平均 1.05),以及阿勒泰组千枚岩(Rb/Sr 平均 0.88)均具有较低的 Rb/Sr 比值,反映了一个相对简单的沉积演化过程;但是阿勒泰组云母片岩具有较高的 Rb/Sr 比值(Rb/Sr 平均 2.10),可能反映了源区云母矿物的相对富集。上述特征与 Th/U 比值结果相一致,说明阿尔泰南缘绝大多数浅变质岩经历了相对简单的沉积演化过程。

#### 4.2 源区物质组成

碎屑沉积岩地球化学研究可以指示独居石及锆石等重矿物在沉积搬运过程中的富集(Cullers *et al.*, 1988; McLennan *et al.*, 1990)。后太古代碎屑沉积岩以及多数上地壳火成岩的  $Gd_N/Yb_N$  比值变化范围介于 1.0 到 2.0 之间,由于独居石高度富集轻稀土(LREE),其在沉积物中轻微富集将直接导致  $Gd_N/Yb_N$  比值明显的升高(McLennan *et al.*, 1993)。阿尔泰南缘浅变质碎屑沉积岩的  $Gd_N/Yb_N$  比值,除一康布铁堡组云母片岩为 2.30 外,其余样品均小于 2.0,大多数介于上地壳岩石范围,表明在其形成过程中没有明显的独居石富集,不活泼的稀土元素可以作为其成因的指示剂。因为锆石中富含 Zr,而 Th 和 Sc 都难溶于自然水,

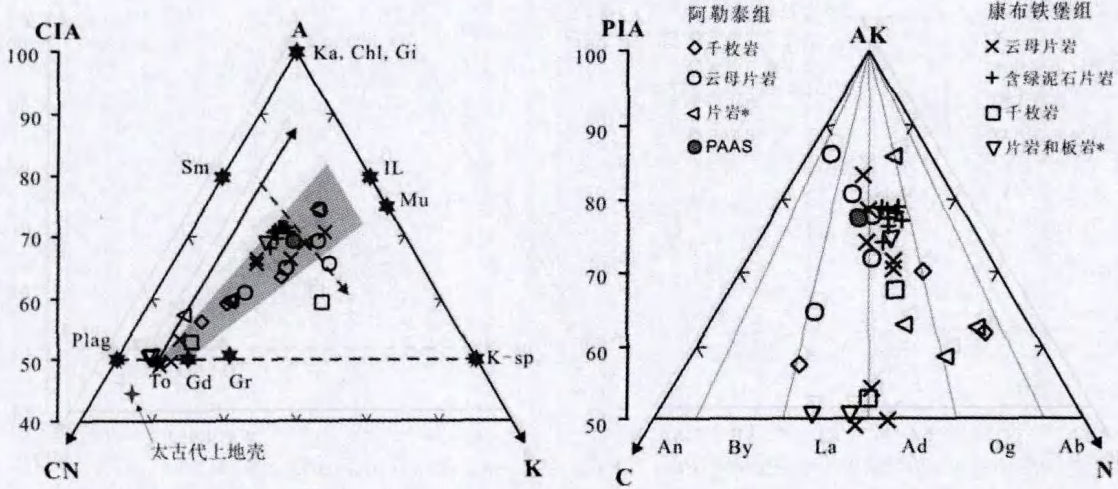


图6 阿尔泰南缘浅变质碎屑沉积岩 ACNK - AKCN 图解 (据 Nesbitt and Young, 1982; Fedo *et al.*, 1995)

图中 A、C、N 和 K 分别为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、Na<sub>2</sub>O 和 K<sub>2</sub>O 的摩尔数, CN = C + N, 而 AK = A - K, 实线箭头方向代表岩石化学风化方向, 虚线箭头代表岩石遭受 K 质交代蚀变方向。花岗岩 (Gr)、英云闪长岩 (To), 花岗闪长岩 (Gd) 和太古代上地壳数值来自 Condie (1993)。

Fig. 6 ACNK and AKCN plots for low metamorphic clastic sedimentary rocks from the South Altai Terrane (after Nesbitt and Young 1984; Fedo *et al.* 1995).

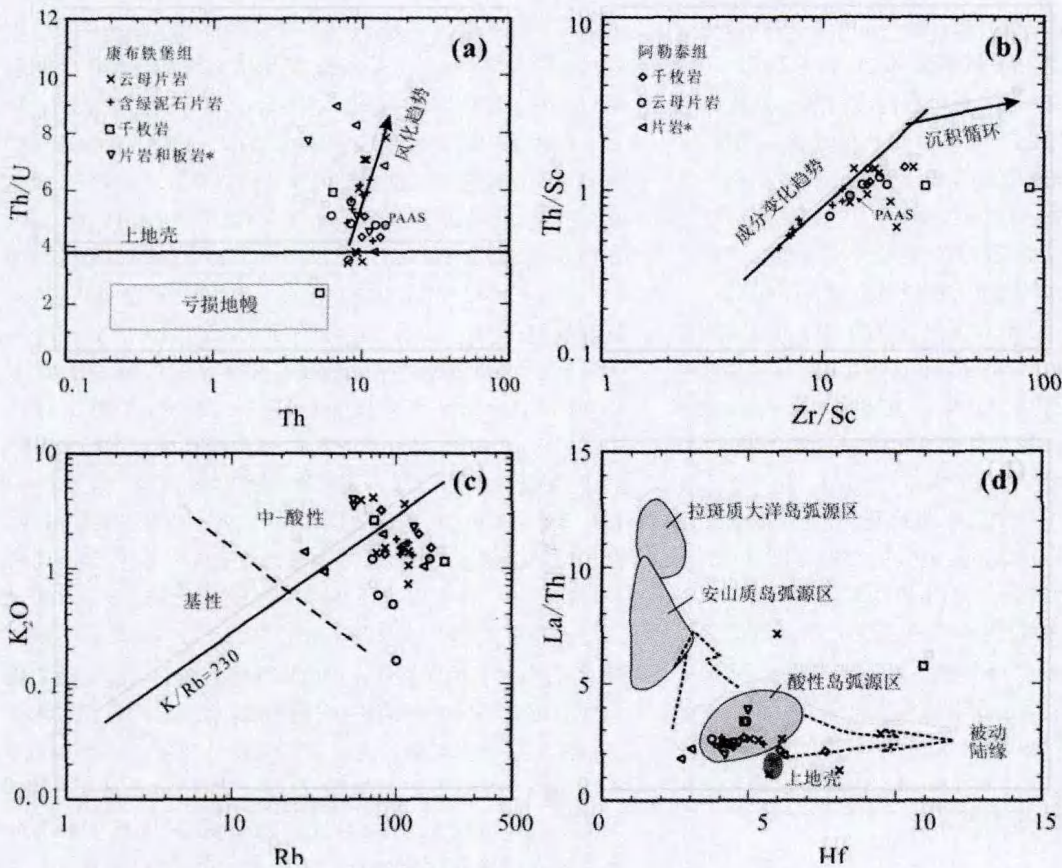


图7 阿尔泰南缘浅变质碎屑沉积岩风化特征和源区物质组成图解

(据 McLennan *et al.*, 1993; Floyd *et al.*, 1989; Floyd and Leveridge, 1987)

Fig. 7 The characteristics of weathering and source composition discrimination diagrams for low metamorphic clastic sedimentary rocks from the South Altai Terrane. Th/U - Th and Zr/Sc - Th/Sc plots after McLennan *et al.* (1993); K<sub>2</sub>O - Rb plot after Floyd *et al.* (1989); La/Th - Hf plot after Floyd and Leveridge (1987).

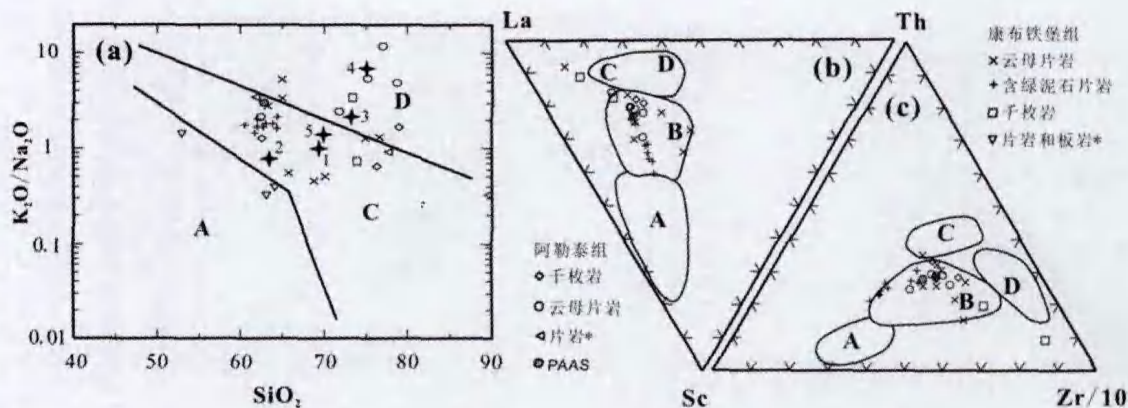


图8 阿尔泰南缘浅变质碎屑沉积岩构造环境图解(据 Roser and Korsch, 1986; Bhatia and Crook 1986)

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。星号代表岩性平均成分投影点, 康布铁堡组: 1 云母片岩, 2 含绿泥石片岩, 3 千枚岩, 阿勒泰组: 4 云母片岩; 5 千枚岩。

Fig. 8 Discriminate diagrams of tectonic settings for low metamorphic clastic sedimentary rocks from the South Altai Terrane (after Roser and Korsch 1986; Bhatia and Crook 1986). Abbreviation for tectonic settings: A, oceanic island arc; B, active continental margin; C, continental arc; D, passive continental margin.

且在沉积循环过程中不发生分馏作用(Cullers, 1994),所以在沉积循环过程中,随着锆石的富集 Zr/Sc 将升高而 Th/Sc 比值不变(McLennan, 1989)。阿尔泰南缘的浅变质碎屑岩的 Th/Sc (0.3 ~ 1.3) 及 Zr/Sc (6 ~ 13) 比值变化范围较小,除康布铁堡组千枚岩和云母片岩表现出一定程度的锆石富集外,其他样品在 Th/Sc - Zr/Sc 图解(图 7b)内构成良好的正相关关系,揭示该区浅变质碎屑岩的化学成分变化主要是源区物质组成的反映,而锆石的富集并未起到主宰作用。

研究表明, K 和 Rb 在碎屑沉积岩中的含量可以反映沉积物源区的特征(Shaw, 1968; Floyd *et al.*, 1989)。虽然阿尔泰南缘浅变质碎屑沉积岩 K/Rb 比值变化较大,但样品中高的 Rb 含量 (>30ppm) 和 K<sub>2</sub>O 含量 (>0.3 wt%) 说明其碎屑物质主要来自于中-酸性火成岩源区(图 7c)。由于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),因而可以对碎屑沉积物的成因提供重要的约束。从 La/Th - Hf 图解中,可以得出与 K 和 Rb 研究相一致的结论,即绝大多数阿尔泰南缘样品点落入酸性岛弧区域,揭示其源区物质可能以中-酸性岛弧火成岩为主(图 7d)。阿尔泰南缘浅变质碎屑沉积岩样品具有明显的负 Eu 异常 (Eu/Eu\* = 0.45 ~ 0.88), 具有后太古代沉积物的特征(Taylor and McLennan, 1985), 说明其源区物质经历了壳内的地球化学分异作用。

#### 4.3 构造背景

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(Bhatia and Crook, 1986; McLennan and Taylor, 1991)。通过

碎屑沉积物地球化学数据研究,可以区分出四种典型的构造环境,即:大洋岛弧、大陆岛弧、活动大陆边缘及被动大陆边缘(Bhatia, 1983; McLennan and Taylor, 1991)。基于澳大利亚东部古生代浊积岩系列的研究,Bhatia (1983) 认为碎屑沉积岩的主量元素可以反映其成因及构造背景。通常,从大洋岛弧到被动陆缘的砂岩,其 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MgO、TiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 比值降低,而 K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO + Na<sub>2</sub>O) 比值增加(Bhatia, 1983)。阿尔泰南缘浅变质碎屑沉积岩的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MgO 值介于 1% ~ 15% (平均 8%), TiO<sub>2</sub> 含量介于 0.12% ~ 0.97% (平均 0.59%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 比值介于 0.04 ~ 0.40 (平均 0.21), K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 比值介于 0.32 ~ 12.25 (平均 2.19), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO + Na<sub>2</sub>O) 比值介于 2 ~ 14 (平均 6),不同于大洋岛弧及被动大陆边缘,与活动大陆边缘相似。在 SiO<sub>2</sub> - K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 图解(Roser and Korsch, 1986)中,除少数样品外,其他样品全部落入活动大陆边缘区(图 8a)。把各组不同岩性样品的平均值投影到图 8a 中,康布铁堡组云母片岩和含绿泥石片岩,以及阿勒泰组千枚岩平均组成点均落在活动大陆边缘区域内,康布铁堡组千枚岩平均组成点靠近活动大陆边缘与被动大陆边缘界线,而阿勒泰组片岩平均组成点落在了被动大陆边缘区域。由于阿勒泰组片岩 4 个样品中有 3 个样品相比其他样品,其 Na<sub>2</sub>O 含量非常低,可能发生了钠离子的迁出并造成 K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 比值的偏高,其图解结果不可靠。因此,其他样品落入活动大陆边缘区域,应代表这套浅变质沉积岩的真实形成环境。

据 Bhatia (1981, 1983, 1986) 的研究成果,不同构造环境碎屑沉积物物质源区不同(如大洋岛弧碎屑沉积物来自未切割的岩浆弧,大陆岛弧碎屑沉积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。从大洋岛弧到大陆岛弧, 到活动大陆边缘, 再到被动大陆边缘的碎屑沉积物, 其 La、Ce、Th、U、Hf、REE 含量及  $La_N/Yb_N$  比值明显升高,  $Eu/Eu^*$  则降低。本研究所采样品除个别康布铁堡组片岩外, 其他样品具有相似的  $La_N/Yb_N$  比值、 $\Sigma REE$  含量及稀土配分模式。康布铁堡组含绿泥石片岩和云母片岩(除样品 BEJ110), 以及阿勒泰组云母片岩和千枚岩普遍具有较低的 La (11 ~ 38 ppm, 平均 23 ppm)、Ce (24 ~ 80 ppm, 平均 50 ppm)、 $\Sigma REE$  (61 ~ 198 ppm, 平均 120 ppm) 和  $La_N/Yb_N$  (多数介于 3 ~ 14, 平均 7), 其 Eu 负异常介于 0.46 ~ 1.02 (平均 0.63), 不同于被动陆缘碎屑沉积物特征 (La = 39 ppm, Ce = 85 ppm,  $\Sigma REE = 210$  ppm,  $La_N/Yb_N = 10.8$ ,  $Eu/Eu^* = 0.56$ ), 而与大陆岛弧碎屑沉积物相似 (La =  $27 \pm 4.5$  ppm, Ce =  $59 \pm 8.2$  ppm,  $\Sigma REE = 146 \pm 20$  ppm,  $La_N/Yb_N = 7.5 \pm 2.5$ ,  $Eu/Eu^* = 0.79 \pm 0.13$ ), 在球粒陨石和 PAAS 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(图 3A 和 B), 说明这些浅变质碎屑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)。

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, 不包括大陆岛弧(如日本弧)。因此, 为了进一步区分这套浅变质碎屑沉积岩形成的构造背景, 使用不活泼的微量元素进行研究, 如 Th - Sc - Zr/10 和 La - Th - Sc 图解 (Bhatia and Crook, 1986)。在这两个图解中(图 8b, c), 除一个千枚岩样品外, 其余数据均落入大陆岛弧区, 说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, 阿尔泰山南缘浅变质碎屑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, 如弧后盆地、弧间盆地等。Long *et al.* (2007) 对康布铁堡组糜棱岩和阿勒泰组副片麻岩中的碎屑锆石 U-Pb 定年结果发现, 其源区物质主要来自岩浆岩, 并有一定量的古老物质, 也支持其形成于大陆岛弧相关的构造环境。

## 5 结论

阿尔泰山南缘的康布铁堡组和阿勒泰组泥盆纪浅变质碎屑沉积岩地球化学特征表明, 该套碎屑沉积岩原岩成熟度较低, 主要来自中-酸性火成岩源区, 经历了较弱的化学风化作用和相对简单的沉积演化过程, 沉积于大陆岛弧相关环境, 说明泥盆纪阿尔泰山地区处于活动大陆边缘构造环境, 为认识阿尔泰山南缘泥盆纪岛弧增生的构造演化过程提供了一个重要证据。

**致谢** 在分析测试过程中, 感谢香港大学地质系相关实验室给予的大力帮助; 在文章修改过程中, 两位审稿人提出了诸

多宝贵意见, 在此表示感谢。

## References

- Bhat MI and Ghosh SK. 2001. Geochemistry of the 2.51 Ga old Rampur group pelites, western Himalayas: implications for their provenance and weathering. *Precambrian Research*, 108: 1 - 16
- Bhatia MR and Crook KAW. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basin. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92: 181 - 193
- Bhatia MR. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *Journal of Geology*, 91: 611 - 627
- Bhatia MR. 1986. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: provenance and tectonic control. *Sedimentary Geology*, 45: 97 - 113
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1993. Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region. People's Republic of China, Ministry of Geology and Mineral Resources. Geological Memoirs, Series 1, No. 32, Beijing: Geological Publishing House, 6 - 206 (in Chinese with English abstract)
- Cai KD. 2007. Time of magmatism, Petrogenesis and the Tectonic Implication of the Western Chinese Altai Orogen, Northwest China. A thesis submitted for the Degree of Master at the Graduate School of The Chinese Academy of Sciences, 1 - 72 (in Chinese with English abstract)
- Chen B and Jahn BM. 2002. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of NW China and their tectonic implications. *Geol. Mag.* 139(1), 1 - 13
- Chen HL, Yang SF, Li ZL, Xiao WJ, Li JL, Dong CW and Yu X. 2006. Geochemistry and Tectonic Setting of Early Late Paleozoic Felsic Volcanic Rocks from the Altai Orogenic Belt, North Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 38 - 42 (in Chinese with English abstract)
- Chen YC, Ye QT and Feng J. 1996. the metallogenic condition and prediction of the Ashele Cu-Zn deposits. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 85 (in Chinese)
- Chen ZF, Cheng SD and Liang YH. 1997. Opening-Closing Tectonics and Mineralization. Urumchi: Science and Technology and Sanitation Press, 10 - 90 (in Chinese with English abstract)
- Chen ZF. 2002. Opening-Closing tectonics and prospecting targets of Ashele Cu-Zn deposits. *Xinjiang Geology*, 20(1): 34 - 37 (in Chinese with English abstract)
- Coleman RG. 1989. Continental growth of northwest China. *Tectonics*, 8: 621 - 635
- Condie KC. 1986. Geochemistry and tectonic setting of early Proterozoic supracrustal rocks in the southwestern United State. *Journal of Geology*, 94: 845 - 864
- Condie KC. 1993. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chemical Geology*, 104: 1 - 37
- Cox R, Lowe DR and Cullers RL. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 2919 - 2940
- Cullers RL. 1988. Mineralogical and chemical changes of soil and stream sediment formed by intense weathering of the Danburg granite, Georgia, USA. *Lithos*, 21: 301 - 14
- Cullers RL. 1994. The geochemical signatures of source rocks in size fractions of Holocene stream sediment derived from metamorphic rocks in the Wet Mountains region, USA. *Chemical Geology*, 113: 327 - 343

- Dickinson WR and Suczek CA. 1979. Plate tectonics and sandstone compositions. *AAPG Bull.*, 63: 2164 - 2182
- Dobretsov NL, Buslov MM and Yu U. 2004. Fragments of oceanic islands in accretion-collision areas of Gorny Altai and Salair, southern Siberia, Russia; early stages of continental crustal growth of the Siberian continent in Vendian-Early Cambrian time. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 673 - 690
- Fedo CM, Nesbitt HW and Young GM. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23: 921 - 924
- Floyd PA and Leveridge BE. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. *Journal of the Geological Society of London*, 144: 531 - 542
- Floyd PA, Winchester JA and Park RG. 1989. Geochemistry and tectonic setting of Lewisian clastic metasediments from the early Proterozoic lock marie group of Cairnlock, Scotland. *Precambrian Research*, 45: 203 - 214
- Gao S, Ling WL, Qiu YM, Lian Z, Hartmann G and Simon K. 1999. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton; Evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63: 2071 - 2088
- Group for Compilation of Regional Stratigraphy of Xinjiang. 1981. *Regional Stratigraphic Table of NW China; Xinjiang Uygur Autonomous Region Fascicule*. Beijing: Geological Publishing House, 7 - 11 (in Chinese)
- Han BF and He GQ. 1991. The tectonic nature of the Devonian volcanic belt on the southern edge of Altay Mountains in China. *Geoscience of Xinjiang*, (3): 89 - 100 (in Chinese with English abstract)
- He GQ, Han BF, Yue YJ and Wang JH. 1990. Tectonic division and crustal evolution of Altay orogenic belt in China. *Geoscience of Xinjiang*, (2): 9 - 20 (in Chinese with English abstract)
- He GQ, Liu DQ, Li MS, Tang YL and Zhou RH. 1995. The five-stage model of crust evolution and metallogenic series of chief orogenic belts in Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 13(2): 115 - 144 (in Chinese with English abstract)
- Helo C, Hegner E, Kröner A, Badarch G, Tomurtogoo O, Windley BF and Dulski P. 2006. Geochemical signature of Paleozoic accretionary complexes of the Central Asian Orogenic Belt in South Mongolia: Constraints on arc environments and crustal growth. *Chemical Geology*, 227: 236 - 257
- Hofmann A. 2005. The geochemistry of sedimentary rocks from the Fig Tree Group, Barberton greenstone belt: implications for tectonic, hydrothermal and surface processes during mid-Archaean times. *Precambrian Research*, 143: 23 - 49
- Huang JQ, Jiang CF and Wang ZX. 1990. On the opening-closing tectonics and accordion movement of plate in Xiangjiang and adjacent regions. *Geoscience of Xinjiang*, (1): 3 - 16 (in Chinese with English abstract)
- Jahn BM. 2004. The Central Asian Orogenic Belt and Growth of the Continental Crust in the Phanerozoic. In: Malpas J, Fletcher CJN, Ali JR, Aitchison JC (eds.). *Aspects of the Tectonic Evolution of China*. Special Publications, London, 226: 73 - 100
- Joo YJ, Lee Y and Bai ZQ. 2005. Provenance of the Qingshuijian Formation (Late Carboniferous), NE China: Implications for tectonic processes in the northern margin of the North China block. *Sedimentary Geology*, 177(1-2): 97 - 114
- Kamp PC and Leake BE. 1985. Petrography and geochemistry of feldspathic and mafic sediments of the northeastern Pacific margin. *Trans. R. Soc. Edinb. Earth Sci.*, 76: 411 - 499
- Khain EV, Bibikova EV, Salmikova EB, Kröner A, Gibsher AS, Didenko AN, Degtyarev KE and Fedotova AA. 2003. The Palaeo-Asian ocean in the Neoproterozoic and early Palaeozoic: new geochronologic data and palaeotectonic reconstructions. *Precambrian Research*, 122: 329 - 358
- Kuzmichev A, Kröner A, Hegner E, Liu DY and Wan YS. 2005. The Shishkhid ophiolite, northern Mongolia: A key to the reconstruction of a Neoproterozoic island-arc system in central Asia. *Precambrian Research*, 138: 125 - 150
- Li CY, Wang Q, Liu XY and Tang YQ. 1982. Explanatory notes to the tectonic map of Asian. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 40 (in Chinese with English abstract)
- Li HJ, He GQ, Wu TR and Wu B. 2006. Confirmation of Altai-Mongolia microcontinent and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 1369 - 1379 (in Chinese with English abstract)
- Li TD, Qi ZM, Xiao SL, and Wu BQ. 1996. New improvement of comparative study of geology and mineralization of Altai between China and Kazakhstan, in Thesis Volume of the Symposium of the 8th Five Year Plan of Geoscience for Contribution to 30th IGC, edited by Chinese Geological Society. Beijing: Metallurgical Industrial Publishing House, 256 - 259 (in Chinese)
- Liu BF. 1984. The Altai plate and innate mineral resources. *Northwestern Geology*, (4): 14 - 21 (in Chinese with English abstract)
- Long XP. 2007. The Sedimentary Timing, Source Provenance and Tectonic Setting of Paleozoic Clastic Sedimentary Rocks in the Altai Orogen, Xinjiang. A thesis submitted for the Degree of Doctorate at the Graduate School of The Chinese Academy of Sciences. 1 - 80 (in Chinese with English abstract)
- Long XP, Sun M, Yuan C, Xiao WJ, Lin SF, Wu FY, Xia XP and Cai KD. 2007. U-Pb and Hf isotopic study of zircons from metasedimentary rocks in the Chinese Altai: Implications for Early Paleozoic tectonic evolution. *Tectonics*, 26: TC5015, doi:10.1029/2007TC002128
- Long XP, Sun M, Yuan C, Xiao WJ, Cai KD, Zhao YJ. 2008. Early Paleozoic sedimentary record of the Chinese Altai: implications for its tectonic evolution. *Sedimentary Geology*, (Accepted)
- McLennan SM and Taylor SR. 1980. Th and U in sedimentary rocks: crustal evolution and sedimentary recycling. *Nature*, 285: 621 - 624
- McLennan SM and Taylor SR. 1991. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends. *Journal of Geology*, 99: 1 - 21
- McLennan SM, Hemming S, McDaniel DK and Hanson GN. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. *Geological Society of America Special Paper*, 284: 21 - 40
- McLennan SM, Hemming SR, Taylor SR and Eriksson KA. 1995. Early Proterozoic crustal evolution: Geochemical and Nd-Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North America. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(6): 1153 - 1177
- McLennan SM, Simonetti A and Goldstein SL. 2000. Nd and Pb isotopic evidence for provenance and post-depositional alteration of the Paleoproterozoic Huronian Supergroup, Canada. *Precambrian Research*, 102 (3-4): 263 - 278
- McLennan SM, Taylor SR, McCulloch MT and Maynard JB. 1990. Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: Crustal evolution and plate tectonic associations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43: 375 - 388
- McLennan SM. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. *Rev. Mineral.*, 21: 169 - 200
- Mou CL, Liu BY, Zhu XZ and Xing XF. 1996. Tectonic setting and evolution of the Devonian volcanic sedimentary basin in the Ashele-Chonghur region, Xinjiang. *Tethyan Geology*, 20: 70 - 84 (in Chinese with English abstract)

- Nance WB and Taylor SR. 1976. Rare earth element patterns and crustal evolution I: Australian post-Archean sedimentary rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40: 1539 - 1551
- Nesbitt HW and Young GM. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 199: 715 - 717
- Nesbitt HW and Young GM. 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamics and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48: 1523 - 1534
- Niu HC, Xu JF, Yu XY, Chen FR and Zheng ZP. 1999. Discovery of Mg-rich volcanic rocks and its geological implication. *Chinese Science Bulletin*, 44(9): 1002 - 1004 (in Chinese)
- Qi L and Gregoire DC. 2000. Determination of trace elements in 26 Chinese Geochemistry Reference Materials by inductively coupled plasma - mass spectrometry. *Geostandards Newsletter*, 24: 51 - 63
- Ren JS, Wang ZX, Chen BW, Jiang CF, Niu BG, Li JY, Xie GL, He ZJ and Liu ZG. 1999. The tectonic map of China and adjacent regions. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 50 (in Chinese)
- Roser BP and Korsch RJ. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO<sub>2</sub> content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratio. *Journal of Geology*, 94: 635 - 650
- Roser BP and Korsch RJ. 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chemical Geology*, 67: 119 - 139
- Roser BP, Coombs DS, Korsch RJ and Campbell JD. 2002. Whole-rock geochemical variations and evolution of the arc-derived Murihiku Terrane, New Zealand Geological Magazine, 139(6): 665 - 685
- Sengör AMC and Natal'in BA. 1996. Paleotectonics of Asia: Fragments of a Synthesis. In: Yin A, and Harrison M (eds.). *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge University Press, Cambridge, 486 - 640
- Sengör AMC, Natal'in BA and Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Asia. *Nature*, 364: 299 - 307
- Shaw DM. 1968. A review of K-Rb fractionation trends by covariance analysis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 32: 573 - 602
- Simonen A. 1953. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofennidie, early Archean supracrustal rocks in southwestern Finland. *Bull. Comm Geol. Finland*, 160: 1 - 64
- Sugitani K, Yamashita F, Nagaoka T, Yamamoto K, Minami M, Mimura K and Suzuki K. 2006. Geochemistry and sedimentary petrology of Archean clastic sedimentary rocks at Mt. Goldsworthy, Pilbara Craton, Western Australia; Evidence for the early evolution of continental crust and hydrothermal alteration. *Precambrian Research*, 147: 124 - 147
- Sun M, Yuan C, Xiao W, Long X, Xia X, Zhao G, Lin S, Wu F, Kröner A. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of gneissic rocks from the Chinese Altai; progressive accretionary history in the early to middle Paleozoic. *Chemical Geology*, 247: 352 - 383
- Sun M, Yuan C, Xiao W, Long X, Xia X, Han C and Lin S. 2006. Granitic gneisses and gneissic granites from the Central Terrane of the Chinese Altai Orogen; zircon ages and tectonic significance. *EOS Trans AGU* 87 (36), West Pac Geophys Meet Suppl, Abstract V25A-06
- Sun S-S and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD & Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basin*. Geological Society Special Publication. Blackwell Scientific Publications 42: 313 - 346
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The continental crust: its composition and evolution*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK, pp. 312
- Wang RM, He GP and Chen ZZ. 1987. Distinguish Diagrams for the Protoliths of Metamorphic Rocks. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 199 (in Chinese)
- Wang T, Hong DW, Jahn BM, Tong Y, Wang YB, Han BF and Wang XX. 2006. Timing, Petrogenesis, and Setting of Paleozoic Synorogenic Intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: Implications for the Tectonic Evolution of an Accretionary Orogen. *Journal of Geology*, 114: 735 - 751
- Windley BF, Kröner A, Guo J, Qu G, Li Y and Zhang C. 2002. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution. *Journal of Geology*, 110: 719 - 739
- Xiao WJ, Windley BF, Badararch G, Sun S, Li J, Qin K and Wang Z. 2004. Paleozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altai; implications for the growth of central Asia. *J. Geol. Soc. London*, 161: 1 - 4
- Xiao XC, Tang YQ, Feng YM, Zhu BQ, Li JY and Zhao M. 1992. Tectonics in northern Xinjiang and its neighbouring areas. Beijing: Geological Publishing, 104 - 121 (in Chinese with English abstract)
- Xiao XC, Tang YQ, Li JY, Zhao M, Feng YM and Zhu BQ. 1990. On the tectonic evolution of the northern Xinjiang, Northwest China. *Geoscience of Xinjiang*, (1): 47 - 68 (in Chinese with English abstract)
- Xu JF, Castillo PR, Chen FR, Niu HC, Yu XY and Zhen ZP. 2003. Geochemistry of late Paleozoic mafic igneous rocks from the Kuerti area, Xinjiang, northwest China; implications for backarc mantle evolution. *Chemical Geology*, 193(1-2): 137 - 154
- Yuan C, Sun M, Xiao WJ, Li XH, Chen HL, Lin SF, Xia XP and Long XP. 2007. Accretionary Orogenesis of Chinese Altai: Insights from the Paleozoic Granitoids. *Chemical Geology*, 242: 22 - 39
- Zhang HX, Niu HC, Hiroaki S, Shan Q, Yu XY, Jun'ichi I and Zhang Q. 2004. Late Paleozoic Adakite and Nb-enriched Basalt from Northern Xinjiang: Evidence for the Southward Subduction of the Paleo-Asian Ocean. *Geological Journal of China Universities*, 10: 106 - 113 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JH and Wang JB. 2000. Characteristics and U-Pb ages of zircon in metavolcanics from the Kangbutiebao Formation in the Altai orogen, Xinjiang. *Regional Geology of China*, 19(3): 281 - 287 (in Chinese with English abstract)
- Zhou ST. 1984. Evaluation for the 17 geochemical methods of the protoliths recovery of metamorphic rocks. *Geologica Review*, 30(1): 81 - 84 (in Chinese with English abstract)

#### 附中文参考文献

- 蔡克大. 2007. 阿尔泰山南缘西段古生代岩浆活动的时代、岩石成因机制及其构造意义. 中科院广州地球化学研究所硕士学位论文
- 陈汉林, 杨树峰, 历子龙, 肖文交, 李继亮, 董传万, 余星. 2006. 阿尔泰山晚古生代早期长英质火山岩的地球化学特征及构造背景. *地质学报*, 80(1): 38 - 42
- 陈毓川, 叶庆同, 冯京. 1996. 阿舍勒铜锌成矿带成矿条件和成矿预测. 北京: 地质出版社, 1 - 85
- 陈哲夫, 成守德, 梁云海等. 1997. 新疆开合构造与成矿. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社
- 陈哲夫. 2002. 阿舍勒铜锌矿床的开合构造特征及找矿方向. *新疆地质*, 20(1): 34 - 37
- 韩宝福, 何国琦. 1991. 中国阿尔泰山南缘泥盆纪火山岩带的大地构造性质. *新疆地质科学*(3). 北京: 地质出版社, 89 - 100
- 何国琦, 刘德权, 李茂松, 唐延龄, 周汝洪. 1995. 新疆主要造山带地壳发展的五阶段模式及成矿系列专辑. *新疆地质*, 13(2): 115 - 144

- 何国琦, 韩宝福, 岳永君, 王嘉桁. 1990. 中国阿尔泰造山带的构造分区和地壳演化. 新疆地质科学(2). 北京: 地质出版社, 9-20
- 黄汲清, 姜春发, 王作勋. 1990. 新疆及邻区板块开合构造及手风琴式运动. 新疆地质科学(1). 北京: 地质出版社, 3-16
- 李春昱, 王荃, 刘雪亚, 汤耀庆. 1982. 亚洲大地构造图. 北京: 地质出版社, 1-49
- 李会军, 何国琦, 吴泰然, 吴波. 2006. 阿尔泰—蒙古微大陆的确定及其意义. 岩石学报, 22(5): 1369-1379
- 李天德, 祁志明, 肖世录, 吴柏青. 1996. 中国和哈萨克斯坦阿尔泰地质及成矿研究的新进展. 见: 中国地质学会编. 献给三十届国际地质大会“八五”地质科技重要成果学术交流会议论文集. 北京: 冶金工业出版社, 256-259
- 刘峰标. 1984. 阿尔泰古板块与内生矿产. 西北地质, (4): 14-21
- 龙晓平. 2007. 新疆阿尔泰古生代碎屑沉积岩的沉积时代、物质来源及其构造背景. 中国科学院研究生院博士学位论文. 1-80
- 牟传龙, 刘宝瑶, 朱晓镇, 邢雪芬. 1996. 新疆阿舍勒—冲乎尔地区泥盆纪火山沉积盆地构造背景及其演化. 特提斯地质, 20: 70-84
- 牛贺才, 许继峰, 于学元, 陈繁荣, 郑作平. 1999. 新疆阿尔泰富镁火山岩系的发现及其地质意义. 科学通报, 44(9): 1002-1004
- 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚等. 1999. 中国及邻区大地构造图(1:500万)及简要说明——从全球看中国大地构造. 北京: 地质出版社, 1-50
- 王仁民, 贺高品, 陈珍珍. 1987. 变质岩原岩图解判别法. 北京: 地质出版社, 1-199
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 朱宝清, 李锦轶, 赵民. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京: 地质出版社, 1-162
- 肖序常, 汤耀庆, 李锦轶, 赵民, 冯益民, 朱宝清. 1990. 试论新疆北部大地构造演化. 新疆地质科学(1). 北京: 地质出版社, 47-68
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社. 1-135
- 新疆维吾尔自治区区域地层表编写组. 1981. 西北地区区域地层表——新疆维吾尔自治区分册. 北京: 地质出版社. 7-11
- 张海祥, 牛贺才, Hiroaki Sato, 单强, 于学元, Jun'ichi Ito, 张旗. 2004. 新疆北部晚古生代埃达克岩、富铌玄武岩组合: 古亚洲板块南向俯冲的证据. 高校地质学报, 10: 106-113
- 张进红, 王京彬. 2000. 阿尔泰造山带康布铁堡组变质火山岩锆石特征和铀—铅年龄. 中国区域地质, 19(3): 281-287
- 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. 地质论评, 30(1): 81-84