

阿尔泰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

沈瑞峰^{1,2}, 张辉^{1*}, 唐勇¹, 吕正航¹

(1. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 对阿尔泰造山带古生代地层的地球化学研究表明, 浅变质碎屑岩的原岩多为泥砂质沉积岩, 包含少量来自火成岩或火山岩物质。样品的成分变异指数(ICV)值分布于 0.83~1.61 之间, 绝大部分大于 1.0, 表明碎屑岩的成熟度较差, 代表活动大陆边缘的首次沉积的产物。化学蚀变指数(CIA)值分布于 50~82 之间, 其中石炭纪库马苏组以高 CIA 值(71~79)为特征, 指示源区物质可能经历了温暖-炎热、湿润-潮湿条件下的中等-强烈化学风化作用, 而哈巴河群、库鲁姆提群、康布铁堡组、阿勒泰组和红山嘴组显示低的 CIA 值(50~70), 指示源区物质经历了相对寒冷、干燥的条件下的弱的化学风化作用。古生代地层中($\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}+\text{MgO}$)、 TiO_2 含量以及 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$ 值, 稀土元素 La、Ce 含量以及微量元素 Th/Sc、La/Sc 值显示, 哈巴河群、库鲁姆提群、康布铁堡组、阿勒泰组碎屑沉积岩主体形成于大陆岛弧背景, 库马苏组、红山嘴组沉积与大陆岛弧-活动大陆边缘具有成因联系。以上地球化学特征表明, 阿尔泰古生代碎屑岩可能沉积于活动大陆边缘的大陆岛弧相关环境, 为阿尔泰古生代多块体增生构造演化模式提供依据。

关键词: 地球化学; 原岩恢复; 源区特征; 沉积环境; 古生代地层; 阿尔泰造山带

中图分类号: P59; P53 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2015)01-0043-18

Geochemical characteristics of Paleozoic strata and its restriction on depositional environment in Altay orogen, north Xinjiang, China

SHEN Rui-feng^{1,2}, ZHANG Hui^{1*}, TANG Yong¹ and LÜ Zheng-hang¹

1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The geochemical studies of Paleozoic strata in the Altai orogen show that the protolith of the low-grade metamorphosed clastic rocks are mainly pelitic-arenaceous sedimentary rocks and igneous or volcanic rocks, in a small amount. The Index of Composition Variation (ICV) of our samples is in the range of 0.83–1.61, mostly over 1.0, indicating poor maturity, which may be the product of the first deposition in active continental margin. The Chemical Index of Alteration (CIA) is in the range of 50–82. The CIA of Carboniferous Kumasu group characterized by high ratios (71–79), indicating the source material may have experienced a moderate-intense chemical weathering in warm-hot, humid-moist condition, whereas that of Habahe group, Kulumuti group, Kangbutiebao group, Altay group and Hongshanzui group is low (50–70), indicating the source material has undergone relatively weak chemical weathering in cold, dry condition. According to the contents of ($\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}+\text{MgO}$), TiO_2 , La, Ce and ratios of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$, $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$, Th/Sc, La/Sc, the clastic sedimentary rocks of Habahe, Kulumuti, Kangbutiebao and Altay Groups are formed in the continental island arc settings, whereas that of Kumasu and Hongshanzui Groups have a genetic link with continental island arc-active continental margin. The above geochemical characteristics suggest a sedimentary environment related to continental island arcs for the Paleozoic clastic rocks in the Altai orogen, and provide the basic evidences for the

收稿日期(Received): 2014-01-23; 改回日期(Revised): 2014-03-01; 接受日期(Accepted): 2014-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(41372104); 新疆有色金属工业集团地质科研项目(YSKY2011-02)

作者简介: 沈瑞峰(1989-), 男, 硕士研究生, 岩石地球化学、矿床地球化学研究方向。E-mail: rfshen@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): ZHANG Hui, E-mail: zhanghui@vip.gyig.ac.cn; Tel: +86-851-5891494

SHEN Rui-feng et al.: Geochemical characteristics of Paleozoic strata and depositional environment

tectonic evolution mode of multi-block amalgamation for the Altai orogen in the Paleozoic era.

Key words: geochemistry; protolith reconstruction; source characteristics; depositional environment; Paleozoic strata; Altai orogen

0 引言

中亚造山带^[1-3]是全球显生宙陆壳增生和改造最显著的地区,而阿尔泰造山带是中亚造山带的重要组成部分,也是重要的金属矿产成矿带,因此对于阿尔泰造山带的构造-岩浆-成矿作用研究吸引了国内外学者的极大关注^[4-14]。尽管前人对该地区进行了详细的研究,但是对于阿尔泰地区的构造演化模式还存在着争议,并且主要集中在古生代构造演化历史和地壳的增生方式上,总的可以概括为开合构造模式和岛弧增生两种基本模式,开合构造模式强调阿尔泰造山带在古生代处于闭合-拉张的构造环境中^[15-18],岛弧增生模式则认为阿尔泰造山带是由长期存在的单一岛弧持续的俯冲碰撞形成的^[6,19]。最近越来越多的研究表明阿尔泰造山带不可能由单一岛弧形成,而是由各种不同的地体(如蛇绿岩套、岛弧、海山、增生楔和微陆块)合并形成^[9,10,13,14,20-25,26-28],这些成果多是基于对该区域的岩浆岩的研究得到的。而对于该地区大面积分布的古生代地层的研究相对较少,主要是对单个地层的年代厘定^[26,29-33],变质热演化历史^[34-37]和深变质岩^[38-40],近些年,一些学者^[14,26,41-44]通过对哈巴河群、康布铁堡组和阿勒泰组的碎屑沉积岩的地球化学特征,碎屑锆石 U-Pb 年龄以及 Hf 同位素等的研究,得到了其形成于靠近大陆岛弧的活动大陆边缘构造环境,为阿尔泰构造演化历史提供了重要的证据,但是对阿尔泰完整的古生代地层的系统研究还相对缺乏。

沉积岩能够为陆壳的物质组成、构造演化和地壳的生长演化等提供重要的信息,如能够揭示古气候条件^[45-47],制约源区的物质组成特征^[48-51]以及恢复沉积构造环境^[52-55]等,阿尔泰由于泥岩和砂岩的微量元素含量较高并且较为平均,已经成为研究沉积岩地球化学的理想对象^[45,47,55,56]。但是近年来利用浅变质碎屑沉积岩对源区物质组成特征和地壳演化的研究也取得了不错的成果^[57-59]。本文采集了阿尔泰造山带一套完整的古生代浅变质碎屑沉积岩,旨在通过对古生代浅变质碎屑沉积岩的地球化学研究,揭示该套岩石的源区风化、物质组成特征和形成的构造环境,为恢

复阿尔泰古生代的大地构造背景提供一定的制约。

1 区域地质背景

阿尔泰造山带位于中亚造山带的西南部,从西经过俄罗斯、哈萨克斯坦、中国北部,向东到达蒙古国境内,全长 2500 km,宽 800 km,南依准噶尔盆地,北临西伯利亚克拉通。前人根据该地区的地质学、变质和变形特征、岩浆活动以及火成岩年代学,把阿尔泰造山带划分为 3 个构造单元^[15]或者 6 个地块^[2]。近些年研究表明把阿尔泰造山带划分为 4 个地块更为合理^[12-14,26-28,31,42,43],从北向南以红山嘴-诺尔特断裂、库尔提-阿巴宫断裂和额尔齐斯断裂将阿尔泰造山带分为北阿尔泰、中阿尔泰、琼库尔地块和南阿尔泰。北阿尔泰主要由晚泥盆纪-早石炭纪碎屑沉积岩、花岗岩和绿片岩相变质岩组成^[60-61],其中库马苏组主要以长石石英砂岩、石英砂岩和绢云绿泥千枚岩等为主,红山嘴组以石英砂岩、长石砂岩和泥质板岩为特征。中阿尔泰主要有中奥陶纪-早泥盆纪地层和面积的花岗岩组成,发育地层主要有奥陶纪哈巴河群和志留纪库鲁姆提群,奥陶纪哈巴河群以石英片岩、黑云母石英片岩和千枚岩为主。早期研究认为该地块可能发育有前寒武纪基底^[62],最近研究表明存在前寒武纪古老基底的可能性微乎其微^[12,26-28,33,42,43,63-65]。琼库尔地块主要有志留纪库鲁姆提群、早泥盆纪的康布铁堡组、中泥盆晚阿勒泰组和大面积出露的花岗岩组成,其中库鲁姆提群以变质较浅的变质粗砂岩、细砂岩和变质较深的石英片岩夹少量的片麻岩和混合岩为主,阿勒泰组以千枚岩和石英片岩为特征,康布铁堡组多发育石英片岩和变质石英砂岩。南阿尔泰主要发育泥盆纪含化石沉积岩和石炭纪火山碎屑岩。向南为额尔齐斯断裂带,发育一套片麻岩系。

阿尔泰造山带古生代地层主要分布于北阿尔泰、中阿尔泰和琼库尔构造单元中,其中哈巴河群(O₂hb¹⁻³)主要在富蕴县西北部地区、东部地区(可可托海镇和库威沟)以及青河县境内分布,库鲁姆提群(S₂₋₄k¹⁻²)主要分布于福海县北部的卡鲁安、阿祖拜和琼库尔等地区,康布铁堡组(D₁k¹⁻⁴)主要分布在富

蕴西北至阿勒泰市一线, 阿勒泰组 (D_2al^{1-3}) 分布于阿勒泰市东北的阿巴宫、富蕴县东部的托克拜-达拉吾孜村地区一带, 库马苏组 ($D_3C_1k^1$) 和红山嘴组 (C_1hshz^{1-3}) 主要出露于北阿尔泰构造单元的诺尔特地区。鉴于一些学者^[14,29,33,42,43]对阿尔泰南缘泥盆纪地层和阿尔泰西北部地层的研究, 本次研究样品主要采自中阿尔泰, 少量样品采自北阿尔泰和琼库尔构造单元, 所采集的古生代地层样品分布见图 1。

2 样品描述及分析方法

2.1 样品描述

本次野外地质工作中, 采集均远离岩浆岩侵入体及其脉体的古生代地层的新鲜样品, 自下而上包括奥陶纪哈巴河群、志留纪库鲁姆提群、泥盆纪康布铁堡组和阿勒泰组、石炭纪库马苏组和红山嘴组。由于震旦-寒武纪的喀纳斯群第一至第四亚群仅在阿尔泰山零星出露, 而二叠纪喀喇额尔齐斯组、特斯巴组汗和库尔提组在研究区出露很少, 因此, 在

本次研究中不予考虑。

采集样品多为浅变质和未变质的碎屑岩(图 2a、2b), 主要岩性为云母片岩、石英片岩和变质砂岩, 共 40 余件, 本文所分析的 32 件样品是在室内显微镜下初步观察的基础上选取的。

2.2 分析测试方法

样品的主元素和微量元素分析均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完成, 其中岩石中主要化学组成由 AXIOS XRF 分析测试制成玻璃片获得; 熔片法, 具体包括: 取 0.7 g 样品和 7 g 助熔剂($Li_2B_4O_7$), 搅拌均匀倒入铂金坩埚中, 再加少量 $LiBr$ 和 $LiNO_3$, 在熔样炉中加热至 $1100\text{ }^\circ\text{C}$ 熔融制成玻璃片。微量元素分析在四级杆型电感耦合等离子体质谱(Q-ICP-MS)上进行, 先采用 $HF+HNO_3$ 密闭高压溶样, 溶解好的样品溶液在四级杆等离子体质谱仪上测定, 溶样和分析流程见文献[66]。上述分析中主元素的分析相对标准偏差(RSD) $<1\%$, 微量元素(包括 REE)的分析相对标准偏差(RSD) $<10\%$ 。

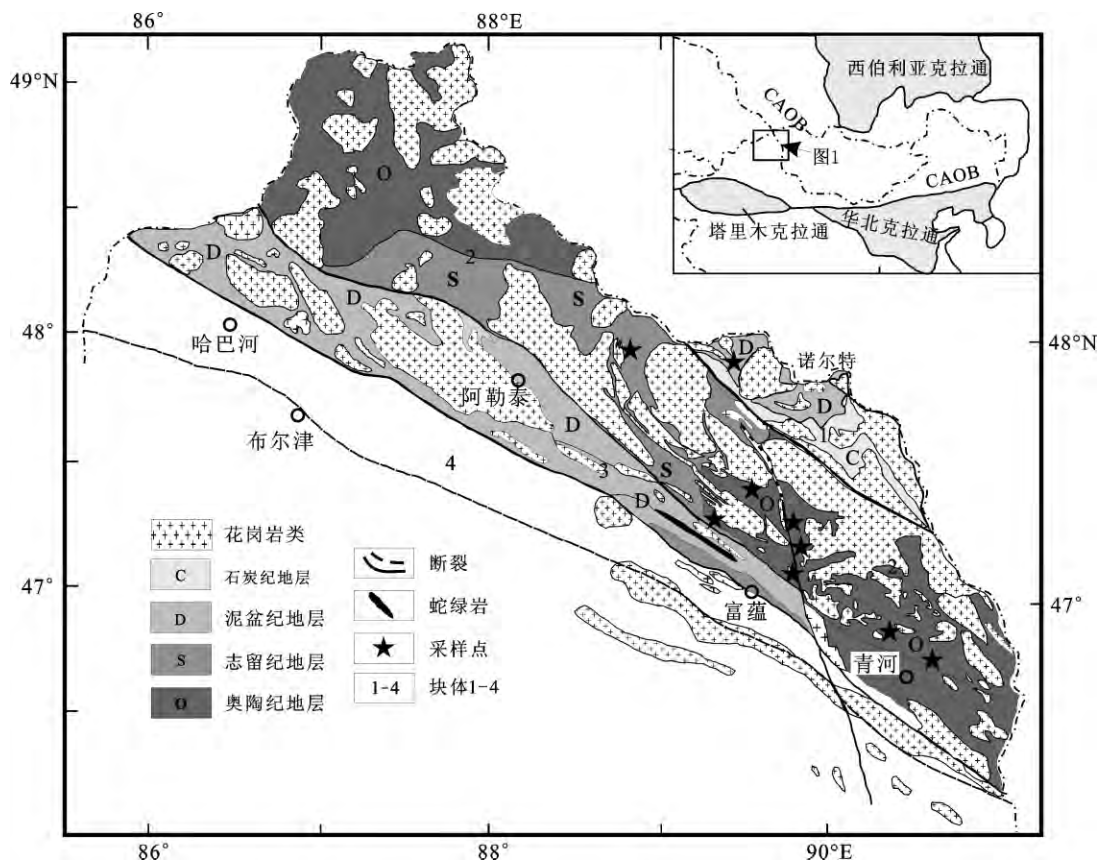


图 1 阿尔泰造山带区域地质及采样分布图

Fig.1 Geological sketch map of the Altay orogen with locations of the studied samples

数字 1-4 分别代表北阿尔泰、中阿尔泰、琼库尔和南阿尔泰构造单元, 据文献[2], [13], [15]和[27]改编

1-4 represent North Altai Domain, Central Domain, Qiongkuer Domain, South Altai Domain, after reference [2], [13], [15] and [27]

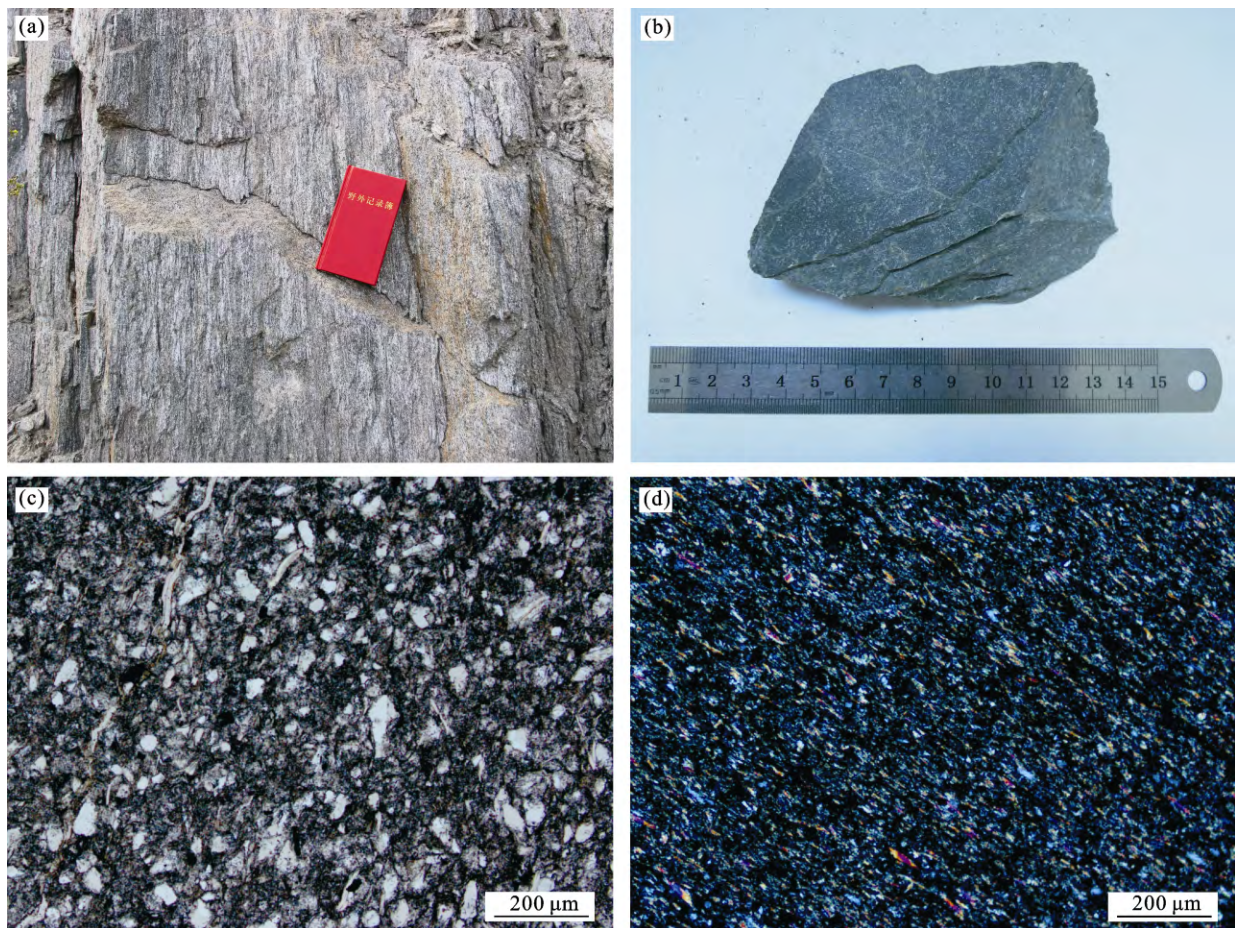


图2 阿尔泰古生代浅变质碎屑岩野外和显微照片(c 单偏光, d 正交偏光)

Fig.2 Field and microscope photos for the Paleozoic formation from the Altay orogen (c under plane-polarized light, d under cross-polarized light)

3 结论

3.1 岩相学特征

采集样品的主要岩性为云母石英片岩、变粉砂岩和板岩。其中黑云母石英片岩为灰绿色, 鳞片变晶结构, 粒状变晶结构, 显微变晶结构, 矿物组成为斜长石(35%~40%), 云母(35%~40%), 石英(25%~30%), 黄铁矿(<5%)。斜长石呈粒状, 部分呈卵圆状, 较大颗粒边缘发育港湾状结构; 云母呈细小鳞片状, 多为白云母; 黑云母含量较少, 石英呈梭状、长条状和细小鳞片状, 定向分布。变质粉砂岩为灰黑色, 变余砾状结构, 交代残余结构, 变余构造, 主要矿物有斜长石(30%~40%), 石英(40%~45%), 云母(5%~10%), 磁铁矿(<5%), 基质(10%~15%)。斜长石为不均匀颗粒, 部分蚀变为云母、绿泥石和黄铁矿; 石英呈卵圆状, 多裂隙; 云母包括黑云母和白云母, 呈细小鳞片状或者长条状, 在基质中分布较多(图

2c)。板岩为灰黑色、灰绿色, 鳞片变晶结构, 条带状, 矿物定向排列, 主要为斜长石(40%~45%)、云母(40%~45%)以及少量的石英和磁铁矿等副矿物(<15%)。斜长石和云母呈细小鳞片状, 显微变晶结构, 均匀分布, 定向排列, 有时呈条带状(图 2d)。

3.2 地球化学特征

3.2.1 主要化学组成

古生代地层不同岩性岩石主要化学组成分析结果列于表 1。

在哈巴河群 11 个样品中, 除 HB-6 外, 其他 10 个样品中 SiO_2 、 Al_2O_3 变化于 59.80%~80.80%、8.80%~17.90%之间; $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 、 MgO 、 CaO 分布于 2.75%~7.97%、1.53%~6.69%、0.20%~2.80%范围; K_2O 、 Na_2O 则变化于 0.96%~3.78%、0.30%~3.39%之间。其中 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ 、 TiO_2 含量分布于 4.35%~14.50%、0.40%~0.92%之间, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$ 值分布于 0.11~0.30、0.39~9.54、2.26~32.67 之间; 除半数样品显示较高的

表 1 阿尔泰造山带古生代地层的主要化学组成(%)
Table 1 The main chemistry compositions (%) of the Paleozoic formations from the Altay orogen

地层	奥陶纪哈巴河群 (O ₂ hb ¹⁻³)										
岩性	云母片岩	黑云母片岩	石英片岩	片岩	变粒岩	片岩	千枚岩	石英片岩	石英片岩	石英片岩	片岩
样号	HB-1	HB-2	HB-3	HB-4	HB-5	HB-6	HB-7	HB-8	HB-9	HB-10	HB-11
SiO ₂	66.90	67.90	80.80	71.10	80.50	52.60	63.50	60.20	78.30	59.80	69.90
TiO ₂	0.73	0.77	0.45	0.65	0.40	1.24	0.75	0.92	0.51	0.87	0.66
Al ₂ O ₃	16.10	17.10	9.00	14.00	8.80	17.20	15.30	17.90	9.50	16.50	13.70
Fe ₂ O ₃ ^T	6.31	5.62	2.82	4.36	2.75	8.94	6.21	7.97	3.33	7.78	5.96
MgO	5.23	3.11	1.53	1.96	3.31	5.64	4.57	4.13	3.71	6.69	2.79
CaO	0.20	0.73	1.67	2.80	1.22	6.07	1.28	1.34	1.38	1.84	1.46
Na ₂ O	0.30	2.20	2.02	3.39	1.16	4.86	2.20	2.95	1.61	2.27	1.86
K ₂ O	2.84	2.40	1.31	1.33	1.98	0.96	2.36	3.78	1.26	3.33	2.28
MnO	0.07	0.06	0.05	0.08	0.02	0.16	0.05	0.08	0.01	0.07	0.09
P ₂ O ₅	0.13	0.04	0.20	0.18	0.07	0.63	0.15	0.14	0.09	0.10	0.17
LOI	0.91	0.73	0.53	1.50	0.65	1.01	3.79	1.24	0.64	1.33	1.23
Total	99.72	100.66	100.38	101.35	100.86	99.31	100.16	100.65	100.34	100.58	100.10
Fe ₂ O ₃ ^T +MgO	11.54	8.73	4.35	6.32	6.06	14.60	10.80	12.10	7.04	14.50	8.75
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.24	0.25	0.11	0.20	0.11	0.33	0.24	0.30	0.12	0.28	0.20
K ₂ O/Na ₂ O	9.54	1.09	0.65	0.39	1.70	0.20	1.07	1.28	0.79	1.46	1.23
Al ₂ O ₃ /(CaO+Na ₂ O)	32.67	5.84	2.42	2.26	3.69	1.58	4.38	4.18	3.18	4.01	4.12

地层	志留纪库鲁姆提群 (S ₂₋₄ k ¹⁻²)						泥盆纪康布铁堡组 (D ₁ k ¹⁻⁴)					
岩性	石英片岩	石英片岩	石英片岩	石英片岩	变粉砂岩	石英片岩	片岩	片岩	变粒岩	变粒岩	变粒岩	变粒岩
样号	KL-1	KL-2	KL-3	KL-4	KL-5	KL-6	KB-1	KB-2	KB-3*	KB-4*	KB-5*	KB-6*
SiO ₂	63.00	77.00	72.20	76.05	57.20	73.10	73.56	74.53	75.98	78.19	76.57	79.10
TiO ₂	0.80	0.53	0.54	0.70	0.89	0.56	0.55	0.50	0.11	0.08	0.15	0.17
Al ₂ O ₃	15.80	10.20	12.60	11.10	19.30	11.40	12.56	10.82	13.03	10.78	13.04	11.89
Fe ₂ O ₃ ^T	6.73	3.33	5.05	3.97	8.15	4.50	4.16	4.44	3.69	2.78	3.26	2.84
MgO	4.96	3.72	2.79	1.85	5.87	3.78	1.94	2.42	0.34	0.12	0.34	0.23
CaO	1.40	0.84	2.30	2.24	0.28	2.01	0.81	1.40	1.36	0.15	0.84	0.64
Na ₂ O	1.22	0.68	2.27	1.76	2.00	1.99	0.74	1.71	5.21	0.56	6.19	5.61
K ₂ O	3.22	2.59	1.96	1.58	2.94	1.48	3.54	2.09	1.64	8.21	0.85	0.40
MnO	0.07	0.01	0.09	0.10	0.03	0.04	0.05	0.06	0.02	0.01	0.02	0.02
P ₂ O ₅	0.15	0.11	0.21	0.19	0.15	0.12	0.15	0.14	0.04	0.02	0.03	0.02
LOI	2.25	1.19	1.23	0.63	3.91	1.10	1.49	0.79	0.02	0.09	0.00	0.27
Total	99.60	100.20	101.24	100.62	100.72	100.08	99.61	98.94	101.45	101.00	101.30	101.20
Fe ₂ O ₃ ^T +MgO	11.69	7.05	7.84	5.82	14.02	8.28	6.10	6.90	4.00	2.90	3.60	3.10
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.33	0.13	0.18	0.14	0.34	0.16	0.17	0.15	0.17	0.14	0.17	0.15
K ₂ O/Na ₂ O	2.64	3.80	0.86	0.89	1.47	0.75	4.78	1.22	0.31	14.56	0.14	0.07
Al ₂ O ₃ /(CaO+Na ₂ O)	6.01	6.72	2.77	2.76	8.48	2.85	8.10	3.48	1.98	15.01	1.85	1.90

地层	泥盆纪阿勒泰组 (D ₂ al ¹⁻³)				泥盆-石炭纪库马苏组 (D ₃ C ₁ k ¹)				石炭纪红山嘴组 (C ₁ hshz ¹⁻³)				
岩性	片岩	石英片岩	板岩	板岩	片岩	变砂岩	板岩	变砂岩	板岩	板岩	变砂岩	板岩	变砂岩
样号	ALT-1	ALT-2	ALT-3	ALT-4	KM-1	KM-2	KM-3	KM-4	KM-5	H-1	H-21	H-3	H-4
SiO ₂	64.80	62.50	68.00	61.60	61.10	61.90	57.60	74.40	52.20	66.40	75.60	80.20	74.10
TiO ₂	0.64	0.69	0.57	0.55	0.73	0.75	0.90	0.87	0.87	1.01	0.65	0.46	0.72
Al ₂ O ₃	15.10	15.70	14.50	18.50	16.80	16.40	19.50	11.60	15.90	13.90	12.20	9.00	11.00

(续表 1)

地 层	泥盆纪阿勒泰组 (D _{2al} ¹⁻³)				泥盆-石炭纪库马苏组 (D ₃ C _{1k} ¹)					石炭纪红山嘴组 (C _{1hshz} ¹⁻³)			
	片岩	石英片岩	板岩	板岩	片岩	变砂岩	板岩	变砂岩	板岩	板岩	变砂岩	板岩	变砂岩
样 号	ALT-1	ALT-2	ALT-3	ALT-4	KM-1	KM-2	KM-3	KM-4	KM-5	H-1	H-21	H-3	H-4
Fe ₂ O ₃ ^T	6.83	5.48	3.72	3.83	8.51	8.10	8.07	3.37	6.91	8.17	3.00	2.95	5.51
MgO	4.98	4.57	3.07	3.09	5.40	3.91	4.85	1.73	5.62	3.20	2.11	3.36	3.44
CaO	0.71	1.68	2.98	0.87	0.23	0.63	0.33	0.99	4.79	0.43	0.31	0.27	0.26
Na ₂ O	1.61	2.60	3.67	1.60	1.04	1.43	1.60	0.47	2.98	1.73	2.19	1.66	1.14
K ₂ O	2.09	5.31	1.69	7.58	2.45	3.06	2.88	2.37	0.91	3.89	1.95	1.13	1.43
MnO	0.15	0.05	0.09	0.09	0.00	0.03	0.01	0.03	0.08	0.03	0.02	0.01	0.01
P ₂ O ₅	0.07	0.11	0.02	0.07	0.14	0.11	0.22	0.20	0.09	0.27	0.15	0.10	0.16
LOI	2.88	1.14	0.91	1.76	4.44	4.09	4.55	3.45	9.98	0.69	1.81	1.43	2.26
Total	99.86	99.83	99.22	99.54	100.84	100.41	100.51	99.48	100.33	99.72	99.99	100.57	100.03
Fe ₂ O ₃ ^T +MgO	11.80	10.05	6.79	6.92	13.90	12.00	12.90	5.10	12.50	11.40	5.11	6.31	8.95
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.28	0.29	0.31	0.32	0.27	0.26	0.34	0.16	0.27	0.21	0.16	0.11	0.15
K ₂ O/Na ₂ O	1.30	2.04	0.46	4.74	2.34	2.15	1.80	5.00	0.30	2.24	0.89	0.68	1.25
Al ₂ O ₃ / (CaO+Na ₂ O)	6.49	3.68	2.18	7.52	13.19	7.95	10.13	7.88	2.05	6.41	4.88	4.63	7.82

注: Fe₂O₃^T为总铁; 样号标“*”者数据引自文献[67]

Fe₂O₃+MgO (8.73%~14.50%)、TiO₂ (0.73%~0.92%) 外, 其他化学组成明显区别于形成于大洋岛弧背景下砂岩的化学组成, 与形成于大陆岛弧背景下砂岩的化学组成相似。

所研究的库鲁姆提群 6 个样品中, SiO₂、Al₂O₃ 变化于 57.20%~77.00%、10.20%~15.80% 之间; Fe₂O₃^T、MgO、CaO 分布于 3.33%~8.15%、1.85%~5.87%、0.28%~2.30% 范围; K₂O、Na₂O 则变化于 1.48%~3.22%、0.68%~2.27% 之间。其中 Fe₂O₃+MgO、TiO₂ 含量分布于 5.85%~14.02%、0.53%~0.89% 之间, Al₂O₃/SiO₂、K₂O/Na₂O、Al₂O₃/(CaO+Na₂O) 值分布于 0.13~0.34、0.75~3.80、2.76~8.48 之间; 除 2 个样品 (KL-1、KL-5) 显示较高的 Fe₂O₃+MgO (11.69%、14.02%)、TiO₂ (0.80%、0.89%) 外, 所有样品的其他化学组成相似于形成于大陆岛弧背景下砂岩的化学组成。

6 个康布铁堡组样品中 SiO₂、Al₂O₃ 变化于 73.56%~79.10%、10.78%~18.50% 之间; Fe₂O₃^T、MgO、CaO 分布于 2.78%~4.44%、0.12%~2.42%、0.15%~1.40% 范围; K₂O、Na₂O 则变化于 0.40%~8.21%、0.56%~6.19% 之间。其中 Fe₂O₃+MgO、TiO₂ 含量分布于 2.90%~6.90%、0.08%~0.55% 之间, Al₂O₃/SiO₂、K₂O/Na₂O、Al₂O₃/(CaO+Na₂O) 值分布变化于 0.14~0.17、0.07~14.56、1.85~15.01 之间; 除样品 KB-1 和 KB-4 显示较高的 Al₂O₃/(CaO+Na₂O) 值 (8.01、15.01) 以及半数的样品 TiO₂ 含量和 K₂O/Na₂O

值较低外, 所有样品的其他化学组成相似于形成于大陆岛弧背景下砂岩的化学组成。

4 个阿勒泰组样品中 SiO₂、Al₂O₃ 变化于 61.60%~68.00%、14.50%~18.50% 之间; Fe₂O₃^T、MgO、CaO 分布于 3.72%~6.83%、3.07%~4.98%、0.71%~2.98% 范围; K₂O、Na₂O 则变化于 1.69%~7.58%、1.60%~3.67% 之间。其中 Fe₂O₃+MgO、TiO₂ 含量分布于 6.79%~11.80%、0.55%~0.69% 之间, Al₂O₃/SiO₂、K₂O/Na₂O、Al₂O₃/(CaO+Na₂O) 值变化于 0.28~0.32、0.46~4.74、2.18~7.52 之间; 除 ALT-1、ALT-2 显示较高的 Fe₂O₃+MgO (11.80%、10.05%) 以及所有样品显示较高的 Al₂O₃/SiO₂ 值外, 所有样品的其他化学组成与形成于大陆岛弧背景下砂岩的化学组成相似。

在库马苏组群 5 个样品中, 除 KM-5 外, 其他 4 个样品中 SiO₂、Al₂O₃ 变化于 57.60%~74.40%、11.60%~19.50% 之间; Fe₂O₃^T、MgO、CaO 分布于 3.37%~8.51%、1.73%~5.40%、0.23%~4.79% 范围; K₂O、Na₂O 则变化于 2.37%~3.06%、0.47%~1.60% 之间。其中 Fe₂O₃+MgO、TiO₂ 含量分布于 5.10%~13.90%、0.73%~0.90% 之间, Al₂O₃/SiO₂、K₂O/Na₂O、Al₂O₃/(CaO+Na₂O) 值分布于 0.16~0.34、1.80~5.00、7.88~13.19 之间; 除样品 KM-4 外, 其他 3 个样品显示较高的 Fe₂O₃+MgO (12.00%~13.90%)、Al₂O₃/SiO₂ 值 (0.26~0.34), 但所有 4 个样品的其他化学组成与形成于大陆岛弧背景下砂岩的化学组成相似。

4 个红山嘴组样品中 SiO_2 、 Al_2O_3 变化于 66.40%~80.20%、9.00%~13.90% 之间; Fe_2O_3^T 、 MgO 、 CaO 分布于 2.95%~8.17%、2.11%~3.44%、0.26%~0.43% 范围; K_2O 、 Na_2O 则变化于 1.13%~3.89%、1.14%~2.19% 之间。其中 $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ 、 TiO_2 含量分布于 5.11%~11.40%、0.46%~1.01% 之间, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$ 值分布于 0.11~0.21、0.68~2.24、6.41~7.82 之间; 除 H-1、H-4 显示较高的 $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ (11.40%、8.95%)、 TiO_2 (1.01%、0.72%) 含量外, 所有样品的其他化学组成与形成于大陆岛弧背景下砂岩的化学组成相似。

3.2.2 微量元素地球化学

古生代地层不同岩性岩石微量元素组成分析结果列于表 2。除 HB-6 样品外, 其他 10 个哈巴河群样品 REE 含量在 89.2~199.5 $\mu\text{g/g}$ 之间, $\delta\text{Eu}=0.51\sim 0.86$; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 变化于 6.26~9.67、1.23~2.06 之间, 指示轻重稀土之间分异明显, 而中重稀土之间分异不明显。球粒陨石标准化 REE 分布模式为 LREE 富集、弱负 Eu 异常的右倾直线型(图 3a)。6

个库鲁姆提群样品 REE 含量在 79.7~171.0 $\mu\text{g/g}$ 之间, $\delta\text{Eu}=0.66\sim 0.80$; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 变化于 5.25~8.88、1.08~1.52 之间, 指示存在明显的轻重稀土之间分异, 而中重稀土之间分异不明显; 球粒陨石标准化 REE 分布模式为 LREE 富集、弱负 Eu 异常的右倾直线型(图 3b); 6 个康布铁堡组样品 REE 含量在 117.7~233.6 $\mu\text{g/g}$ 之间, $\delta\text{Eu}=0.31\sim 0.90$; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 变化于 3.03~9.06、0.87~1.64 之间, 指示存在明显的轻重稀土之间分异, 弱的中重稀土之间分异; 球粒陨石标准化 REE 分布模式为 LREE 富集、弱负 Eu 异常的右倾直线型(图 3c); 4 个阿勒泰组样品 REE 含量在 102.1~313.1 $\mu\text{g/g}$ 之间, $\delta\text{Eu}=0.54\sim 0.66$; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 变化于 5.70~9.09、1.13~1.63 之间, 指示轻重稀土之间分异明显, 而中重稀土之间分异不明显; 球粒陨石标准化 REE 分布模式为 LREE 富集、弱负 Eu 异常的右倾直线型(图 3d); 除样品 KM-5 外, 其他 4 个库马苏组样品 REE 含量变化于 140.7~271.1 $\mu\text{g/g}$ 范围, $\delta\text{Eu}=0.61\sim 0.72$, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 变化于 7.12~12.74、1.50~1.83 之间,

表 2 阿尔泰造山带古生代地层的微量元素组成 ($\mu\text{g/g}$)

Table 2 The trace element compositions ($\mu\text{g/g}$) of the Paleozoic formation from the Altay orogen

样号	HB-1	HB-2	HB-3	HB-4	HB-5	HB-6	HB-7	HB-8	HB-9	HB-10	HB-11
La	39.50	33.60	20.90	28.10	17.80	59.50	33.20	35.10	26.00	30.90	28.40
Ce	83.00	71.30	44.20	57.00	36.41	109.00	67.40	72.60	52.10	63.80	58.20
Pr	9.71	8.48	5.16	6.66	4.08	11.20	7.72	8.35	5.89	7.33	6.48
Nd	38.10	33.50	20.20	26.40	15.70	38.90	30.90	32.50	22.60	29.20	25.20
Sm	7.15	6.58	3.90	5.20	3.18	6.56	6.09	6.44	4.17	5.92	5.09
Eu	1.48	1.03	1.03	1.37	0.78	2.13	1.29	1.44	0.96	1.54	1.18
Gd	6.56	5.88	3.72	4.67	2.87	5.93	5.47	5.80	3.74	5.38	4.56
Tb	0.97	0.89	0.61	0.79	0.49	0.92	0.91	0.93	0.61	0.91	0.77
Dy	5.27	4.44	3.29	4.35	2.91	4.91	5.20	4.95	3.39	5.30	4.27
Ho	1.03	0.82	0.61	0.91	0.63	0.96	1.08	1.03	0.68	1.13	0.89
Er	3.05	2.34	1.76	2.64	1.90	2.92	3.20	3.05	2.01	3.29	2.68
Tm	0.43	0.34	0.24	0.39	0.30	0.44	0.46	0.44	0.30	0.51	0.40
Yb	2.84	2.29	1.67	2.47	1.87	2.76	2.87	2.92	1.95	3.25	2.53
Lu	0.42	0.34	0.25	0.37	0.28	0.44	0.44	0.44	0.30	0.51	0.38
Y	29.10	22.60	16.30	24.90	17.50	26.60	30.10	27.70	18.70	30.30	24.80
Sc	13.60	15.70	8.50	11.80	5.99	11.70	14.00	20.60	7.60	18.50	14.10
Th	11.80	15.70	7.04	8.56	6.59	10.20	12.20	12.90	8.64	10.80	9.76
ΣREE	199.51	171.83	107.54	141.32	89.20	246.57	166.23	175.99	124.70	158.97	141.03
Eu/Eu*	0.67	0.51	0.84	0.86	0.80	1.05	0.69	0.73	0.75	0.84	0.76
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	9.16	9.67	8.24	7.49	6.27	14.20	7.62	7.92	8.78	6.26	7.39
$(\text{Gd}/\text{Yb})_N$	1.85	2.06	1.78	1.51	1.23	1.72	1.53	1.59	1.54	1.33	1.44
La/Sc	2.90	2.14	2.46	2.38	2.97	5.09	2.37	1.70	3.42	1.67	2.01
Th/Sc	0.87	1.00	0.83	0.73	1.10	0.87	0.87	0.63	1.14	0.58	0.69

(续表 2)

样号	KL-1	KL-2	KL-3	KL-4	KL-5	KL-6	KB-1	KB-2	KB-3	KB-4	KB-5	KB-6	
La	24.40	16.20	25.40	33.30	34.50	17.60	27.5	27	18.2	26.6	41.6	29.5	
Ce	51.14	32.73	52.45	66.40	68.40	37.30	60.3	56.2	44.2	53.6	94.4	62.6	
Pr	5.87	3.62	5.93	7.33	8.19	4.33	6.85	6.85	5.1	7.29	11.2	7.71	
Nd	22.40	13.40	23.10	27.90	31.70	16.50	24.7	25.5	18.6	29	46.8	33.1	
Sm	4.65	2.69	4.69	5.57	6.08	3.38	4.72	4.97	6.96	6.82	10.7	6.7	
Eu	0.99	0.66	0.95	1.09	1.30	0.86	0.93	0.96	0.63	1.74	0.957	1.04	
Gd	4.15	2.52	4.08	4.69	5.60	3.27	4.04	4.24	5.61	5.06	7.3	5.54	
Tb	0.75	0.45	0.70	0.78	0.92	0.59	0.63	0.66	1.12	0.846	1.26	1.1	
Dy	4.55	2.74	4.16	4.28	5.53	3.56	3.72	3.7	6.31	5.48	6.97	6.51	
Ho	0.98	0.59	0.86	0.87	1.14	0.75	0.77	0.81	1.42	1.07	1.1	1.48	
Er	2.89	1.75	2.53	2.51	3.39	2.23	2.23	2.11	4.29	3.59	3.44	4.19	
Tm	0.43	0.27	0.39	0.38	0.50	0.34	0.31	0.32	0.71	0.57	0.59	0.82	
Yb	2.85	1.86	2.51	2.47	3.27	2.21	2	2.07	3.96	3.81	6.7	4.92	
Lu	0.44	0.27	0.39	0.37	0.50	0.34	0.32	0.36	0.60	0.54	0.54	0.75	
Y	26.80	16.50	24.30	22.80	31.90	21.00	21.9	22.2	37.2	33.9	31.8	41.8	
Sc	14.90	7.63	10.70	9.15	18.40	9.46	10	9	4.65	6.58	5.32	8.96	
Th	12.40	10.80	11.80	13.30	12.70	8.76	12.70	11.15	12.1	11.1	18.7	11.2	
ΣREE	126.49	79.75	128.14	157.94	171.02	93.26	139.02	135.75	117.71	146.01	233.56	165.96	
Eu/Eu*	0.70	0.78	0.67	0.66	0.69	0.80	0.66	0.65	0.31	0.90	0.33	0.53	
(La/Yb) _N	5.64	5.74	6.67	8.88	6.95	5.25	9.06	8.59	3.03	4.60	4.09	3.95	
(Gd/Yb) _N	1.17	1.08	1.30	1.52	1.37	1.18	1.62	1.64	1.13	1.06	0.87	0.90	
La/Sc	1.64	2.12	2.37	3.64	1.88	1.86	2.75	3.00	3.91	4.04	7.82	3.29	
Th/Sc	0.83	1.42	1.10	1.45	0.69	0.93	1.27	1.24	2.60	1.69	3.52	1.25	
样号	ALT-1	ALT-2	ALT-3	ALT-4	KM-1	KM-2	KM-3	KM-4	KM-5	H-1	H-2	H-3	H-4
La	19.90	44.30	37.00	64.20	35.50	28.50	38.60	59.00	12.10	27.50	43.20	31.80	29.00
Ce	41.30	89.60	78.71	131.28	73.60	60.40	79.70	118.80	26.80	66.63	90.50	65.10	58.60
Pr	4.72	10.60	9.17	14.70	8.28	6.93	9.61	13.10	3.29	8.84	10.30	7.23	7.00
Nd	18.60	41.70	35.10	57.40	31.60	26.50	37.70	48.40	13.90	37.90	39.10	27.40	27.30
Sm	3.78	7.95	7.02	10.90	5.75	5.07	7.69	8.61	3.24	8.63	7.37	5.01	5.67
Eu	0.70	1.34	1.21	2.18	1.05	1.04	1.64	1.56	0.99	1.55	1.25	1.07	1.07
Gd	3.25	7.35	6.24	9.45	4.98	3.98	7.30	6.96	3.57	8.55	6.13	4.27	4.84
Tb	0.56	1.16	1.07	1.56	0.82	0.57	1.24	1.02	0.60	1.43	0.94	0.62	0.74
Dy	3.37	6.63	5.89	8.63	4.54	2.83	7.18	5.47	3.54	8.21	4.96	3.22	4.16
Ho	0.72	1.33	1.20	1.76	0.93	0.59	1.40	1.07	0.75	1.65	0.99	0.59	0.79
Er	2.21	3.98	3.61	5.02	2.74	1.84	4.07	3.11	2.18	4.56	2.88	1.72	2.41
Tm	0.34	0.59	0.54	0.72	0.40	0.28	0.57	0.46	0.32	0.62	0.42	0.25	0.35
Yb	2.30	3.92	3.60	4.65	2.65	1.91	3.57	3.05	2.08	4.01	2.68	1.57	2.32
Lu	0.35	0.57	0.55	0.67	0.38	0.30	0.51	0.47	0.30	0.58	0.41	0.24	0.36
Y	20.80	36.90	32.20	44.80	25.20	15.50	37.90	28.60	19.80	42.40	26.90	16.30	21.70
Sc	16.20	14.70	15.10	17.50	7.16	16.90	18.80	11.40	21.70	16.70	9.33	6.28	9.57
Th	7.86	13.10	23.90	18.90	16.00	8.20	12.80	26.70	4.06	12.50	21.40	13.20	12.70
ΣREE	102.10	221.02	190.91	313.12	173.22	140.74	200.78	271.08	73.66	180.66	211.13	150.09	144.61
Eu/Eu*	0.62	0.54	0.56	0.66	0.61	0.72	0.68	0.62	0.90	0.56	0.57	0.71	0.63
(La/Yb) _N	5.70	7.44	6.77	9.09	8.82	9.83	7.12	12.74	3.83	4.52	10.62	13.34	8.23
(Gd/Yb) _N	1.13	1.50	1.39	1.63	1.50	1.67	1.64	1.83	1.37	1.71	1.83	2.18	1.67
La/Sc	1.23	3.01	2.45	3.67	4.96	1.69	2.05	5.18	0.56	1.65	4.63	5.06	3.03
Th/Sc	0.49	0.89	1.58	1.08	2.23	0.49	0.68	2.34	0.19	0.75	2.29	2.10	1.33

注: 球粒陨石数据引自文献[68]; Eu/Eu*=Eu_N/(Sm_N+Gd_N)^{0.5}

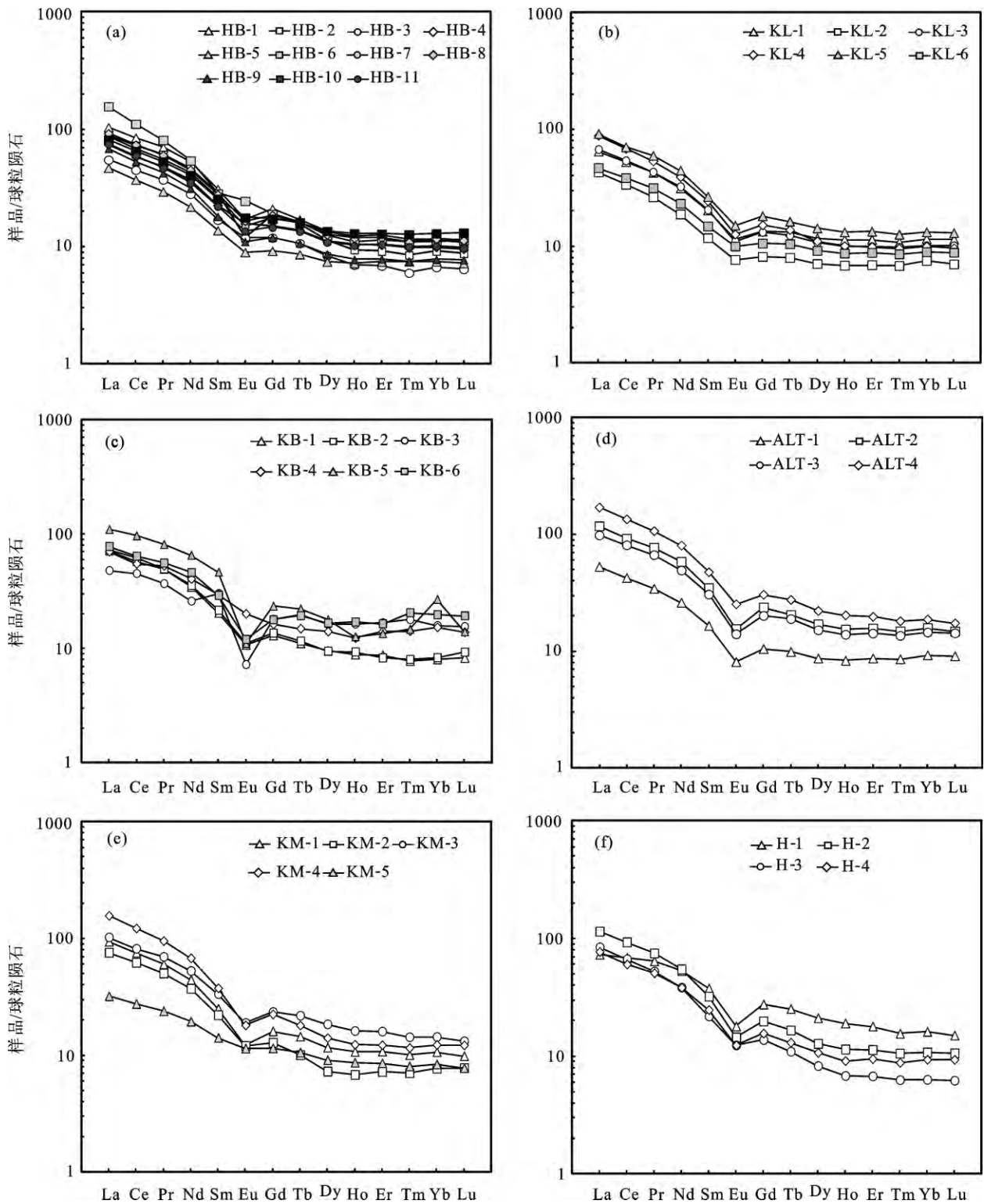


图 3 阿尔泰造山带古生代地层球粒陨石标准化 REE 分布模式

Fig.3 Chondrite-normalized REE patterns of the Paleozoic formation from the Altay orogen
球粒陨石数据引至文献[68]
Chondrite data after Reference [68]

球粒陨石标准化 REE 分布模式为 LREE 富集、弱负 Eu 异常的右倾直线型(图 3e); 而样品 KM-5 以弱负 Eu 异常($\delta Eu=0.90$), 低的 La、Ce 和 REE 含量(分别

为 12.1、26.8 和 73.7 $\mu g/g$), 最小的轻重稀土之间分异($(La/Yb)_N=3.83$)为特征, 明显不同于其他库马苏组样品。4 个红山嘴组样品 REE 含量分布于 144.61~

211.13 $\mu\text{g/g}$ 范围, $\delta\text{Eu}=0.56\sim 0.71$; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 变化于 4.52~13.34、1.67~2.18 之间, 指示轻重稀土之间分异明显, 而中重稀土之间分异不明显, 球粒陨石标准化 REE 分布模式为 LREE 富集、弱负 Eu 异常的右倾直线型(图 3f)。

哈巴河群、库鲁姆提群和阿勒泰组样品中的 Th/Sc 值主要变化于 0.49~1.58 之间, 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中的 Th/Sc 比值(分别为 0.15、2.59 和 3.06), 与形成于大陆岛弧砂岩中 Th/Sc 值(0.85)及上地壳平均值(0.97)相当; 6 个康布铁堡组样品中 Th/Sc 值变化于 1.24~3.52 之间, 其中 4 个样品显示 Th/Sc 值变化于 1.24~1.69 之间, 与形成于大陆岛弧砂岩中 Th/Sc 值及上地壳平均值相当; 而库马苏组和红山嘴组样品中 Th/Sc 值变化于 0.19~2.34 范围, 除去 KM-5 的 Th/Sc 值为 0.19 以外, 4 个样品(KM-2、KM-3、H-1 和 H-4)显示 Th/Sc 值变化于 0.49~1.33 之间, 与形成于大陆岛弧砂岩中 Th/Sc 值及上地壳平均值相当; 其他 4 个样品(KM-1、KM-4、H-2 和 H-3) Th/Sc 值范围为 2.10~2.34, 与形成于活动大陆边缘砂岩中的 Th/Sc 值接近。此外, 哈巴河群、库鲁姆提群和阿勒泰组样品中 La/Sc 值主要变化于 1.23~3.67 范围, 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中的 La/Sc 值(分别为 0.55、4.55 和 6.24), 与形成于大陆岛弧砂岩 La/Sc 值(1.82)及上地壳平均值(2.73)相当; 而来自库马苏组和红山嘴组的 9 个样品中 La/Sc 值主要变化于 1.65~5.18 范围, 除去 KM-5 的 La/Sc 值为 0.56 以外, 4 个样品(KM-2、KM-3、H-1 和 H-4)的 La/Sc 值变化于 1.65~3.03 之间, 与形成于大陆岛弧砂岩中 La/Sc 值及上地壳平均值相当; 其他 4 个样品(KM-1、KM-4、H-2 和 H-3)的 La/Sc 比值变化于 4.63~5.18 之间, 与活动大陆边缘背景下形成的砂岩中 La/Sc 值一致。

4 讨论

4.1 原岩恢复

变质岩的原岩恢复可以了解阿尔泰地区古生代地层原岩类型及其沉积环境。已有的研究显示, 利用西蒙尼图解、K-A 图解以及 DF 指数判别法能有效判别变质岩的原岩类型^[70]。阿尔泰造山带中古生代地层的原岩恢复相关系数计算结果列于表 3。除泥盆纪康布铁堡组 3 个样品(KB-3、KB-5、KB-6)和

阿勒泰组 2 个样品(ALT-3、ALT-4)的 DF = 0 外, 其余样品的 DF 值均为负值, 主要分布于 -1 ~ -9 范围, 表明阿尔泰造山带中古生代浅变质碎屑岩的原岩主要为沉积岩。在 K-A 图解中, 除少数奥陶纪哈巴河群(HB-3、HB-4、HB-6)、泥盆纪康布铁堡组(KB-3、KB-5、KB-6)和阿勒泰组(ALT-3)、石炭纪库马苏组(KM-5)样品落入火成岩区外, 其他所有样品落入了沉积的泥质粉砂质亚区(图 4a)。在西蒙尼图解中, 除少数奥陶纪哈巴河群(HB-6)、泥盆纪康布铁堡组(KB-3、KB-5)和阿勒泰组(ALT-4)、石炭纪库马苏组(KM-5)样品落入火山岩区外, 绝大部分的样品落入了沉积岩区, 且以泥砂质沉积岩为主(图 4b)。综上所述, 阿尔泰地区古生代浅变质碎屑原岩为泥砂质沉积岩。

4.2 源区风化-沉积特征

已有研究显示, 碎屑岩的化学组成容易受源区岩石性质和化学风化作用强度的制约。Nesbitt *et al.* 在对加拿大古元古代 Huronian 超群的碎屑岩研究时发现, 上地壳的化学风化作用能够使长石分解, 形成黏土矿物, 伴随活潑阳离子(如 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+})的流失, 导致残留元素(如 Al^{3+} 、 Ti^{4+})与活泼元素的比值变大, 而化学蚀变指数(CIA, chemical index of alteration)就是通过元素比值的变化来反映源区风化程度的较为有效的方法。CIA < 70, 反映源区经历了寒冷、干燥的条件下的弱的化学风化作用, 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, 说明源区经历了炎热、潮湿条件下的强烈的化学风化作用^[45-46]。由于黏土矿物比非黏土矿物含有较高的 Al_2O_3 , 而 K_2O 、 Na_2O 和 CaO 含量较低, 因此成分变异指数(ICV, index of compositional variability)可以反映碎屑岩的成分成熟度, 判断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的再循环过程。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^[47,71], 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强化学风化条件下的首次沉积过程^[72]。

由表 3 可知, 阿尔泰古生代地层样品中, 除奥陶纪哈巴河群中 1 个样品(HB-1)显示高的 CIA 值外, 哈巴河群样品 CIA 分布于 50~70 之间, 志留纪库鲁姆提群 CIA 分布于 57~68 之间, 泥盆纪康布铁堡组

表 3 阿尔泰造山带中古生代地层原岩恢复相关系数计算结果

Table 3 The calculated correlation index for protolith restitution of the Paleozoic formation from the Altay orogen

样号	岩性	A	K	DF	(al+fm)-(alk+c)	Si	原岩	CIA	ICV
H-1	板岩	70	69	-4	55	321	泥质岩	66	1.33
H-2	变质粉砂岩	73	47	-4	51	499	泥质岩	67	0.84
H-3	板岩	75	40	-7	63	572	泥质岩	68	1.10
H-4	变质粉砂岩	79	56	-8	71	463	泥质岩	76	1.14
KM-1	石英片岩	82	70	-7	77	255	泥质岩	79	1.10
KM-2	变质粉砂岩	76	68	-5	64	274	泥质岩	71	1.09
KM-3	板岩	80	64	-5	71	226	泥质岩	77	0.95
KM-4	变质砂岩	75	83	-5	56	543	砂质岩	74	0.85
KM-5	板岩	65	23	-1	41	180	火成岩	60	1.39
ALT-1	云母片岩	77	56	-6	68	286	泥质岩	71	1.12
ALT-2	石英片岩	62	67	-1	41	241	泥质岩	55	1.29
ALT-3	板岩	63	32	0	30	303	火成岩	52	1.08
ALT-4	板岩	65	83	0	40	253	火山岩	60	0.94
KB-1	片岩	71	83	-5	51	467	泥质岩	67	0.93
KB-2	片岩	68	55	-5	45	460	泥质岩	60	1.16
KB-3	变粒岩	61	24	2	12	444	火山岩	51	0.95
KB-4	变粒岩	55	94	-2	12	578	砂质岩	50	1.10
KB-5	变粒岩	62	12	3	12	454	火山岩	51	0.89
KB-6	变粒岩	64	7	1	14	534	火山岩	52	0.83
KL-1	石英片岩	73	72	-6	61	262	泥质岩	68	1.16
KL-2	石英片岩	71	79	-8	60	480	泥质岩	67	1.15
KL-3	石英片岩	66	46	-3	39	370	砂质岩	57	1.18
KL-4	石英片岩	66	47	-4	36	479	砂质岩	60	1.09
KL-5	变粉砂岩	79	60	-5	70	209	泥质岩	66	1.04
KL-6	石英片岩	68	43	-5	47	382	泥质岩	58	1.26
HB-1	黑云母片岩	83	91	-9	79	303	泥质岩	82	0.97
HB-2	黑云母片岩	76	52	-4	58	319	泥质岩	70	0.87
HB-3	石英片岩	64	39	-4	31	610	火成岩	55	1.09
HB-4	片岩	65	28	-1	29	356	火成岩	54	1.04
HB-5	变粒岩	67	63	-7	50	541	砂质岩	60	1.23
HB-6	片岩	59	16	2	30	155	火成岩	50	1.61
HB-7	千枚岩	72	52	-4	57	274	泥质岩	65	1.14
HB-8	石英片岩	69	56	-2	49	227	泥质岩	62	1.18
HB-9	石英片岩	69	44	-7	53	482	砂质岩	60	1.24
HB-10	石英片岩	69	59	-5	57	206	泥质岩	61	1.38
HB-11	片岩	71	55	-4	50	361	泥质岩	64	1.10

注: $A = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}) \times 100$, $K = \text{K}_2\text{O} / (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) \times 100$ 。图 4b 中西蒙尼图解中 $\text{Si}' = \text{SiO}_2 / 60$, $\text{al}' = \text{Al}_2\text{O}_3 / 102$, $\text{fm}' = 2 \times \text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} / 160 + \text{MgO} / 40 + \text{MnO} / 71$, $\text{c}' = \text{CaO} / 56$, $\text{alk}' = \text{Na}_2\text{O} / 62 + \text{K}_2\text{O} / 94$, $\text{Total} = \text{al}' + \text{fm}' + \text{c}' + \text{alk}'$, $\text{Si} = \text{Si}' / \text{Total}$, $\text{al} = \text{al}' / \text{Total}$, $\text{fm} = \text{fm}' / \text{Total}$, $\text{c} = \text{c}' / \text{Total}$, $\text{alk} = \text{alk}' / \text{Total}$; $\text{DF} = -0.21\text{SiO}_2 - 0.32\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} - 0.98\text{MgO} + 0.55\text{CaO} + 1.46\text{Na}_2\text{O} + 0.54\text{K}_2\text{O} + 10.44$ (质量分数); $\text{CIA} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, 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^[69]; $\text{ICV} = (\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2) / \text{Al}_2\text{O}_3$ (摩尔分数)

CIA 分布于 50~67 之间, 泥盆纪阿勒泰组 CIA 主要分布于 52~60 之间(其中 1 个样品 ALT-1 显示 CIA=71), 石炭纪红山嘴组 CIA 主要分布于 66~68 范围(其中 1 个样品 H-4 显示 CIA=76), 而石炭纪的

库马苏组 CIA 主要分布于 71~79 之间, 其中 2 个样品(KM-1、KM-3) 显示 CIA>75 (分别为 77 和 79), 仅 1 个样品(KM-5)显示低的 CIA 值(60)。上述 CIA 值分布特征表明, 形成哈巴河群、库鲁姆提群、康布

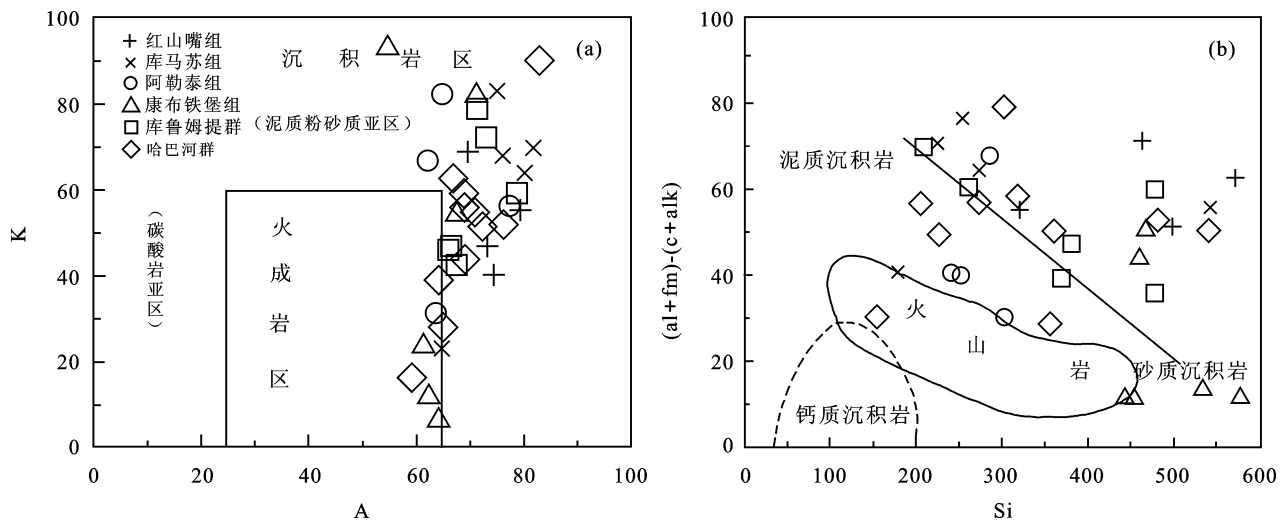


图4 阿尔泰造山带中生代地层原岩恢复 K-A 图解(a)和西蒙图解(b)(据文献[70])

Fig.4 K-A plot (a) and Simonen plot (b) for the Paleozoic formation from the Altay orogen (after reference [70])

铁堡组、阿勒泰组、红山嘴组源区物质经历了相对寒冷、干燥的条件下的弱的化学风化作用,而形成石炭纪的库马苏组的源区物质可能经历了温暖-炎热、湿润-潮湿条件下的中等-强烈化学风化作用。

所研究的古生代地层,自下而上包括奥陶纪哈巴河群、志留纪库鲁姆提群、泥盆纪康布铁堡组和阿勒泰组、石炭纪库马苏组和红山嘴组,总体显示 $ICV > 1.0$, 主要分布于 $1.04 \sim 1.61$, 指示其形成原岩中含有少量黏土矿物,碎屑岩的成熟度较差,很可能代表活动大陆边缘首次直接沉积的产物(图5);而少数样品显示 $ICV < 1.0$, 而 HB-1 ($CIA=82$)、HB-2 ($CIA=70$)、库马苏组 KM-3 ($CIA=77$)、KM-4 ($CIA=$

74)则很可能反映出经历温暖-炎热、湿润-潮湿条件下的中等-强烈化学风化条件下的首次沉积产物。其中康布铁堡组 KB-1 ($CIA=67$)、KB-3 ($CIA=51$)、KB-5 ($CIA=51$)、KB-6 ($CIA=52$),阿勒泰组 ALT-4 ($CIA=60$)、红山嘴组 H-21 ($CIA=67$)因是弱的化学风化作用产物,应是经历了多次循环的再沉积过程。

4.3 源区组成特征

碎屑岩的地球化学特征对确定它们的源区性质有重要的意义。尽管碎屑岩主要化学组成易受风化、成岩作用等地质作用的影响,但抗风化能力较强的稀土及其他不活泼的微量元素可有效进行源区示踪^[48]。在 $La/Sc-Sc/Th$ 图解中^[49,73],样品点显示负的线性相关性,绝大多数样品集中在上地壳附近,而显著不同于洋壳平均组成和地壳平均组成,表明阿尔泰地区古生代地层可能来源于与上地壳组分相似的物质源区(图6a)。在 $La/Th-Hf$ 图解中^[50],绝大多数样品落在了长英质源区,远离被动边缘源区以及大洋岛弧源区,指示其源区物质可能以中-酸性大陆岛弧火山岩为主(图6b)。

4.4 沉积构造环境

已有研究显示,砂岩的化学组成与其所处的沉积盆地的构造环境有密切的成因关系,因此利用砂岩的主要化学组成和相对不活泼的微量元素含量,如 La 、 Sc 、 Th 、 Zr 、 Hf 等,可以判别沉积盆地形成的构造背景。已有的研究揭示,从大洋岛弧→大陆岛弧→活动大陆边缘→被动大陆边缘,其砂质岩石中 ($Fe_2O_3^T+MgO$)、 TiO_2 、 Al_2O_3/SiO_2 值和 Eu/Eu^*

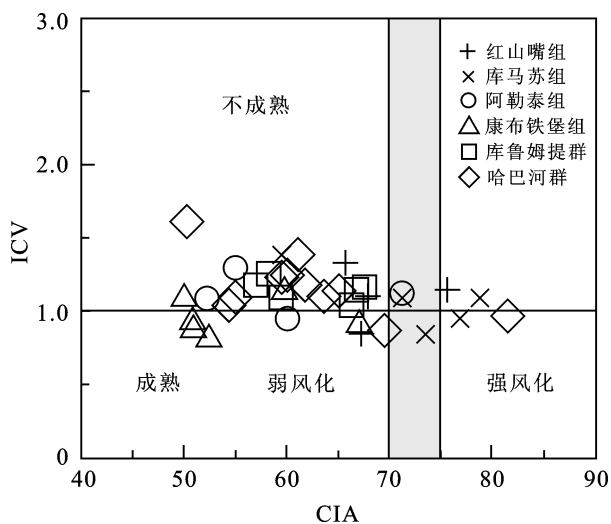


图5 阿尔泰造山带古生代地层 ICV-CIA 指数图解(据文献[45]和[47])

Fig.5 ICV vs. CIA plot for the Paleozoic formation from the Altay orogen (after reference [45] and [47])

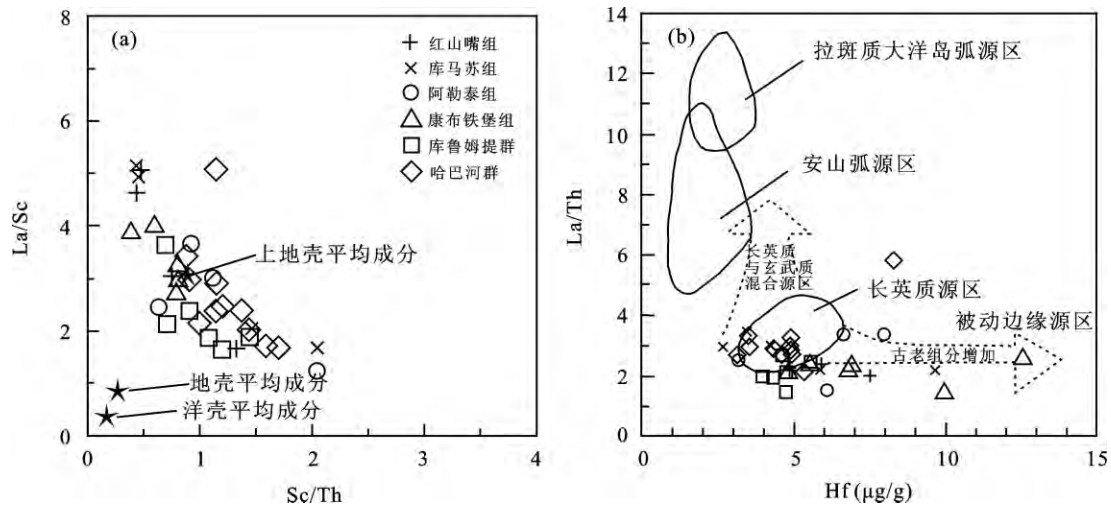


图 6 阿尔泰造山带古生代地层源区判别图解(据文献[49], [50]和[51])

Fig.6 Source discriminate plot for the Paleozoic formation from the Altay orogen (after Reference [49], [50] and [51])

值逐渐降低, 而 La、Ce、REE 含量及 K_2O/Na_2O 、 $Al_2O_3/(CaO+Na_2O)$ 、Th/Sc、La/Sc、 $(La/Yb)_N$ 值明显增大^[52-55,74,75]。

由表 4 可知, 哈巴河群样品(除 HB-6 外)、库鲁姆提群、康布铁堡组、阿勒泰组、库马苏组(除 KM-5 外)和红山嘴组样品中($Fe_2O_3^T+MgO$)、 TiO_2 含量以及 Al_2O_3/SiO_2 、 K_2O/Na_2O 、 $Al_2O_3/(CaO+Na_2O)$ 值明显区别于大洋岛弧背景下形成的砂岩的化学组成, 而微量元素(包括 REE)组成, 如 La、Ce、REE 含量及

Th/Sc、La/Sc、 $(La/Yb)_N$ 值明显不同于形成于大洋岛弧背景下的砂岩, 而与形成于大陆岛弧背景下砂岩或上地壳背景值相当。值得注意的是, 库马苏组(除 KM-5 外)和红山嘴组样品的微量元素组成涵盖了大陆岛弧、活动大陆边缘背景下形成的砂岩的微量元素组成, 如库马苏组(除 KM-5 外)和红山嘴组样品中 La/Sc、Th/Sc 值分别为 1.69~5.18、1.65~5.06 和 0.49~2.34、0.75~2.29, 包含了大陆岛弧、活动大陆边缘背景下形成的砂岩中的 1.82、4.55 和 0.85、2.59。

表 4 阿尔泰造山带古生代地层与不同构造环境下砂岩地球化学参数对比

Table 4 Comparison of geochemical parameter between the Paleozoic formation from the Altay orogen and the sandstone in various tectonic setting

参数	被动大陆边缘	活动大陆边缘	大陆岛弧	大洋岛弧	上地壳	哈巴河群 (n=10)	库鲁姆提群 (n=6)	康布铁堡组 (n=6)	阿勒泰组 (n=4)	库马苏组 (n=4)	红山嘴组 (n=4)
SiO ₂ (%)	81.95	73.86	70.69	58.83	66.00	59.80~80.80	57.20~77.00	73.56~79.10	61.60~68.00	57.60~74.40	66.40~80.20
TiO ₂ (%)	0.49	0.46	0.64	1.06	0.50	0.40~0.92	0.53~0.89	0.08~0.55	0.55~0.69	0.73~0.90	0.46~1.01
Al ₂ O ₃ (%)	8.41	12.89	14.04	17.11	15.20	8.80~17.90	10.20~15.80	10.78~13.04	14.50~18.50	11.60~16.80	9.00~13.90
Fe ₂ O ₃ ^T +MgO (%)	2.89	4.63	6.79	11.73	6.7	4.35~14.50	5.82~14.02	2.90~6.90	6.79~11.80	12.00~13.90	5.11~11.40
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.10	0.18	0.20	0.29	7.15	0.11~0.30	0.13~0.34	0.14~0.17	0.28~0.32	0.16~0.34	0.11~0.21
K ₂ O/Na ₂ O	1.60	0.99	0.61	0.39	0.23	0.39~9.54	0.75~3.80	0.07~14.56	0.46~4.74	1.80~5.00	0.68~2.24
Al ₂ O ₃ /(CaO+Na ₂ O)	4.15	2.56	2.42	1.72	0.87	2.26~32.67	2.76~8.48	1.85~15.01	2.18~7.52	7.88~13.19	6.41~7.82
La (µg/g)	39	37	27	8.2	30	17.8~39.5	16.2~34.5	18.2~41.6	19.9~64.2	28.5~59.0	27.5~43.2
Ce (µg/g)	85	78	59	19.4	64	36.4~83.0	32.7~68.4	44.2~94.4	41.3~131.3	60.4~118.8	58.6~90.5
ΣREE (µg/g)	210	186	146	58	146	89.2~199.5	79.7~171.0	117.7~233.6	102.1~313.1	140.7~271.1	144.6~211.1
(La/Yb) _N	15.9	12.3	11	4.2	9.2	6.26~9.67	5.25~8.88	3.03~9.06	5.70~9.09	7.12~12.74	4.52~13.34
(Gd/Yb) _N	1.86	1.27	1.47	1.23		1.23~2.06	1.08~1.52	0.87~1.64	1.13~1.63	1.50~1.83	1.67~2.18
Eu/Eu*	0.55	0.6	0.8	1.04	0.65	0.51~0.86	0.66~0.80	0.31~0.90	0.54~0.66	0.61~0.72	0.56~0.71
La/Sc	6.24	4.55	1.82	0.55	2.73	1.67~3.42	1.64~3.64	3.00~7.82	1.23~3.67	1.69~5.18	1.65~5.06
Th/Sc	3.06	2.59	0.85	0.15	0.97	0.58~1.10	0.69~1.45	1.24~3.52	0.49~1.58	0.49~2.34	0.75~2.29
推断形成构造背景	/	/	/	/	/	大陆岛弧	大陆岛弧	活动大陆边缘	大陆岛弧	大陆岛弧-活动大陆边缘	大陆岛弧-活动大陆边缘

在微量元素图解 La-Th、Th-Sc-Zr/10 和 La-Th-Sc 的图解中, 绝大部分的样品点投在了大陆岛弧区域, 其中康布铁堡组 KB-3、KB-6 样品点分别投在被动和活动大陆边缘区, 阿勒泰组 ALT-3 样品点投在活动大陆边缘区, 库马苏 KM-5 样品点投在大洋岛弧区, 红山嘴组 H-21 样品点投在被动大陆边缘区(图 7)。在球粒陨石标准化稀土元素分布模式图解上, 哈巴河群、库鲁姆提群、康布铁堡组、阿勒泰组、库马苏组(除 KM-5 外)和红山嘴组样品总体显示 LREE 富集、弱的负 Eu 异常的右倾直线型, 与形成于大陆岛弧、活动大陆边缘背景下砂岩 REE 分布模式相似, 而明显不同于大洋岛弧背景下形成的砂岩(图 8)。因此,

阿尔泰地区古生代碎屑沉积岩的地球化学特征表明碎屑沉积岩沉积在靠近大陆岛弧的活动大陆边缘构造环境。一些学者^[26,29,41-44]对阿尔泰地区哈巴河群、康布铁堡组和阿勒泰组的碎屑沉积岩的地球化学特征、碎屑锆石 U-Pb 年龄以及 Hf 同位素的研究结果也表明其形成于大陆岛弧相关的构造环境, 与本文观点一致。

5 结 论

(1) 阿尔泰造山带中古生代浅变质碎屑岩的原岩主要为泥砂质沉积岩, 包含少量火山岩或火成岩的风化剥蚀的产物。

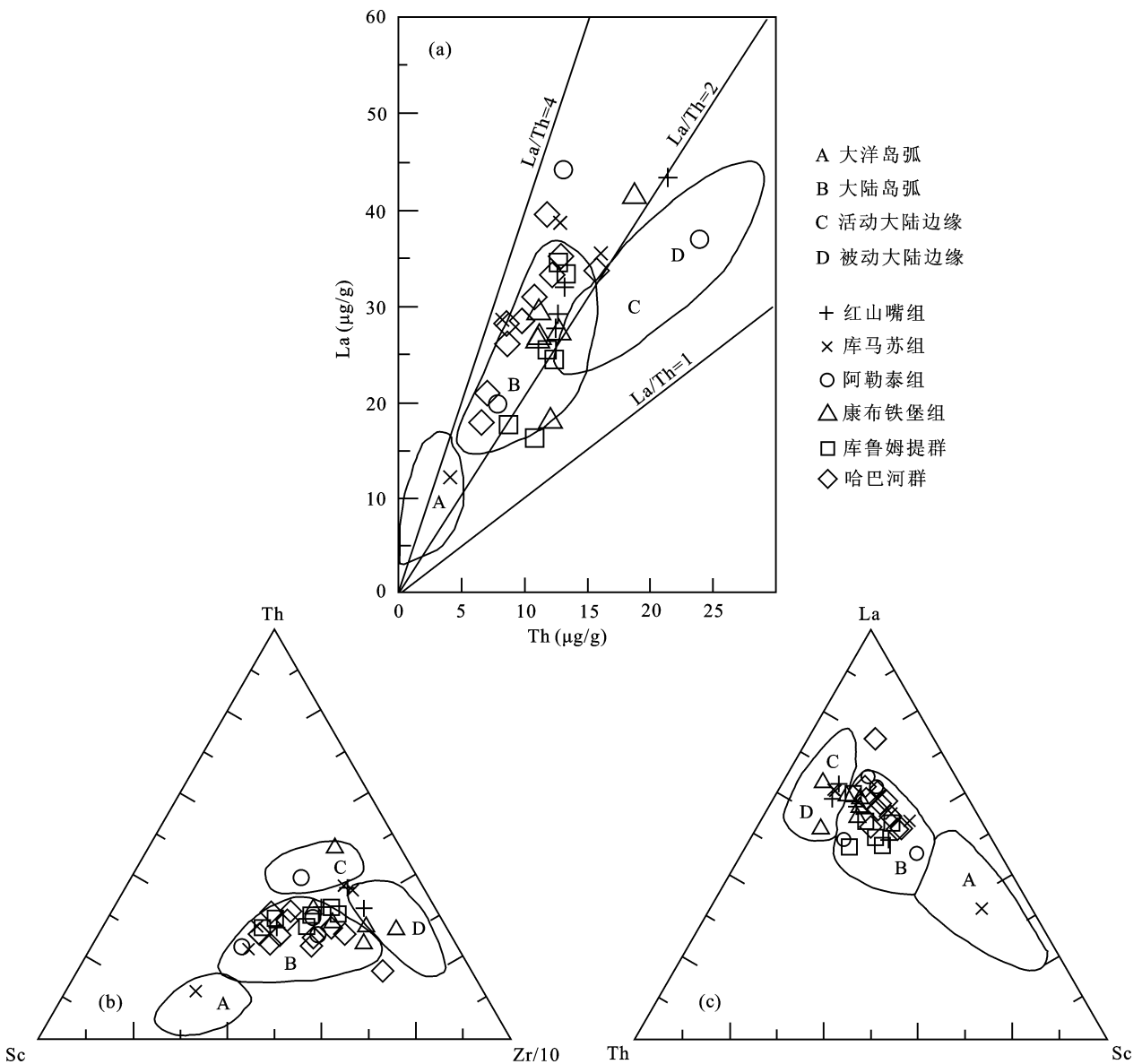


图 7 阿尔泰造山带古生代地层构造判别图解(据文献[55])

Fig.7 Discriminate diagrams of tectonic setting for the Paleozoic formation from the Altay orogen (after Reference [55])

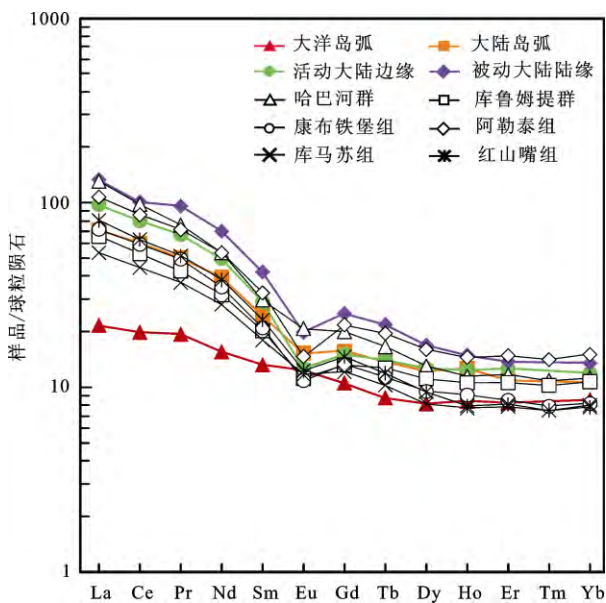


图 8 阿尔泰造山带古生代地层与不同构造背景下砂岩的球粒陨石标准化 REE 分布模式比较

Fig.8 Comparison of the chondrite-normalized REE patterns of the Paleozoic formation from the Altai orogen to those of the sandstone formed in various tectonic setting

(球粒陨石标准化数据引自文献[68]; 不同构造环境形成的砂岩 REE 数据引文献[55])

Chondrite data after Reference [68]; REE contents of the sandstone in various tectonic setting after Reference [55])

(2) CIA 分布特征表明, 形成奥陶纪哈巴河群 (CIA=50~70)、志留纪库鲁姆提群 (CIA=57~68)、泥盆纪康布铁堡组 (CIA=50~67) 和阿勒泰组 (CIA=52~60)、石炭纪红山嘴组 (CIA=66~68) 源区物质经历了相对寒冷、干燥条件下弱的化学风化作用, 而形成石炭纪的库马苏组 (CIA=71~79) 的源区物质可能经历了温暖-炎热、湿润-潮湿条件下的中等-强烈化学风化作用。

(3) 哈巴河群、库鲁姆提群、康布铁堡组、阿勒泰组、库马苏组和红山嘴组, 总体显示 $ICV > 1.0$ (主要分布于 1.04~1.61), 指示碎屑岩的成熟度较差, 代表首次直接沉积的产物; 少数样品显示 $ICV < 1.0$, 指示碎屑岩的成熟度较高, 代表经历了多次循环的再沉积或温暖-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) 主要化学组成及微量元素组成显示, 哈巴河群、库鲁姆提群、康布铁堡组、阿勒泰组碎屑沉积岩主体形成于大陆岛弧背景, 而库马苏组、红山嘴组与大陆岛弧-活动大陆边缘背景具有成因联系。

野外工作得到了新疆有色集团 701 和 706 地质

队的热情帮助; 在分析测试过程中, 感谢师兄弟给予的大力帮助; 在文章修改过程中, 两位审稿人提出了诸多宝贵的意见, 在此一并表示衷心的感谢。

参考文献(References):

- [1] Jahn Bor-ming, Wu Fuyuan, Chen Bin. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic[J]. Geological Society of America Special Papers, 2000, 350: 181-193.
- [2] Windley B F, Kröner A, Guo J H, Qu G S, Li Y Y, Zhang C. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution[J]. J Geol, 2002, 110(6): 719-737.
- [3] Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, Kröner A, Badarch G. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. J Geol Soc, 2007, 164(1): 31-47.
- [4] Coleman R G. Continental growth of northwest China[J]. Tectonics, 1989, 8(3): 621-635.
- [5] 曲国胜, 崇美英. 阿尔泰造山带的铅同位素地质及其构造意义[J]. 现代地质, 1991, 5(1): 100-110.
Qu Guo-sheng, Chong Mei-ying. Lead isotope geology and its tectonic implications in Altaids, China[J]. Geoscience, 1991, 5(1): 100-110 (in Chinese with English abstract).
- [6] Şengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. Nature, 1993, 364(6435): 299-307.
- [7] Hu A Q, Jahn B M, Zhang G X, Chen Y B, Zhang Q F. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence. Part I. Isotopic characterization of basement rocks[J]. Tectonophysics, 2000, 328(1): 15-51.
- [8] Chen B, Jahn B M. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of northwest China and their tectonic implications[J]. Geol Mag, 2002, 139(1): 1-13.
- [9] Xiao W J, Windley B F, Badarch G, Sun S, Li J, Qin K, Wang Z. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: Implications for the growth of Central Asia[J]. J Geol Soc, 2004, 161(3): 339-342.
- [10] Wang T, Hong D W, Jahn B M, Tong Y, Wang Y B, Han B F, Wang X X. Timing, petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen[J]. J Geol, 2006, 114(6): 735-751.
- [11] Wang T, Tong Y, Jahn B M, Zou T R, Wang Y B, Hong D W, Han B F. SHRIMP U-Pb Zircon geochronology of the Altai No.3 Pegmatite, NW China, and its implications for the origin and tectonic setting of the pegmatite[J]. Ore Geol Rev, 2007, 32(1): 325-336.
- [12] Sun M, Long X P, Cai K D, Jiang Y D, Wang B Y, Yuan C, Zhao G C, Xiao W J, Wu F Y. Early Paleozoic ridge subduction in the Chinese Altai: Insight from the abrupt change in zircon Hf isotopic compositions[J]. Sci China (D),

- 2009, 52(9): 1345–1358.
- [13] Cai K D, Sun M, Yuan C, Xiao W J, Zhao G C, Long X P, Wu F Y. Carboniferous mantle-derived felsic intrusion in the Chinese Altai, NW China: Implications for geodynamic change of the accretionary orogenic belt[J]. *Gondwana Research*, 2012, 22(2): 681–698.
- [14] Long X P, Yuan C, Sun M, Xiao W J, Wang Y C, Cai K D, Jiang Y D. Geochemistry and Nd isotopic composition of the Early Paleozoic flysch sequence in the Chinese Altai, Central Asia: Evidence for a northward-derived mafic source and insight into Nd model ages in accretionary orogen[J]. *Gondwana Research*, 2012, 22(2): 554–566.
- [15] 何国琦, 韩宝福, 岳永君, 王嘉桁. 中国阿尔泰山带的构造分区和地壳演化[J]. *新疆地质科学*, 1990, 2(9): 9–20.
He Guo-qi, Han Bao-fu, Yue Yong-jun, Wang Jia-heng. Tectonic division and crustal evolution of the Altai Orogenic Belt in China[J]. *Xinjiang Geol*, 1990, 2(9): 9–20 (in Chinese with English abstract).
- [16] 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 朱宝清, 李锦轶, 赵民. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 1-162.
Xiao Xu-chang, Tang Yao-qing, Feng Yi-min, Zhu Bao-qing, Li Jin-yi, Zhao Min. Tectonic Evolution of Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1–162 (in Chinese).
- [17] 何国琦, 刘德权, 李茂松, 唐延龄, 周汝洪. 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*, 1995, 13(2): 99–194.
He Guo-qi, Liu De-quan, Li Mao-song, Tang Yan-ling, Zhou Ru-hong. The five stages mode of crust development and metallogenic series of main orogenic belt in Xinjiang[J]. *Xinjiang Geol*, 1995, 13(2): 99–194 (in Chinese with English abstract).
- [18] 李天德, 波里扬斯基 B H. 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*, 2001, 19(1): 27–32.
Li Tian-de, Poliyangsi B H. Tectonics and crustal evolution of Altai in China and Kazakhstan[J]. *Xinjiang Geol*, 2001, 19(1): 27–32 (in Chinese with English abstract).
- [19] Şengör A M, Natal'in B A. Paleotectonics of Asia: Fragments of a synthesis [M]//Yin A, Harrison M. *The Tectonic Evolution of Asia*. London: Cambridge University Press, 1996: 486–640.
- [20] Buchan C, Cunningham D W, Windley B F, Tomurhuu D. Structural and lithological characteristics of the Bayankhongor ophiolite zone, central Mongolia[J]. *J Geol Soc*, 2001, 158(3): 445–460.
- [21] Badarch G, Cunningham D W, Windley B F. A new terrane subdivision for Mongolia: Implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia[J]. *J Asian Earth Sci*, 2002, 21(1): 87–110.
- [22] Buchan C, Pfänder J, Kröner A, Brewer T S, Tomurtoogoo O, Tomurhuu D, Cunningham D, Windley B F. Timing of accretion and collisional deformation in the Central Asian Orogenic Belt: Implications of granite geochronology in the Bayankhongor Ophiolite Zone[J]. *Chem Geol*, 2002, 192(1): 23–45.
- [23] Buslov M, Fujiwara Y, Iwata K, Semakov N N. Late paleozoic-early Mesozoic geodynamics of Central Asia[J]. *Gondwana Research*, 2004, 7(3): 791–808.
- [24] Xiao W J, Windley B F, Yuan C, Sun M, Han C M, Lin S F, Chen H L, Yan Q R, Liu D Y, Qin K Z, Li J L, Sun S. Paleozoic multiple subduction-accretion processes of the southern Altaids[J]. *Am J Sci*, 2009, 309(3): 221–270.
- [25] Cai K D, Sun M, Yuan C, Zhao G C, Xiao W J, Long X P, Wu F Y. Geochronological and geochemical study of mafic dykes from the northwest Chinese Altai: Implications for petrogenesis and tectonic evolution[J]. *Gondwana Research*, 2010, 18(4): 638–652.
- [26] Long X P, Yuan C, Sun M, Xiao W J, Zhao G C, Wang Y J, Cai K D, Xia X P, Xie L W. Detrital zircon ages and Hf isotopes of the early Paleozoic flysch sequence in the Chinese Altai, NW China: New constrains on depositional age, provenance and tectonic evolution[J]. *Tectonophysics*, 2010, 480(1): 213–231.
- [27] Cai K D, Sun M, Yuan C, Long X P, Xiao W J. Geological framework and Paleozoic tectonic history of the Chinese Altai, NW China: A review[J]. *Russ Geol Geophys*, 2011, 52(12): 1619–1633.
- [28] Cai K D, Sun M, Yuan C, Zhao G C, Xiao W J, Long X P, Wu F Y. Prolonged magmatism, juvenile nature and tectonic evolution of the Chinese Altai, NW China: Evidence from zircon U-Pb and Hf isotopic study of Paleozoic granitoids[J]. *J Asian Earth Sci*, 2011, 42(5): 949–968.
- [29] 袁超, 孙敏, 龙晓平, 夏小平, 肖文交, 李献华, 林寿发, 蔡克大. 阿尔泰山哈巴河群的沉积时代及其构造背景[J]. *岩石学报*, 2007, 23(7): 1635–1644.
Yuan Chao, Sun Min, Long Xiao-ping, Xia Xiao-ping, Xiao Wen-jiao, Li Xian-hua, Lin Shou-fa, Cai Ke-da. Constraining the deposition time and tectonic background of the Hahahe Group of the Altai[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2007, 23(7): 1635–1644 (in Chinese with English abstract).
- [30] 柴凤梅, 毛景文, 董连慧, 杨富全, 刘锋, 耿新霞, 杨宗喜, 黄承科. 新疆阿尔泰山南缘阿巴宫铁矿矿区康布铁堡组变质火山岩年龄及地质意义[J]. *地质学报*, 2009, 82(11): 1592–1601.
Chai Feng-mei, Mao Jing-wen, Dong Lian-hui, Yang Fu-quan, Liu Feng, Geng Xin-xia, Yang Zong-xi, Huang Cheng-ke. SHRIMP Zircon U-Pb dating for metarhuolites of the Kangbutiebao formation at the Abagong iron deposit in the southern margin of the Altai, Xinjiang and its geological significance[J]. *Acta Geol Sinica*, 2009, 82(11): 1592–1601 (in Chinese with English abstract).
- [31] Jiang Y D, Sun M, Zhao G C, Yuan C, Xiao W J, Xia X P, Long X P, Wu F Y. The –390 Ma high-T metamorphic event in the Chinese Altai: A consequence of ridge-subduction?[J]. *Am J Sci*, 2010, 310(10): 1421–1452.
- [32] 柴凤梅, 杨富全, 刘锋, 耿新霞, 姜丽萍, 吕书君, 郭旭吉, 陈斌. 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*, 2012, 58(6): 1023–1037.
Chai Feng-mei, Yang Fu-quan, Liu Feng, Geng Xin-xia, Jiang

- Li-ping, Lü Shu-jun, Guo Xu-ji, Chen Bin. Geochronology and genesis of meta-felsic volcanic rocks from the Kangbutiebao formation in Chonghuier basin on southern margin of Altay, Xinjiang[J]. *Geol Rev*, 2012, 58(6): 1023–1037 (in Chinese with English abstract).
- [33] 刘源, 杨家喜, 胡健民, 王雁飞, 王媛. 阿尔泰构造带喀纳斯群时代的厘定及其意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(3): 887–898.
- Liu yuan, Yang Jia-xi, Hu Jian-min, Wang Yan-fei, Wang Yuan. Restricting the deposition age of the Kanas Group of Altai tectonic belt and its implications[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2013, 29(3): 887–898 (in Chinese with English abstract).
- [34] 庄育勋. 阿尔泰变质带变质作用温压条件的时空变化及其大地构造意义[J]. *矿物岩石地球化学通讯*, 1989, 2(2): 98–100.
- Zhuang Yu-xun. The change in time and space of metamorphism temperature and pressure condition of metamorphic zone from Altai, Xinjiang, and its tectonic significance[J]. *Bull Mineral Petrol Geochem*, 1989, 2(2): 98–100 (in Chinese with English abstract).
- [35] 庄育勋. 中国阿尔泰造山带变质作用 PTst 演化和热-构造-片麻岩穹窿形成机制[J]. *地质学报*, 1994, 67(1): 35–47.
- Zhuang Yu-xun. Evolution of metamorphism PTst and the mechanism of the Hot-Structure-Gneiss dome formation in Altai orogen, China[J]. *Acta Geol Sinica*, 1994, 67(1): 35–47 (in Chinese with English abstract).
- [36] 张翠光, 魏春景, 邱林. 新疆阿尔泰造山带变质作用演化及其地质意义[J]. *新疆地质*, 2004, 22(1): 16–23.
- Zhang Cui-guang, Wei Chun-jing, Qiu Lin. Evolution of metamorphism and its geologic significance in Altaidse Xinjiang [J]. *Xinjiang Geol*, 2004, 22(1): 16–23 (in Chinese with English abstract).
- [37] 张翠光, 魏春景, 侯荣玖, 后立胜, 卜小平. 新疆阿尔泰造山带低压变质作用相平衡研究[J]. *中国地质*, 2007, 34(1): 34–41.
- Zhang Cui-guang, Wei Chun-jing, Hou Rong-jiu, Hou Li-sheng, Bu Xiao-ping. Phase equilibrium of low-pressure metamorphism in the Altaides, Xinjiang[J]. *Geol China*, 2007, 34(1): 34–41 (in Chinese with English abstract).
- [38] 陈汉林, 杨树锋, 厉子龙, 余星, 肖文交, 袁超, 林秀斌, 李继亮. 阿尔泰造山带富碱基性麻粒岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1351–1358.
- Chen Han-lin, Yang Shu-feng, Li Zi-long, Yu Xing, Xiao Wen-jiao, Yuan Chao, Lin Xiu-bin, Li Ji-liang. Zircon SHRIMP U-Pb chronology of Fuyun basic granulite and its tectonic significance in Altaid orogenic belt[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2006, 22(5): 1351–1358 (in Chinese with English abstract).
- [39] 陈汉林, 杨树锋, 厉子龙, 袁超, 肖文交, 李继亮, 余星, 林秀斌. 阿尔泰造山带南缘基性杂岩的形成背景及其动力学含义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(1): 127–134.
- Chen Han-lin, Yang Shu-feng, Li Zi-long, Yuan Chao, Xiao Wen-jiao, Li Ji-liang, Yu Xing, Lin Xiu-bin. Tectonic setting of mafic rocks in southern Altai orogenic belt and its geodynamic implication[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2006, 22(1): 127–134 (in Chinese with English abstract).
- [40] 林秀斌, 陈汉林, 杨树锋, 厉子龙, 余星, 程晓敏. 阿尔泰造山带富碱基性麻粒岩折返过程: 来自裂变迹热年代学的限定[J]. *岩石学报*, 2010, 26(2): 413–420.
- Lin Xiu-bin, Chen Han-lin, Yang Shu-feng, Li Zi-long, Yu Xing, Cheng Xiao-gan. Exhumation of the Fuyun basic granulite in Altaid Orogenic Belt: Constraints from fission-track thermochronology[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2010, 26(2): 413–420 (in Chinese with English abstract).
- [41] 陈斌, Jahn B M, 王式浣. 新疆阿尔泰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)*, 2001, 31(3): 226–232.
- Chen Bin, Jahn B M, Wang Shi-guang. Nd isotopic characteristics of Palaeozoic metamorphosed sedimentary rocks in Altai, Xinjiang, and its restriction on crustal evolution[J]. *Sci China (D)*, 2001, 31(3): 226–232 (in Chinese).
- [42] Long X P, Sun M, Yuan C, Xiao W J, Lin S F, Wu F Y, Xia X P, Cai K D. U-Pb and Hf isotopic study of zircons from metasedimentary rocks in the Chinese Altai: Implications for Early Paleozoic tectonic evolution[J]. *Tectonics*, 2007, 26(5): TC5015, doi: 10.1029/2007TC002128
- [43] Long X P, Sun M, Yuan C, Xiao W J, Cai K D. Early Paleozoic sedimentary record of the Chinese Altai: Implications for its tectonic evolution[J]. *Sediment Geol*, 2008, 208(3): 88–100.
- [44] 龙晓平, 袁超, 孙敏, 肖文交, 林寿发, 王毓婧, 蔡克大. 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*, 2008, 24(4): 718–732.
- Long Xiao-ping, Yuan Chao, Sun Min, Xiao Wen-jiao, Lin Shou-fa, Wang Yu-jing, Cai Ke-da. Geochemical characteristics and sedimentary environments of Devonian low metamorphic clastic sedimentary rocks in the southern margin of the Chinese Altai, North Xinjiang[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2008, 24(4): 718–732 (in Chinese with English abstract).
- [45] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715–717.
- [46] Nesbitt H W, Young G M. Formation and diagenesis of weathering profiles[J]. *J Geol*, 1989, 97(2): 129–147.
- [47] Cox R, Lowe D R, Cullers R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59(14): 2919–2940.
- [48] Nance W B, Taylor S R. Rare earth element patterns and crustal evolution-I. Australian post-Archean sedimentary rocks[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1976, 40(12): 1539–1551.
- [49] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Oxford: Blackwell, 1985: 1–205.
- [50] Floyd P A, Leveridge B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones[J]. *J Geol Soc*, 1987, 144(4): 531–542.
- [51] Creaser R A, Erdmegg P. Tectonic affinity of Nisuthn and Anvil assemblage strata from the Teshn tectonic zone, northern

- Canadian cordillera: Constraints from neodymium isotope and geochemical evidence[J]. *Tectonics*, 1997, 16(1): 107–121.
- [52] Bhatia M R, Taylor S R. Trace-element geochemistry and sedimentary provinces: A study from the Tasman Geosyncline, Australia[J]. *Chem Geol*, 1981, 33(1): 115–125.
- [53] Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. *J Geol*, 1983, 91(6): 611–627.
- [54] Bhatia M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control[J]. *Sediment Geol*, 1985, 45(1): 97–113.
- [55] Bhatia M R, Crook K A. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1986, 92(2): 181–193.
- [56] Cullers R L. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA[J]. *Chem Geol*, 2002, 191(4): 305–327.
- [57] McLennan S M, Hemming S R, Taylor S R, Eriksson K. Early Proterozoic crustal evolution: Geochemical and Nd-Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North America[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59(6): 1153–1177.
- [58] Gao S, Ling W, Qiu Y, Lian Z, Hartmann G, Simon K. 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[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63(13): 2071–2088.
- [59] Bolhar R, Kamber B S, Moorbath S, Whitehouse M J, Collerson K D. Chemical characterization of earth's most ancient clastic metasediments from the Isua Greenstone Belt, southern West Greenland[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2005, 69(6): 1555–1573.
- [60] 袁峰. 新疆阿尔泰诺尔特地区花岗岩形成的构造环境[J]. *火山地质与矿产*, 1997, 18(3): 203–210.
Yuan Feng. Tectonic environment for formation of granites in Nurt area of Altay, Xinjiang, China[J]. *Volcanol Mineral Resour*, 1997, 18(3): 203–210 (in Chinese with English abstract).
- [61] 袁峰, 周涛发, 岳书仓. 阿尔泰诺尔特地区火山岩岩石地球化学特征及构造背景[J]. *地质地球化学*, 2001, 29(2): 31–35.
Yuan Feng, Zhou Tao-fa, Yue Shu-cang. Geochemical characteristics and tectonic setting of the volcanic rocks in the Nurt area of Altay[J]. *Geol Geochem*, 2001, 29(2): 31–35 (in Chinese with English abstract).
- [62] 李天德, 祁志明, 吴柏青, 肖世禄, 赵昌龙. 中国和哈萨克斯坦阿尔泰地质及成矿研究的新进展[C]//中国地质学会. 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选集. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 256–259.
Li Tian-de, Qi Zhi-ming, Wu Bo-qing, Xiao Shi-lu, Zhao Chang-long. The new progress of geology and ore-forming of the Altai in China and Kazakhstan[C]//Geological Society of China. Thesis Volume of the Symposium of the 8th Five-Year Plan of Geoscience for Contributions to 30th IGC. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996: 256–259 (in Chinese with English abstract).
- [63] 胡霏琴, 张国新, 张前锋, 李天德, 张积斌. 阿尔泰造山带变质岩系时代问题的讨论[J]. *地质科学*, 2002, 37(2): 129–142.
Hu Ai-qin, Zhang Guo-xin, Zhang Qian-feng, Li Tian-de, Zhang Ji-bin. A review on ages of Precambrian metamorphic rocks from Altai orogen in Xinjiang, NW China[J]. *Chinese J Geol*, 2002, 37(2): 129–142 (in Chinese with English abstract).
- [64] 胡霏琴, 韦刚健, 邓文峰, 陈林丽. 阿尔泰地区青河县西南片麻岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(1): 1–10.
Hu Ai-qing, Wei Gang-jiang, Deng Wen-feng, Chen Lin-li. SHRIMP zircon U-Pb dating and its significance for gneisses from the southwest area to Qinghe County in the Altai, China[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2006, 22(1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- [65] Cai K D, Sun M, Yuan C, Zhao G C, Xiao W J, Long X P, Wu F Y. Geochronology, petrogenesis and tectonic significance of peraluminous granites from the Chinese Altai, NW China [J]. *Lithos*, 2011, 127(1): 261–281.
- [66] Qi L, Grégoire D C. Determination of trace elements in twenty six Chinese geochemistry reference materials by inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Geostandard Newslett*, 2000, 24(1): 51–63.
- [67] 李永. 新疆阿尔泰造山带康布铁堡组地层特征研究[D]. 新疆: 新疆大学, 2012: 73p.
Li Yong. The study of the strata characteristics of Kangbutiebao group in Altai Mountains of Xinjiang[D]. Xinjiang: Xinjiang University, 2012: 73p (in Chinese with English abstract).
- [68] Masuda A, Nakamura N, Tanaka T. Fine structures of mutually normalized rare-earth patterns of chondrites[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1973, 37(2): 239–248.
- [69] McLennan S M. Weathering and global denudation[J]. *J Geol*, 1993, 101(2): 295–303.
- [70] 王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 郑松彦, 耿元生. 变质岩原岩图解判别法[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 1–199.
Wang Ren-min, He Gao-pin, Chen Zhen-zhen, Zheng Song-yan, Geng Yuan-sheng. The Plot for Recovering Protoliths of Metamorphic Rocks[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 1–199 (in Chinese with English abstract).
- [71] van de Kamp P C, Leake B E. Petrography and geochemistry of feldspathic and mafic sediments of the northeastern Pacific margin[J]. *Trans R Soc Edinb Earth Sci*, 1985, 76(4): 411–449.
- [72] Weaver C. Clays, Muds, and Shales: Development in Sedimentology[M]. Amsterdam: Elsevier, 1989: 1–210.
- [73] Creaser R A, Erdmer P, Stevens R A, Grant S L. Tectonic affinity of Nisutlin and Anvil assemblage strata from the Teslin tectonic zone, northern Canadian Cordillera: Constraints from neodymium isotope and geochemical evidence[J]. *Tectonics*, 1997, 16(1): 107–121.
- [74] McLennan S, Taylor S. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends[J]. *J Geol*, 1991, 99(1): 1–21.
- [75] Roser B P, Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using content and ratio[J]. *J Geol*, 1986, 94(5): 635–650.