王星, 蔺新望, 张亚峰, 等. 阿尔泰诺尔特地区泥盆纪正格河火山岩的厘定及其地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 180−191.
Wang Xing, Lin Xinwang, Zhang Yafeng, et al. The determination of Zhenggehe Devonian volcanic rocks in Nurt area, southern Altay[J]. Geology in China, 2015, 42(1): 180−191(in Chinese with English abstract).

阿尔泰诺尔特地区泥盆纪正格河火山岩的厘定及其地质意义

王 星 蔺新望 张亚峰 郭岐明 赵端昌

（陕西省地质调查中心，陕西 西安 710068）

提要：阿勒泰南缘诺尔特地区晚古生代火山岩十分发育，其中正格河一带出露一套片理化蚀变流纹岩与含凝灰质英安流纹岩的岩石组合，呈北西–南东向带状展布，前人将其划为石炭纪红山嘴组a段。本次工作对其进行的LA–ICPMS锆石U–Pb测年结果显示为早泥盆世（$^{206}Pb/^{238}U$加权平均年龄值为(400.4±3.6) Ma），时代不同于红山嘴组所属的石炭纪。其岩性明显区别于红山嘴组b、c段地层，且稳定成规模出露，故对此套流纹岩组合进行了重新厘定，暂命名为正格河火山岩。岩石SiO_2含量在69.77%~75.16%，里特曼指数为1.26~1.70，(Na_2O+K_2O)介于5.90%~7.28%，A/CNK值介于0.88~1.16，显示钙碱性、偏铝质岩石特征。微量元素富集Rb、Th等大离子亲石元素，亏损Nb、Ta、Hf等高场强元素，稀土元素总量变化较大，∑REE介于189.20×10^{-6}~308.47×10^{-6}，轻、重稀土元素分馏较强（$(La/Yb)_N$=5.82~7.86），铕负异常（δEu=0.45~0.75），具有与俯冲作用有关的岩浆作用特征。结合区域地质资料，表明正格河火山岩形成于活动大陆边缘构造环境。

关 键 词：正格河火山岩；LA–ICP–MS锆石U–Pb年龄；活动大陆边缘；诺尔特地区; 阿尔泰南缘

中图分类号：P534.44 **文献标志码**：A **文章编号**：1000–3657(2015)01– 0180–12

The determination of Zhenggehe Devonian volcanic rocks in Nurt area, southern Altay

WANG Xing, LIN Xin−wang, ZHANG Ya−feng, GUO Qi−ming, ZHAO Duan−chang

(*Shaanxi Center of Geological Survey, Xi'an* 710068*, Shaanxi, China*)

Abstract: The Nurt area is located in the southern part of Altay, where Late Paleozoic volcanic rocks are well developed. There exists a set of rock assemblages of altered rhyolite and tuff dacite rhyolite in Zhenggehe area, which are in zoned distribution from northwest to southeast and were originally assigned to member a of Hongshanzui Formation. The LA−ICPMS zircon U−Pb dating has revealed that the volcanic rocks formed in the Early Devonian (the zircon $^{206}Pb/^{238}U$ weighted average age is (400.4±3.6) Ma), unlike Hongshanzui, whose age is of Carboniferous. The lithologic characteristics are obviously different from members b, c of Hongshanzui Formation, and are extensively stably distributed, so this set of rhyolites was re−determined, and tentatively assigned

收稿日期：2014–03–23；**改回日期**：2014–06–17

基金项目：中国地质调查局项目（1212011120503、1212011120509）资助。

作者简介：王星，男，1988年生，主要从事区域地质调查工作；E–mail：star_cug@126.com。

to Zhenggehe volcanic rocks. The SiO_2 values range from 69.77% to 75.16%, and σ from 1.26 to 1.70, Na_2O+K_2O values range between 5.90% and 7.28%, A/CNK ratios range between 0.88 and 1.16, with sub−alkaline, calc−alkaline and meta−aluminum characteristics. The pluton is characterized by enrichment of trace elements Rb, Th and other large LILE, loss of high field strength elements Nb, Ta, Sr, Hf. The content of REE changes considerably, ΣREE range between 189.20×10^{-6} and 308.47×10^{-6}, light and heavy REE show strong fractionation ($(La/Yb)_N$ being 5.82−7.86), Eu exhibits negative anomalies (δEu = 0.45−0.75), and the REE characteristics are similar to features of island−arc volcanic rocks. Combined with the data of southerner margin of Altay, the authors hold that the Zhenggehe volcanic rocks were formed in an active continental margin tectonic environment.

Key words: Zhenggehe volcanic rocks; U−Pb isotope age; geological significance; Nurt area; southern Altay

About the first author: WANG Xing, male, born in 1988, bachelor, engages in regional geological survey; E−mail: star_cug@126.com.

诺尔特地区位于新疆阿尔泰山北部，地处西伯利亚板块西南缘，大地构造分区属天山—兴蒙造山系阿尔泰弧盆系[1]。阿尔泰地区属于中亚造山带的一个重要组成部分，自前寒武纪以来发生了多次的构造−岩浆事件，形成了大面积的岩浆岩。阿尔泰造山带的构造演化极为复杂，前人对此有不同认识：李志纯等认为阿尔泰造山带经历了造山启动期、造山暂歇拉张期、主造山期和造山后期等4个发展阶段[2]，王涛等的古陆缘构造演化史为奥陶纪—志留纪陆缘俯冲、泥盆纪陆缘弧及陆缘边缘裂解，弧后盆地形成、晚泥盆世最终洋盆闭合及早石炭世各地块拼合[3]；袁旭音还有从早古生代开始抬升成陆，寒武纪至志留纪一直处于剥蚀状态，泥盆纪开始由于地壳拉张而形成坳陷的观点[4]。其特点是发育有大量的加里东晚期花岗岩，同时，伴随岩浆作用的增强，在阿尔泰地区形成了大量的泥盆纪火山岩。以往在诺尔特地区发现的大量晚古生代火山岩，被认为是在造山间歇期形成的上叠断陷盆地的产物[5−8]。笔者在最近开展的新疆1∶25万可可托海幅、江德勒克幅区调修测及青河县1∶5万阿尔沙特等四幅区调工作过程中，发现正格河一带出露的红山嘴组a段流纹岩，较红山嘴组b、c段变形强烈，具明显蚀变。这套片理化蚀变流纹岩与含凝灰质英安流纹岩的岩石组合具有火山岩特征，明显不同于红山嘴组b、c段类复理石的碎屑岩建造组合，在区域上沿走向稳定出露，且具有一定规模，通过锆石U−Pb年龄测定，其同位素年龄结果显示为早泥盆世，不同于红山嘴组中古生物化石所指示的晚石炭世，故对其进行了重新厘定，暂命名为正格河火山岩。本文通过对该火山岩地质及岩相学特征、锆石U−Pb年龄、岩石地球化学特征等的研究，探讨其岩石成因、构造环境及地质意义等问题，从而为阿尔泰造山带构造演化发展提供新信息。

1　地质概况

阿尔泰造山带以红山嘴—诺尔特断裂和阿巴宫—库尔提断裂为界，由北向南可划分为北阿尔泰、中阿尔泰和南阿尔泰3个块体。研究区横跨红山嘴断裂，主要出露中元古代—寒武纪、志留纪—石炭纪地质体（图1）。断裂两侧地质差异明显，南侧以中元古代苏普特岩群为主，发育泥盆纪闪长岩和石炭纪花岗岩，北侧除正格河火山岩外，还出露有震旦—寒武系喀纳斯群、下泥盆统—上石炭统库马苏组、石炭系红山嘴组，并发育有志留纪花岗岩和石炭纪花岗岩。

正格河火山岩集中分布于诺尔特—托格尔托别—正格河一带，其中诺尔特—托格尔托别一带呈北北西向展布，托格尔托别—正格河一带则转为近东西向展布。地层展布较为稳定，受区域应力作用的影响，整体呈条带状展布，长约60 km，宽0.7~1.6 km，最东段出露最宽，可达5 km左右。火山岩多与红山嘴组及库马苏组呈断层接触，局部被华力西中期岩浆岩侵入，侵入界线较清楚。火山岩片理化较强，可能是受后期挤压应力所致。

2　岩相学特征

正格河火山岩以浅灰色酸性火山岩为主，普遍含石英、长石斑晶，横向上岩性变化较大，正格河一带由北往南，北侧以火山岩为主极少见碎屑岩，南侧为正常沉积碎屑岩，主要为绢云母千枚岩、绢云绿泥千枚岩、绢云石英千枚岩；喀依尔提河一带以火山岩为主，中夹薄层浅变质碎屑岩；库尔木图河

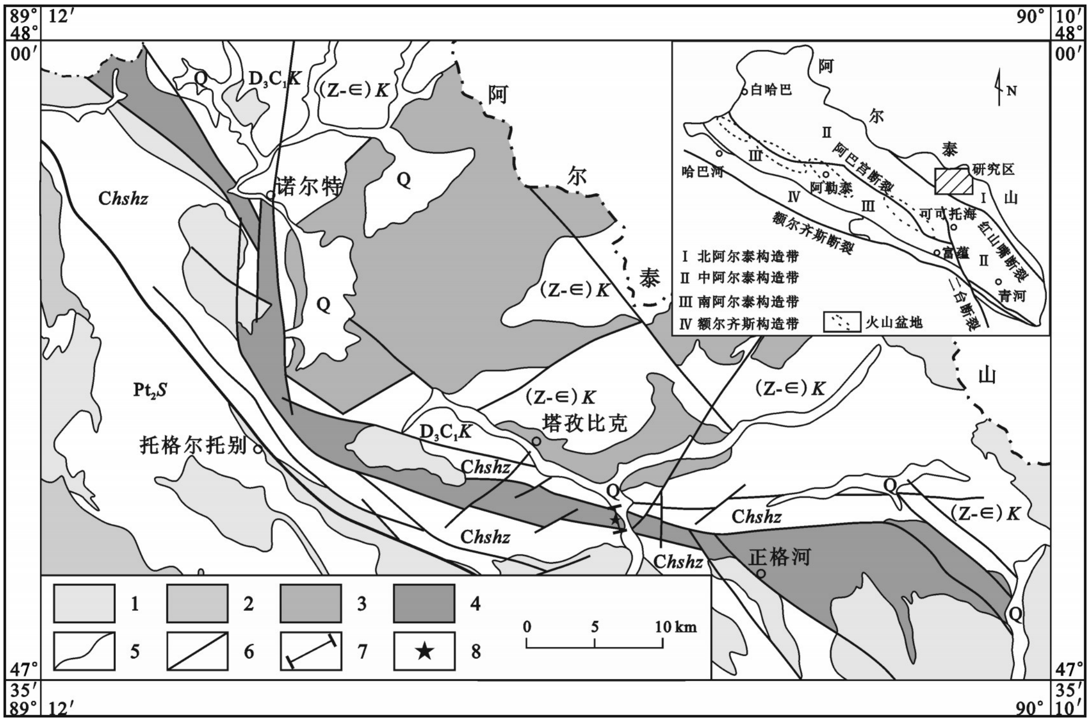

图1 正格河火山岩分布图

1—石炭纪花岗岩;2—泥盆纪闪长岩;3—志留纪花岗岩;4—正格河火山岩;5—地质界线;6—断层界线;7—剖面位置;8—采样位置;Q—第四系;Chshz—红山嘴组;D_3C_1K—库马苏组;(Z−∈)K—喀拉斯群;Pt_2S—苏普特岩群

Fig.1 Geological sketch map of Zhenggehe volcanic rocks

1−Carboniferous Granite;2−Devonian Diorite;3−Silurian Granite;4−Zhenggehe volcanic rocks;5−Boundary;6−Fault;7−Position of geological section;8−Sampling site;Q−Quaternary;Chshz−Hongshanzui Formation;D_3C_1K−Kumasu Formation;(Z−∈)K—Kanasi Group;Pt_2S−Supute rock group

一带北东侧以碎屑岩为主,夹火山岩,南西侧以火山岩为主,夹碎屑岩。本文选择了一条代表性剖面(图2),对其进行了重点的研究,主要岩性包括含凝灰质英安流纹岩和片理化蚀变流纹岩。

含凝灰质英安流纹岩:浅灰色,残余斑状结构、基质具残余显微晶质粒状结构(图3−a),平行构造。岩石主要由斑晶和基质组成,斑晶大小在0.8~1.5 mm,个别达3 mm。成分包括石英(9%~11%),半自形—他形粒状;钾长石(5%~7%),半自形柱状;斜长石(5%~7%),半自形柱状。基质成分以斜长石(约30%)、钾长石(近30%)为主,石英(10%)次之,呈隐晶—显微晶质粒状。岩石含凝灰晶屑成分:斜长石(4%~5%)、钾长石(2%~4%)、石英(1%~2%),粒径大小0.15~0.6 mm,形状呈尖棱角状、不规则状。

片理化蚀变流纹岩:浅灰−灰绿色,残余斑状结构、基质具残余显微晶质粒状结构,平行构造。岩石主要由斑晶和基质组成(图3−b),斑晶大小约1~3 mm,成分为石英(16%~17%),他形粒状,常呈聚斑出现,斑晶具有明显的重结晶现象,发育重结晶的典型结构“三联点”,反映了岩石重结晶较充分;

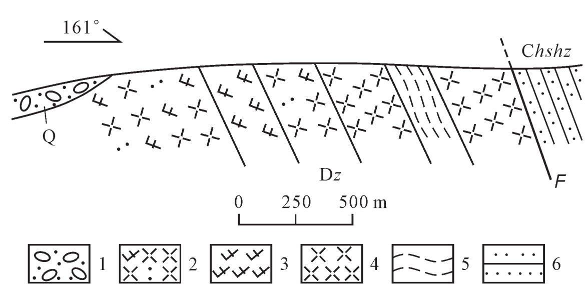

图2 正格河火山岩地层剖面图

1—第四系;2—凝灰质英安流纹岩;3—英安岩;4—流纹岩;5—千枚岩;6—粉砂岩

Fig.2 Stratigraphic section of Zhenggehe volcanic rocks

1−Quaternary;2−Tuff dacite rhyolite;3−Dacite;4−Rhyolite;5−Phyllite;6−Siltstone

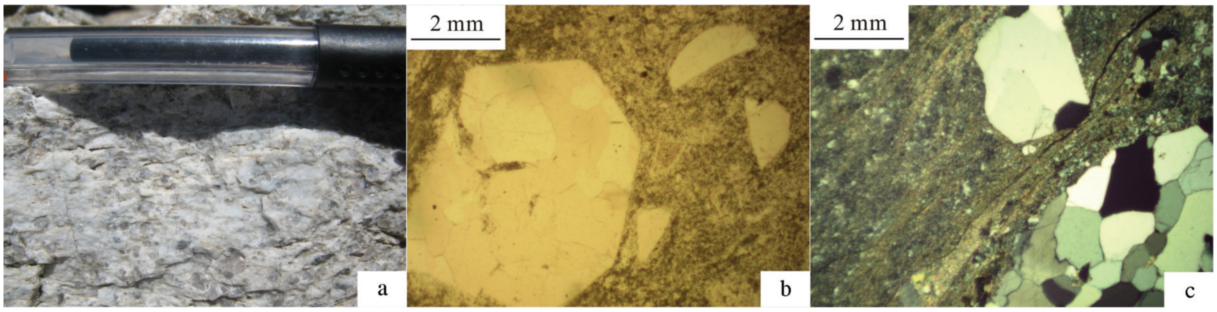

图3 正格河火山岩野外照片(a)和显微岩相照片(b为单偏光, c为正交偏光)
b—斑状结构；c—流纹构造
Fig.3 Field photograph (a) and photomicrography (b, plainlight; c, crossed nicols) of Zhenggehe volcanic rocks
b−Porphyritic texture；c−Rhyolitic structure

钾长石(3%~4%)，半自形柱状，浑浊；斜长石(1%~2%)，板状柱状，浑浊，个别显示钠长石双晶。基质大小0.006~0.01 mm，部分0.02 mm，成分为斜长石(45%~46%)，多绢云母化，晶体浑浊；钾长石(27%~28%)和石英(4%~5%)，均呈显微晶质粒状，具有典型的流纹构造(图3−c)。

3 锆石年龄

3.1 锆石U−Pb同位素分析方法

采集约15 kg岩石样品，按常规方法粉碎，用磁选、电磁选方法分选得到重砂矿物，再淘洗获得锆石精矿，最后在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石晶体作为锆石U−Th−Pb同位素测定对象。首先将锆石颗粒粘在双面胶上，然后用无色透明的环氧树脂固定，待环氧树脂充分固化后，对其表面进行抛光至锆石内部暴露。锆石的阴极发光照相在西北大学大陆动力学国家重点实验室扫描电镜加载阴极发光仪上完成。锆石微区原位U−Th−Pb同位素年龄分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室的LA−ICP−MS仪器上用标准测定程序进行。分析仪器为Agilent7500a型四极杆质谱仪和Geolas200M型激光剥蚀系统，激光器为193 nm ArF准分子激光器。激光剥蚀斑束直径为20 μm，激光剥蚀样品的深度为20~40 μm。锆石年龄计算采用标准锆石91500作为外标，元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃NIST SRM610作为外标，^{29}Si作为内标元素进行校正。详细的实验原理和流程及仪器参见文献[9]。样品的同位素比值和元素含量数据处理采用GLITTER程序，并采用Andersen软件[10]对测试数据进行普通铅校正，年龄计算及谐和图绘制采用ISOPLOT(2.49版)软件[11]完成。

3.2 锆石U−Pb年龄

本次工作在正格河地区采集了一套片理化饰变流纹岩样品(PM64−5)，其地理坐标为北纬47°41′15″、东经89°44′45″。锆石U−Th−Pb同位素测定共分析了25个测点(表1)，其中12、13和25这3个测点明显偏离谐和线，对照锆石阴极发光图像(图4)，其中12和13两个测点无明显生长环带，25号测点位于残留核与震荡环带结合部位，可能因此引起测点数据不谐和，故将其剔除不参与计算。其余22个测点的年龄数据比较谐和，大致可为三组：第一组有3个测点，^{206}Pb/^{238}U年龄介于433~442 Ma；第二组有2个测点^{206}Pb/^{238}U年龄分别为361 Ma和373 Ma；第三组有17个测点，^{206}Pb/^{238}U和^{207}Pb/^{235}U年龄在382~420 Ma，构成非常集中的主锆石群，其谐和年龄为(400.5±4.6) Ma(图5−a)，加权平均年龄为(400.4±3.6) Ma(图5−b)，时代为早泥盆世，代表岩浆结晶年龄。而第一组锆石为明显岩浆生长环带，年龄较老，可能代表早期岩浆活动的年龄。第二组锆石形状残缺，可能受到后期岩浆改造，导致铅的混染，其年龄代表岩浆后期变质事件年龄。值得注意的是10号和11号测点分别位于同一锆石的边部与核部，但其年龄值十分接近，可能代表岩浆房中不断有外来岩浆的混入。

4 岩石地球化学特征

4.1 地球化学分析方法

岩石样品的元素地球化学分析在咸阳核工业二

表1 正格河火山岩(样品PM64-5)中锆石的LA-ICP-MS U-Th-Pb同位素分析结果

Table 1 Isotopic analytical results of LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb ages of Zhenggehe volcanic rocks

点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值								表面年龄/ Ma							
	Pb	Th	U		$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{208}Pb/^{232}Th$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{208}Pb/^{232}Th$	1σ
1	15.45	147.18	172.14	0.86	0.05664	0.00394	0.55419	0.03553	0.0709	0.00165	0.0232	0.00084	477	148	448	23	442	10	464	17
2	17.61	113.2	223.83	0.51	0.06027	0.00246	0.53757	0.01741	0.06464	0.00121	0.0219	0.00048	613	86	437	12	404	7	438	10
3	11.38	54.38	155.94	0.35	0.0556	0.0027	0.49295	0.02038	0.06425	0.00126	0.02007	0.00063	436	104	407	14	401	8	402	13
4	29.54	167	357.04	0.47	0.05559	0.00208	0.53251	0.0149	0.06941	0.00125	0.02108	0.00043	436	81	434	10	433	8	422	8
5	21.95	195.53	257.45	0.76	0.06977	0.00267	0.6272	0.01825	0.06515	0.0012	0.02203	0.00043	922	77	494	11	407	7	440	8
6	19.75	194.92	243.67	0.80	0.05848	0.00262	0.52309	0.01933	0.06482	0.00124	0.0198	0.00043	548	95	427	13	405	8	396	9
7	15.32	126.97	213.44	0.59	0.05281	0.0023	0.44486	0.01582	0.06105	0.00114	0.01674	0.00038	321	96	374	11	382	7	336	8
8	13.28	74.31	160.24	0.46	0.06756	0.00326	0.59798	0.02433	0.06415	0.00128	0.02467	0.00073	855	97	476	15	401	8	493	14
9	31.24	214.39	360.94	0.59	0.06112	0.00219	0.59184	0.01519	0.07018	0.00125	0.01973	0.00037	644	75	472	10	437	8	395	7
10	23.58	181.57	269.94	0.67	0.06296	0.00245	0.57402	0.01704	0.06608	0.0012	0.02278	0.00044	707	81	461	11	413	7	455	9
11	9.74	93.92	112.54	0.83	0.05812	0.00283	0.53131	0.02186	0.06628	0.00129	0.02043	0.00046	534	104	433	15	414	8	409	9
12	10.76	286.97	211.2	1.36	0.07926	0.00384	0.42938	0.01739	0.03927	0.00079	0.00723	0.00018	1179	93	363	12	248	5	146	4
13	12.19	477.83	47.62	10.03	0.11843	0.00575	1.09965	0.04428	0.06732	0.00146	0.01092	0.00026	1933	84	753	21	420	9	220	5
14	23.53	262.57	264.79	0.99	0.05843	0.00235	0.52291	0.01628	0.06489	0.00118	0.01959	0.00036	546	86	427	11	405	7	392	7
15	14.63	125.71	178.2	0.71	0.0539	0.00239	0.48419	0.01752	0.06514	0.00121	0.01941	0.00042	367	97	401	12	407	7	389	8
16	10.57	106.83	125.36	0.85	0.05705	0.00281	0.51527	0.02146	0.06551	0.00127	0.01874	0.00043	493	106	422	14	409	8	375	9
17	145.85	671.49	2293.41	0.29	0.0547	0.00178	0.43446	0.00889	0.05761	0.00098	0.01645	0.00029	400	70	366	6	361	6	330	6
18	8.83	93.73	104.97	0.89	0.06237	0.00333	0.54575	0.02523	0.06347	0.00128	0.01959	0.00047	687	110	442	17	397	8	392	9
19	21.96	155.34	281.12	0.55	0.05559	0.00218	0.49528	0.01468	0.06463	0.00115	0.01791	0.00037	436	85	409	10	404	7	359	7
20	8.67	79.17	110.65	0.72	0.05448	0.00311	0.47762	0.02404	0.0636	0.00129	0.01828	0.00051	391	123	396	17	398	8	366	10
21	9.86	79.75	123.24	0.65	0.05845	0.00273	0.51086	0.01967	0.06342	0.00119	0.01973	0.00046	547	99	419	13	396	7	395	9
22	11.73	111.04	145.99	0.76	0.0608	0.00296	0.52649	0.0215	0.06285	0.00121	0.01858	0.00043	632	102	430	14	393	7	372	9
23	9.83	96.92	129.58	0.75	0.05287	0.00257	0.43438	0.01767	0.05964	0.00112	0.01748	0.00039	323	106	366	13	373	7	350	8
24	12.85	101.92	159.18	0.64	0.06936	0.00297	0.59627	0.02006	0.0624	0.00115	0.01995	0.00044	910	86	475	13	390	7	399	9
25	21.67	146.76	279.54	0.53	0.05911	0.00235	0.5179	0.0155	0.06361	0.00113	0.019	0.00039	571	84	424	10	398	7	380	8

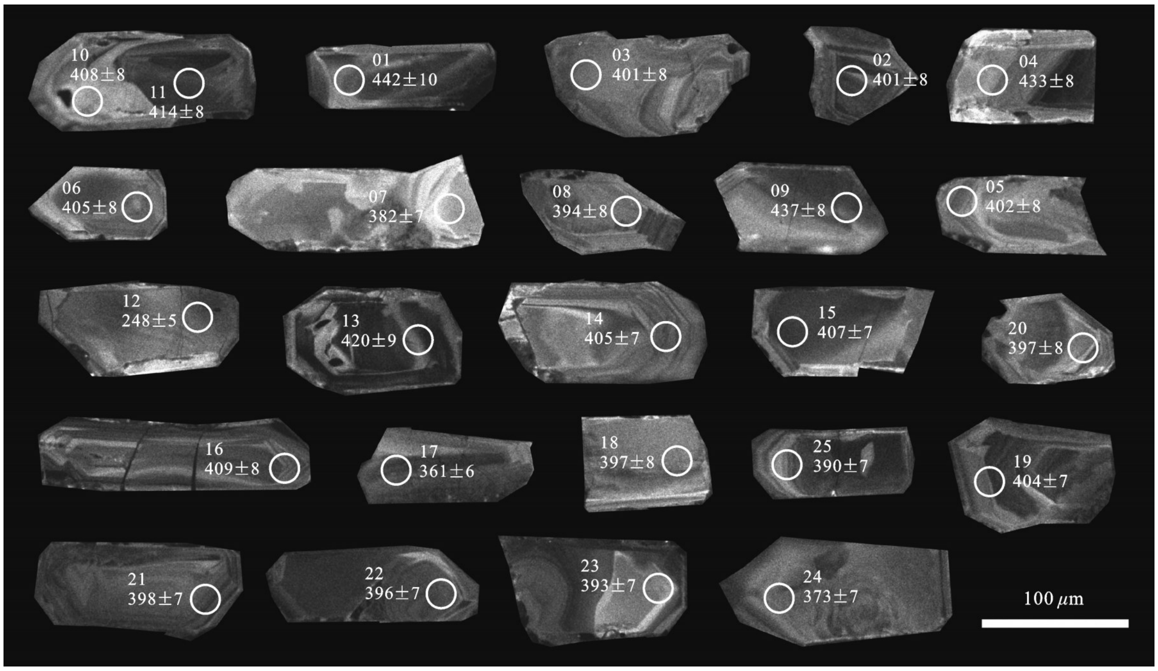

图4 正格河火山岩蚀变流纹岩中锆石阴极发光(CL)图像及U- Pb同位素年龄(Ma)

Fig.4 Cathodoluminescence(CL)images of selected zircons and isotopic ages (Ma) of hornblende rhyolite from Zhenggehe volcanic rocks

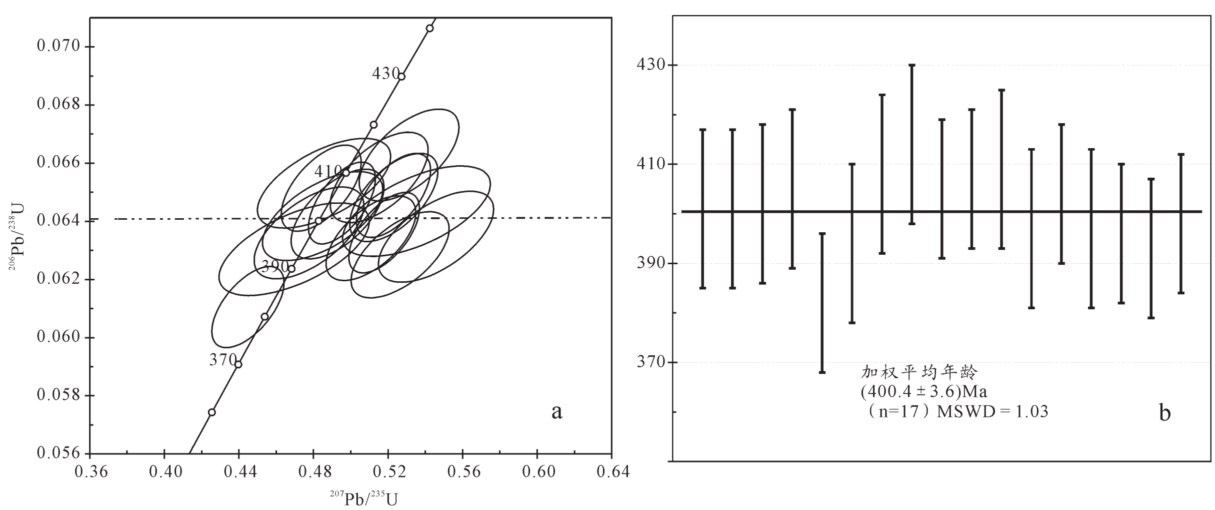

图5 正格河火山岩蚀变流纹岩样品(PM64-5)中锆石U-Pb谐和图和$^{206}Pb/^{238}U$年龄图

Fig.5 Zircon LA-ICP-MS U-Pb concordia diagram and $^{206}Pb/^{238}U$ isotopic ages of hornblende rhyolite(sample PM64-5) from Zhenggehe volcanic rocks

○三研究所分析测试中心完成。常量元素用常规湿法、容量法分析,其中烧失量用重量法分析,微量元素用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)分析,稀土元素用电感耦合等离子体质谱法。常量元素的分析精度(相对标准差)一般小于1%,微量元素和稀土元素分析精度优于5%。样品分析结果见表2。

4.2 岩石地球化学特征

正格河火山岩SiO_2含量变化较小,介于69.77%

表2 正格河火山岩主量(%)、稀土和微量元素(10^{-6})分析结果

Table 2 Major element, trace element and REE data of Zhenggehe volcanic rocks

样品编号	1	2	3	4
SiO_2	69.77	70.56	74.19	75.16
TiO2	0.50	0.57	0.24	0.23
Al_2O_3	13.02	13.02	13.04	13.29
Fe_2O_3	1.64	1.44	0.41	0.55
FeO	2.39	4.32	1.58	1.45
MnO	0.10	0.17	0.05	0.05
MgO	0.87	1.10	0.30	0.29
CaO	2.74	0.96	1.45	1.43
Na_2O	2.57	0.83	2.79	2.66
K_2O	3.45	5.07	4.49	4.36
P_2O_5	0.10	0.15	0.05	0.05
烧失量	2.17	1.39	1.35	0.41
总量	99.32	99.58	99.94	99.93
La	37.40	58.10	39.90	34.20
Ce	85.50	121.90	78.00	82.70
Pr	8.90	14.00	9.00	8.32
Nd	39.70	61.80	37.60	33.70
Sm	7.38	11.40	6.96	6.38
Eu	1.51	2.93	1.08	0.98
Gd	6.57	11.80	7.22	6.10
Tb	0.98	1.63	1.01	0.92
Dy	6.62	10.20	6.45	5.80
Ho	1.20	2.03	1.30	1.22
Er	3.58	5.84	3.89	3.77
Tm	0.53	0.81	0.58	0.57
Yb	3.21	5.27	3.91	3.96
Lu	0.45	0.76	0.57	0.58
∑REE	203.53	308.47	197.47	189.20
Ba	188.00	815.40	201.60	631.20
Rb	58.30	181.40	81.60	163.60
Th	17.40	33.60	42.00	34.30
Nb	6.78	13.90	10.60	12.80
Ta	0.47	0.61	0.68	0.59
Sr	114.20	44.50	287.50	110.60
Zr	240.00	382.20	267.60	200.90
Hf	2.02	3.11	1.15	2.62
U	3.38	1.89	3.90	3.38
Y	34.70	60.10	41.40	37.10
δ	1.35	1.26	1.70	1.53
SI	7.97	8.62	3.13	3.11
A/CNK	1.00	1.51	1.08	1.13
A/NK	1.63	1.90	1.38	1.46
$Mg^{\#}$	28.63	25.88	21.53	21.00
δ Eu	0.63	0.75	0.45	0.46
$(La/Yb)_N$	7.86	7.43	6.88	5.82
$(La/Sm)_N$	3.19	3.21	3.61	3.37
$(Gd/Lu)_N$	1.82	1.93	1.57	1.31

注：样品岩性1、2为含凝灰质英安流纹岩；3、4为片理化蚀变流纹岩；$Mg^{\#}=100\times Mg^{2+}/(Mg^{2+}+TFe^{2+})$，A/NK= 摩尔 $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$；A/CNK=摩尔 $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$；$SI=100\times Mg^{2+}/(MgO+FeO+Fe_2O_3+Na_2O+K_2O)$；$\delta=(Na_2O+K_2O)^2/(SiO_2-43)$。

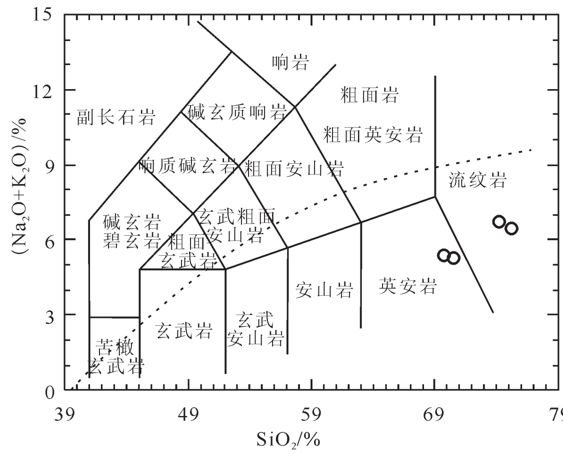

图6 TAS图解[13]

Fig.6 Diagram of TAS[13]

~75.16%，TiO_2含量低，为0.23%~0.57%，Al_2O_3含量介于13.02%~13.29%，MgO含量介于0.29%~1.10%，(Na_2O+K_2O)含量介于5.90%~7.28%。在TAS图解中(图6)样品点落入亚碱性流纹岩、及靠近流纹岩的英安岩区域，这与野外观察及薄片鉴定结果基本一致。样品里特曼指数(δ)为1.26~1.70，均小于3.3，显示出钙碱性的特点[12]。A/NK值介于1.38~1.90，均大于1，A/CNK值为1~1.51，显示过铝质特征；$Mg^{\#}$为21.00~28.63，*SI*为3.11~8.67，这些特征值表明该套火山岩经过了明显的分异作用，结果与钙碱性岩石的演化方向一致[14]。

稀土总量变化较大，∑REE介于189.20×10^{-6}~308.47×10^{-6}，$(La/Yb)_N$为5.82~7.86，$(La/Sm)_N$为3.19~3.61，$(Gd/Yb)_N$为1.31~1.93，这些特征值反映出该组火山岩稀土元素为轻稀土富集型，重稀土元素较亏损，轻、重稀土元素分馏程度较高，且轻稀土元素分馏优于重稀土元素。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(图7)也显示岩石轻稀土富集，重稀土元素比较平坦的特征，岩石具中等程度负铕异常(δEu=0.55~0.75)，可能是岩浆演化过程中存在斜长石的分离结晶作用，一般与俯冲消减相关的岩浆岩都具有上述特征[15]。

微量元素原始地幔标准化蛛网图(图8)显示，正格河火山岩表现出类似与俯冲消减相关的岩浆作用特征：富集Rb、Th等大离子亲石元素，亏损Nb、Ta、Hf等高场强元素。而且，Sr具有不同程度的强负异常，这可能与Sr、Eu受斜长石约束有关。

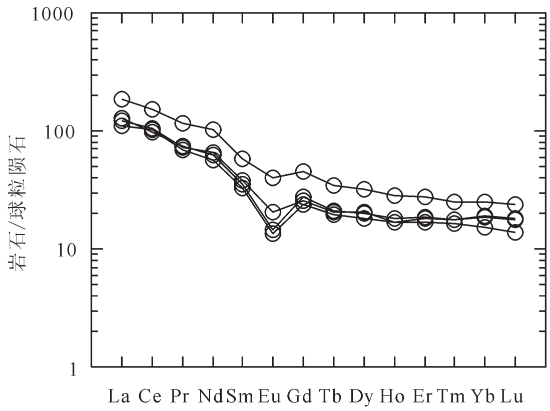

图7 正格河火山岩稀土元素配分曲线[16]
Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns of Zhenggehe volcanic rocks[16]

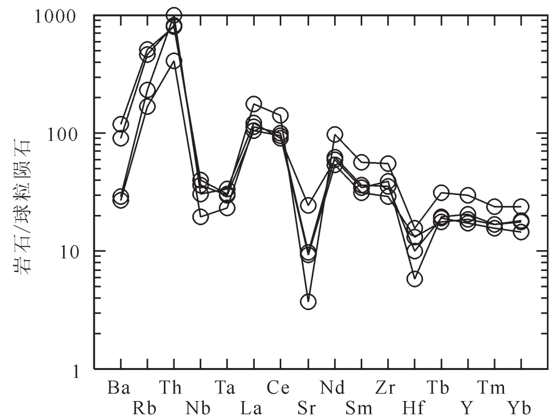

图8 正格河火山岩微量元素蛛网图[17]
Fig.8 Chondrite-normalized spidergram of Zhenggehe volcanic rocks[17]

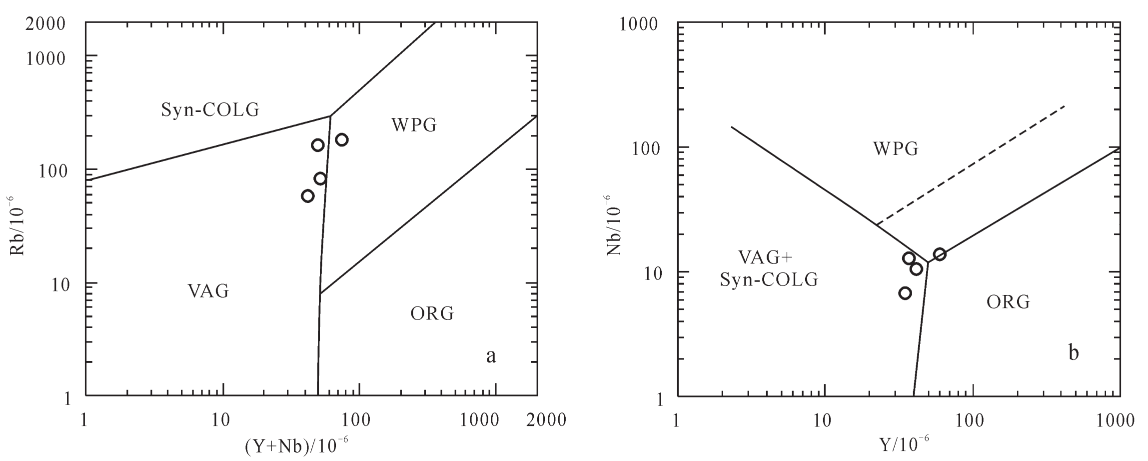

图9 正格河火山岩Rb-(Y+Nb)图解(a)和Nb-Y图解(b)[39]
Fig.9 Rb-(Y+Nb)(a) and Nb-Y(b) plots for Zhenggehe volcanic rocks[39]

5 讨　论

诺尔特地区的物质组成主要为一套火山-沉积岩建造。前人对该地区进行过系统研究,认为诺尔特地区是在早古生代大陆边缘基底陆壳上发展起来的晚古生代陆壳,主要经历了震旦纪—中奥陶世的拉张环境、中奥陶世—志留纪的微板块碰撞、晚泥盆世-石炭纪的再次拉张以及石炭纪之后的剥蚀—夷平阶段[5-8,18-19]。晚古生代由于碰撞造山产生的构造挤压使地壳发生部分熔融,在阿尔泰造山带形成了大量的花岗岩类岩体[20-22]和酸性火山岩组合[23-27]。但对于岩浆岩形成的大地构造环境一直存在着争议,此前的分歧主要在于泥盆纪时期阿尔泰地区是处于大陆边缘裂谷环境[28-30],还是在活动大陆边缘的伸展环境[25,31],或者是后碰撞造山环境[22,33]。最近,越来越多的研究成果指示其形成于与俯冲作用有关的岛弧或弧后盆地环境[26-27,32-35]和活动大陆边缘的陆弧环境[20,23,36-37]。但阿尔泰诺尔特地区在晚古生代时期,仅发育一套石炭纪火山-沉积岩建造,并一直被认为是俯冲-碰撞后形成的上叠断陷盆地的产物。此次工作中新厘定的正格河火山岩中的片理化蚀变流纹岩,其锆石U-Pb年龄结果(400.5±4.6) Ma,时代为早泥盆世,时间上

恰好弥补了诺尔特地区在早泥盆世构造演化上的这一空白时期，对更好地完善诺尔特地区的构造演化历史提供有力的资料。

正格河火山岩的主量元素显示出高硅（69.77%~75.16%）、高碱（5.90%~7.28%）、过铝质（13.02~13.29）的特征，可能与上地壳部分熔融作用有关；稀土元素配分曲线呈明显的右倾型，Eu具中等程度负异常；火山岩富集大离子亲石元素，亏损高场强元素，其中$Yb<5\times10^{-6}$，$Ta<1\times10^{-6}$，$Ta/Yb<0.5$，表现出与俯冲作用有关的岩浆作用特征。其微量元素中，富集Rb、Th等大离子亲石元素，亏损Nb、Ta、Hf等高场强元素。Th的高度富集，与典型岛弧火山岩特征相似[38]。结合花岗岩类的微量元素判别图解（图9），样品点基本落在火山弧环境下，说明火山岩形成于与俯冲作用有关的岛弧环境。个别样品落入板内环境，可能代表了此时在诺尔特地区具有局部拉张的性质，区域上发育的泥盆纪辉长岩及泥盆纪双峰式火山岩，也体现了局部拉张的性质。特别是阿勒泰镇组双峰式火山岩的出现，可能暗示了早古生代末期之前，古亚洲洋发生了俯冲及岩石圈板片断离，区域上泥盆纪火山岩的出现均与该俯冲作用有关[23-27,33]。

从区域资料来看，阿尔泰山南缘泥盆纪（400 Ma左右）发育有大规模的岩浆岩，也是该地区火山岩剧烈活动的时期[23-27,40]。前人研究资料显示，该时期的大量岩浆岩形成于与俯冲作用密切相关的陆缘弧构造环境[20,41]，另外，龙晓平等[42]通过对阿尔泰南缘泥盆纪地层浅变质碎屑沉积岩地球化学特征、源区物质年代学及铪同位素组成研究，认为其形成于活动大陆边缘构造环境，柴凤梅[23,25]、宋国学[24]、单强[26-27]等对泥盆纪阿尔泰造山带南缘的火山岩进行详细的研究证实该时期火山岩的形成与古亚洲洋板块向西伯利亚大陆板块俯冲-消减作用引起的地壳熔融有关。本次工作在阿尔泰南缘的昆格依特岩体中，获得了早泥盆世岩体年龄，并得到相同的构造环境结论[43]。正格河火山岩具有泥盆纪火山岩高硅、高碱、过铝质的钙碱性特征，微量元素表现出岛弧环境特征，判别图解显示其形成于岛弧或活动大陆边缘构造环境，同时，其地球化学特征显示出与昆格依特岩体相似的特点，且岩石SiO_2含量（69.77%~75.16%）、FeO^*/MgO（4.44~6.71）、K_2O/Na_2O（1.34~6.11）具有活动大陆边缘特征（SiO_2=56%~75%、$FeO^*/MgO>2.0$、$K_2O/Na_2O>0.6$）[44]。故此，笔者认为正格河火山岩形成于活动大陆边缘环境，其动力来源于古亚洲洋的向北消减俯冲。

6 结 论

（1）在诺尔特地区新厘定出的正格河火山岩岩石组合特征不同于原属红山嘴组，其中的片理化蚀变流纹岩锆石U-Pb年龄为（400.4±3.6）Ma，时代为早泥盆世。

（2）正格河火山岩形成于与俯冲作用有关的活动大陆边缘构造环境。其形成的动力学背景与古亚洲洋的向北消减俯冲有关。

致谢：本文撰写得到了同事曾忠诚的指导与帮助，审稿人和编辑部李亚萍老师提出了建设性的修改意见，LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄测试和岩石地球化学数据分析分别得到了西北大学大陆动力学国家重点实验室柳小明博士和咸阳核工业二〇三研究所分析测试中心林桂芝工程师的大力支持和热心帮助，在此一并表示诚挚的感谢。

参考文献(References)：

[1] 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 2009, 36(1): 1−28

Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, et al. Subdivision of tectonic units in China [J]. Geology in China, 2009, 36(1): 1−28 (in Chinese with English abstract).

[2] 李志纯, 张志中. 阿尔泰造山带和阿尔泰山构造成矿域的形成[J]. 地质科学, 2002, 37(4): 483−490.

Li Zhichun, Zhao Zhizhong. Creation of the Altali orogenic belt and the Altai Mts. Tectono metallogenic province[J]. Chinese Journal of Geology, 2002, 37(4): 483− 490 (in Chinese with English abstract).

[3] 王涛, 童英, 李舢, 等. 阿尔泰造山带花岗岩时空演变、构造环境及地壳生长意义——以中国阿尔泰为例[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(6): 595−618.

Wang Tao, Tong Ying, Li Shan, et al. Spatial and temporal variations of granitoids in the Altay orogen and their implications for tectonic setting and crustal growth: perspectives from Chinese Altay[J]. Acta Petrologica et Mineralogice, 2010, 29(6): 595−618 (in Chinese with English abstract).

[4] 袁旭音, 周华平, 周涛发, 等. 阿尔泰诺尔特地区晚古生代的沉积

环境和古地理分析[J]. 资源调查与环境, 2002, 23(1): 20−29.

Yuan Xuyin, Zhou Huaping, Zhou Taofa, et al. Sedimentary environment and palaeogeography of late Palaeozoic in Nurt area, Xinjiang [J].Resources Survey & Environment, 2002, 23(1): 20−29 (in Chinese with English abstract).

[5] 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, 23(2): 31−35.

Yuan Feng, Zhou Taofa, Yue Shucang, Geochemical characteristics and tectonic setting of the volcanic rock in the Nurt area of Altay [J]. Geology−Geochemistry, 2001, 23(2): 31−35 (in Chinese with English abstract).

[6] 周涛发, 袁峰, 岳书仓. 诺尔特断陷火山盆地石炭纪火山岩成因及火山作用机理[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2002, 25 (4):481−486.

Zhou Taofa, Yuan Feng, Yue Shucang. Volcanism and genesis of Carboniferous volcanic rorks in the Nurt faulted volcanic basin [J]. Journal of Hefel University of Technology, 2002, 25(4): 481−486 (in Chinese with English abstract).

[7] 董永观, 芮行健, 周刚, 等. 新疆诺尔特地区化探特征及成矿潜力分析[J]. 地质论评, 2010, 56(2): 215−223.

Dong Yongguan, Rui Xingjian, Zhou Gang, et al. Characteristics of regional geochemical exploration abnormity and mineralization in the Nurt area, Altay, Xinjiang [J]. Geological Review, 2010, 56(2): 215−223 (in Chinese with English abstract).

[8] 袁旭音, 朱韶华, 周华平, 等. 阿尔泰诺尔特地区地层−岩浆−构造轮廓初析[J]. 新疆地质, 2002, 14(1): 1−11.

Yuan Xuyin, Zhu Shaohua, Zhou Huaping, et al. Outline of stratigraphy− magma− tectonics in Nurt area of Altay[J].Xinjing Geology, 2002, 14(1): 1−11 (in Chinese with English abstract).

[9] Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U−Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation− inductively coupled plasma− mass spectrometry[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2004, 28(3): 353−370.

[10] Anderson T. Correction of common Pb in U−Pb analyses that do not report ^{204}Pb[J]. Chemcal Geology, 2002, 192(1/2): 59−79.

[11] Ludwig K R. Isoplot/Ex version 2.49. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication No.1a, 2003: 1−56.

[12] 张志成, 郭召杰, 冯志硕, 等. 阿尔金索尔库里地区元古代流纹斑岩锆石 SHRIMP U−Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(2): 597−606.

Zhang Zhicheng, Guoshaojie, Feng Zhishuo, et al. SHRIMP U−Pb age of zircons from Suoerkuli rhyolite in the Altyn Tagh mountains and its geological significations[J]. Acta Petrologica, Sinica, 2010, 26(2): 597−606 (in Chinese with English abstract).

[13] Le Bas M J, LeMaitre R W, Streckesen A L, et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali− silica diagram[J]. Journal of Petrology, 1986, 27(3): 745−750

[14] 邱家骧, 林景仟. 岩石化学[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 40−52.

Qiu Jiaxiang, Lin Jingqian. Petrochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 40− 52(in Chinese with English abstract).

[15] Gill J B. Orogenic Andesites and Plate Tectonics [M]. Berlin: Speringer, 1981: 1−390.

[16] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[C]. //Henderson P. Rareearth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 64−114

[17] Thompson R N. British Tertiary Volcanic province[J]. Scott J. Geol., 1982, 18: 59−107.

[18] 何国琦. 中国阿尔泰造山带的构造分区和地壳演化[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 9−12.

He Guoqi. Tectonic Divisions and Crustal Evolution of the Altay Orgen in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990: 9−12(in Chinese with English abstract).

[19] 何国琦, 朱永峰. 中国新疆及临区地质矿产与对比研究[J]. 中国地质, 2006, 33(3): 451−460.

He Guoqi, Zhu Yongfeng. Comparative study of the geology and minral resources in Xinjiang, China, and its adjacent regious [J]. Geology in China, 2006, 33(3): 451− 460 (in Chinese with English abstract).

[20] 童英, 王涛, 洪大卫, 等. 中国阿尔泰北部山区早泥盆世花岗岩的年龄、成因及构造意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(8): 1933−1944.

Tong Ying, Wang Tao, Hong Dawei, et al. Ages and origin of the early Devonian granites from the north part of Chinese Altai Mountains and its tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(8): 1933−1944(in Chinese with English abstract).

[21] 李会军, 何国琦, 吴泰然, 等. 中国阿尔泰早古生代后碰撞花岗岩的发现及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(8): 2445−2451.

Li Huijun, He Guoqi, Wu Tairan, et al. Discovery of the Early Paleozoic post− collisional granite in Altay, China and its geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(8): 2445−2451(in Chinese with English abstract).

[22] 董连慧, 屈迅, 赵同阳, 等. 新疆北阿尔泰造山带早古生代花岗岩类侵入序列及其构造意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2307−

2316.

Dong Lianhui, Qu Xun, Zhao Tongyang, et al. Magmatic sequence of Early Plaeozoic granitic intrusions and its tectonic implications in the Altay orogen, Xinjiang [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(8): 2307−2316(in Chinese with English abstract).

[23] 柴凤梅, 毛景文, 董连慧, 等. 阿尔泰南缘克朗盆地康布铁堡组变质火山岩年龄及岩石成因[J]. 岩石学报, 2009, 25(6): 1403−1415.

Chai Fengmei, Mao Jingwen, Dong Lianhui, et al. Geochronology and genesis of the meta−rhyolites in the Kangbutiebao Formation from the Kelang basin at the southern margin of the Altay, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(6): 1403−1415(in Chinese with English abstract).

[24] 宋国学, 秦克章, 刘铁兵, 等. 阿尔泰南缘阿舍勒盆地泥盆纪火山岩中古老锆石的U−Pb年龄、Hf同位素和稀土元素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26 (10): 2946−2958.

Song Guoxue, Qin Kezhang, Gu Tiebing, et al. The U−Pb ages, Hf isotope and REE patterns of older zircons from Devonian rocks in Ashele basin on the southern margin of Altai orogen and its significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26 (10): 2946−2958(in Chinese with English abstract).

[25] 耿新霞, 柴凤梅, 杨富全, 等. 新疆阿尔泰南缘达拉乌兹双峰式火山岩年龄及岩石成因[J]. 岩石学报, 2010, 26(10): 2967−2980.

Geng Xinxia, Chai Fengmei, Yang Fuquan, et al. Geochronology and genesis of the bimodal volcanic rocks in Dalawuzi from the southern margin of Altay, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(10): 2967−2980(in Chinese with English abstract).

[26] 单强, 曾乔松, 罗勇, 等. 新疆阿尔泰康布铁堡组钾质和钠质流纹岩的成因及其同位素年代学研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(12): 3653−3665.

Shan Qiang, Zeng Qiaosong, Luo Yong, et al. SHRIMP U− Pb ages and petrology studies on the potassic and podic rhyolites in Altai, Nouth Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(12): 3653−3665(in Chinese with English abstract).

[27] 单强, 曾乔松, 李宁波, 等. 新疆阿尔泰南缘康布铁堡组钾−钠质流纹岩锆石U−Pb年龄和地球化学[J]. 岩石学报, 2012, 28(7): 2132−2144.

Shan Qiang, Zeng Qiaosong, Li Ningbo, et al. Zircon U−Pb ages and geochemistry of the potassic and sodic rhyolites of the Kangbutiebao Formation in the southern margin of Altay, Xinjiang [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(7): 2132−2144(in Chinese with English abstract).

[28] 韩宝福, 何国琦. 阿尔泰山南缘泥盆纪火山岩带的大地构造性质[J]. 新疆地质科学, 1991, 3: 89−100.

Han Baofu, He Guoqi. Geotectonic properties of Devonian Volcanics in Southern Alaty[J]. Xinjiang Geological Science, 1991, 3: 89−100(in Chinese with English abstract).

[29] 陈毓川, 叶庆同, 冯京. 阿舍勒铜锌成矿带成矿条件和成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1−85.

Chen Yuchuan, Ye Qingtong, Feng Jing. Metallogenic Conditions and Prognosis of the Ashele Cu− Zi Metallogenic Belt [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1− 85(in Chinese with English abstract).

[30] 王京彬, 秦克章, 吴志亮, 等. 阿尔泰山南缘火山喷流沉积型铅锌矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 18−60.

Wang Jingbin, Qin Kezhang, Wu Zhiliang, et al. Pb−Zn Deposit of Volcano exhalative sedimentation on Southern margin of Altay, Xinjiang [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998:18−60 (in Chinese with English abstract).

[31] Yuan C, Sun M, Xiao W J, et al. Accretionary orogenesis of the Chinese Altai: Insights from Paleozoic granitoids[J]. Chemical Geology, 2007, 242: 22−39.

[32] 周刚, 张招崇, 王新昆, 等. 新疆玛因鄂博断裂带中花岗质糜棱岩锆石U−Pb SHRIMP 和黑云母 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 年龄及意义[J]. 地质学报, 2007b, 81(3): 359−369.

Zhou Gang, Zhang Zhaochong, Wang Xinkun, et al. Zircon U−Pb SHRIMP and $^{40}Ar-^{39}Ar$ dating of the granitic mylonite in the Mayinebo fault belt of North Xinjiang and its Geological Significance [J]. Acta Geleogica Sinica, 2007, 81(3): 359−369(in Chinese with English abstract).

[33] 牛贺才, 许继峰, 于学元, 等. 新疆阿尔泰富镁火山岩系的发现及其地质意义[J]. 科学通报, 1999, 44(9): 1002−1004.

Niu Hecai, Xu Jifeng, Yu Xueyuan, et al. The discovery of the Rich− Mg volcano rock series in the Altai, Xinjiang, and its geological significance [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(9): 1002−1004(in Chinese with English abstract).

[34] 万博, 张连昌. 新疆阿尔泰南缘泥盆纪多金属成矿带Sr−Nd−Pb同位素地球化学与构造背景探讨[J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 145−152.

Wan Bo, Zhang Lianchang. Sr−Nd−Pb isotope geochemistry and tectonic seting of Devonian polymetallic metallogenic belt on the Southern margin of Altaid, Xinjiang [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(1): 145−152(in Chinese with English abstract).

[35] 万博, 张连昌. 新疆阿尔泰东南缘卡拉先格尔铜矿带含矿斑岩地球化学及其成矿意义[J]. 中国地质, 2006, 33(3): 618−625.

Wan Bo, Zhang Lianchang. Geochemistry of ore- bearing porphyries in the Kalaxiangger copper belt on the southeastern margin of the Altay Mountains, Xinjiang [J]. Geology in China, 2006, 33(3): 618−625 (in Chinese with English abstract).

[36] 许继峰, 梅厚钧, 于学元, 等. 准噶尔北缘晚古生代岛弧中与俯冲作用有关的adakite火山岩: 消减板片部分熔融的产物[J]. 科学通报, 2001, 46(8): 684−687.

Xu Jifeng, Mei Houjun, Yu Xueyuan, et al. Late Paleozoic Adakite Volcano rocks related to subduction from the island are in the northern Junggar: Product of partial melting of the subduction plate [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(8): 684− 687(in Chinese with English abstract).

[37] 张海祥, 牛贺才, Hiroaki Sato, 等. 新疆北部晚古生代埃达克岩、富铌玄武岩组合: 古亚洲洋板块南向俯冲的证据[J]. 高校地质学报, 2004, 10(1): 106−113.

Zhang Haiyang, Niu Hecai, Hiroaki Sota, et al. Late Paleozoic Adakite and Nb- enriched Basalt from Northern Xinjiang: Evidence for the Southward Subduction of the Paleo- Asian Ocean [J]. Geological Journal of China Universities, 2004, 10(1): 106−113(in Chinese with English abstract).

[38] Wood D A. The application of a Th−Hf−Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Teriary volcanic Province[J]. Earth Planet Sci. Lett., 1980, 50: 11−30.

[39] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rock[J]. Journal of Petrology, 1984, 25: 956−983.

[40] Wang Tao, Hong Dawei, Jahn Borming, et al. Timing, Petrogenesis, and Setting of Paleozoic Synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northw est China: implicat ions for the tectonic evolution of an accretionary Orogen[J]. Journal of Geology, 2006, 114: 735−751.

[41] 陈汉林, 杨树锋, 厉子龙, 等. 阿尔泰晚古生代早期长英质火山岩的地球化学特征及构造背景[J]. 地质学报, 2006, 80(1): 38−42.

Chen Hanlin, Yang Shufeng, Li Zilong, et al. Geochemistry and tectonic setting of early Late Paleozoic felsic volcanic rocks from the Altai Orogenic Belt, North Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(1): 38−42(in Chinese with English abstract).

[42] 龙晓平, 袁超, 孙敏, 等. 北疆阿尔泰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 Xiaoping, Yuan Chao, Sun Min, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environments of Devonian low metamorphic clastic sedimentary rocks in the southern margin of Chinese Altai, Nortn Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(4): 718−732(in Chinese with English abstract).

[43] 张亚峰, 蔺新望, 王星, 等. 阿尔泰造山带南缘昆格依特岩体锆石LA−ICP−MS锆石U−Pb年代学、岩石成因及其地质意义[J]. 现代地质, 2014, 28(1): 16−28.

Zhang Yafeng, Lin Xinwang, Wang Xing, et al. LA−ICP−MS U−Pb geochronology, petrogenesis and its geological implications of Kungeyite plutons in southern Altay orogenic belt[J]. Geoscience, 2014, 28(1): 16−28(in Chinese with English abstract).

[44] 邱家骧. 应用岩浆岩岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991, 159−221.

Qiu Jiaxiang. Application of Magmatite Llithology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991: 159− 221(in Chinese with English abstract).