

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.11.008

新疆阿尔金喀腊大湾地区拉配泉组流纹岩年龄和地球化学特征及其对阿尔金北缘构造演化的启示

武彬¹, 王爱国¹, 彭博¹, 王继龙¹, 张艺武¹, 鲍晓明¹, 叶现韬², 于俊杰^{1*}WU Bin¹, WANG Aiguo¹, PENG Bo¹, WANG Jilong¹, ZHANG Yiwu¹, BAO Xiaoming¹,
YE Xiantao², YU Junjie^{1*}

1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016;

2. 河海大学海洋学院, 江苏 南京 210098

1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

2. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China

摘要: 由于新疆阿尔金拉配泉组研究程度较低, 其沉积时代及构造成因仍存在疑问。以拉配泉组流纹岩为研究对象, 开展年代学、地球化学等方面的研究。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果显示, 拉配泉组二段流纹岩年龄为 497 ± 2.0 Ma、三段流纹岩年龄为 483.4 ± 1.9 Ma。岩石地球化学研究显示, 样品具有富硅 (70.07%~78.55%)、低镁 (0.32%~0.58%)、低 $Mg^\#$ (24~30) 等特征。稀土元素分析结果显示, 样品呈现富集轻稀土元素, 相对亏损重稀土元素的特征, $(La/Yb)_N = 10.23 \sim 12.73$, 负 Eu 异常明显 ($\delta Eu = 0.10 \sim 0.19$); 微量元素分析结果显示, 样品明显富集 La、Nd、Zr、Ce、Sm、U、Th、Hf 等, 相对亏损 Sr、Nb、Ti 等。结合前人研究成果, 厘定拉配泉组沉积时代为晚寒武世—早奥陶世。二段流纹岩具有 A 型花岗岩特征, 可能主要来源于地壳物质的部分熔融, 构造环境为北阿尔金洋回转引起的弧后伸展环境。

关键词: 拉配泉组; 流纹岩; U-Pb 年龄; 地球化学; 阿尔金

中图分类号: P588.14⁺1; P597⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2023)11-1894-15

Wu B, Wang A G, Peng B, Wang J L, Zhang Y W, Bao X M, Ye X T, Yu J J. Chronology and geochemical characteristics of the Lapeiquan Formation rhyolite in the Altun Kaladawan area, Xinjiang, and implications for tectonic evolution of the northern margin of Altun. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(11): 1894-1908

Abstract: Due to the low level studies on the Altun Lapeiquan Formation in Xinjiang, its depositional age and tectonic genesis are still in doubt. Chronological and geochemical studies were carried out on the rhyolites of the Lapeiquan Formation. The results of zircon LA-ICP-MS U-Pb dating show that the ages of the second and third member rhyolites of the Lapeiquan Formation are 497 ± 2.0 Ma and 483.4 ± 1.9 Ma, respectively. The petrogeochemical studies show that the samples are Si-rich (70.07%~78.55%), Mg-poor (0.32%~0.58%), and $Mg^\#$ -low (24~30). The rare earth elements exhibit the characteristics of enrichment of light rare earth elements and relatively deficient in heavy rare earth elements ($(La/Yb)_N = 10.23 \sim 12.73$), and the negative Eu is abnormally obvious ($\delta Eu = 0.10 \sim 0.19$); the analysis of trace elements shows that the samples are obviously enriched in La, Nd, Zr, Ce, Sm, U, Th, Hf, etc., and relatively deficient in Sr, Nb, Ti, etc. Combined with the previous researches, the depositional age of the Lapeiquan Formation is determined to be Late Cambrian-Early Ordovician. The second member of rhyolite has the characteristics of A-type granite, and it most likely came from partial melting of crustal materials, and the tectonic environment is a post-arc extensional environment caused by the reversal of the

收稿日期: 2021-07-30; 修订日期: 2021-12-27

资助项目: 国家科技支撑计划项目《甜水海-塔什库干地块基底演化与成矿》(编号: 2015BAB05B01-02)

作者简介: 武彬 (1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事矿产地质调查与研究。E-mail: 119825061@qq.com

* 通信作者: 于俊杰 (1983-), 男, 正高级工程师, 从事基础地质调查研究。E-mail: 25320701@qq.com

North Altun Ocean.

Key words: Lapeiquan Formation; rhyolite; U-Pb dating; geochemistry; Altun

近年来发现的新疆喀腊大湾矿集区,已成为阿尔金地区最重要的矿集区(倪康等,2017),发现有喀腊大湾大型铁矿、喀腊达坂大型铅锌矿、达坂西中小型铜矿、大平沟金矿等。拉配泉组是该矿集区主要的赋矿地层,也是研究阿尔金北缘地区构造演化进程的重要地质单元(倪康等,2017)。随着喀腊大湾地区矿产资源的开发,学者们陆续对该地区基础地质、矿床成因开展了研究工作(陈宣华等,2009;陈柏林等,2010;2016;倪康等,2017;Ye et al., 2018;武彬等,2019;王坤等,2023)。陈柏林等(2016)通过卓阿布拉克组中酸性火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年,获得年龄值 477~485 Ma;倪康等(2017)对拉配泉组三段流纹岩开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,获得年龄值为 488 Ma。从前人研究结果分析,目前仅对拉配泉组三段的流纹岩进行了精确定年,缺少对其他地层流纹岩的精细定年和详细研究,制约了对拉配泉组流纹岩成因及形成构造环境,以及该地区构造演化与成矿研究的认识。因此,本文通过对拉配泉组二、三段中流纹岩进行锆石 U-Pb 精确定年及岩石地球化学研究,在准确厘定拉配泉组沉积时代的基础上,探讨流纹岩的成因及形成构造背景。该研究为阿尔金地区大地构造演化过程提供了新的制约,也对喀腊大湾地区矿产勘查具有重要指导意义。

1 区域地质背景

阿尔金喀腊大湾地区位于青藏高原北缘(倪康等,2017;张传林等,2022),北接塔里木盆地南缘,南邻柴达木盆地(图 1-a)。阿尔金北缘地区可划分为太古宙混杂岩带、俯冲碰撞杂岩带、米兰河-金雁山地块(刘良等,2002;Liu et al., 2008)。研究区出露地层有太古宇米兰岩群达格拉格布拉克组(Ardg)、下古生界拉配泉组($\text{C}_3\text{-O}_1\text{l}$)、奥陶系斯米尔布拉克组(O_1s)、上石炭统因格布拉克组(C_3y) (武彬等,2019)、古近系下干柴沟组(E_3g)、新近系干柴沟组(N_1g)、油砂山组(N_1y)及第四系(Q)(图 1-b)。

喀腊大湾地区位于北东向阿尔金走滑断裂与东西向阿尔金北缘断裂之间,属阿尔金山构造带中

部(倪康等,2017)。自太古宙以来,该区域经历了多期次的碰撞造山作用(倪康等,2017)。前人研究表明,在震旦纪晚期—早古生代早期,红柳沟-拉配泉裂谷带扩张成洋,晚寒武世发生板块俯冲作用,中晚奥陶世发生碰撞作用(崔军文等,1999;戚学祥等,2005;张建新等,2007;杨经绥等,2008;陈柏林等,2016;李猛等,2021)。晚中生代以来,受欧亚板块与印度板块碰撞造山的远程影响,阿尔金断裂带发生了较大规模的左行走滑(崔军文等,1999;陈正乐等,2002;Liu et al., 2006;陈柏林等,2010)。研究区断裂主要有阿尔金北缘断裂、白尖山断裂和喀腊达坂断裂(陈宣华等,2009;武彬等,2019),阿尔金北缘断裂呈近东西向,倾向北,分为主断裂及次级断裂,控制着区内晚寒武世火山岩、早奥陶世和早志留世侵入岩及石炭系的分布(武彬等,2019)。

研究区侵入岩发育,主要为加里东钙碱性侵入岩及部分高钾钙碱性侵入岩(武彬等,2019)。钙碱性侵入岩从基性至酸性均有出露(图 1),其中以基性岩为主(Ye et al., 2018),岩性包括辉长辉绿岩、辉长岩、辉绿岩,多呈近东西向不连续分布的岩株或岩脉产出,其展布方向大体受构造线方向控制,表现为顺地层侵入。高钾钙碱性侵入岩以中—酸性侵入岩为主,中—酸性岩广泛分布,多呈岩枝、岩基侵位于拉配泉组(陈宣华等,2009;Ye et al., 2018)。

2 地层特征及样品采集

拉配泉组分布于阿尔金北缘地区俯冲碰撞杂岩带中部,阿尔金北缘断裂以南、喀腊达坂断裂以北区域,呈近东西向条带状展布,横贯研究区,向东延至阿尔金断裂带(武彬等,2019)。拉配泉组北与太古宇米兰岩群为断层接触,南与古近系渐新统下干柴沟组呈角度不整合接触(倪康等,2017)。依据岩性组合特征,将该组自下而上划分为 3 个岩性段(新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第一地质大队,2008)(图 1)。

拉配泉组一段($\text{C}_3\text{-O}_1\text{l}^1$):以碎屑岩为主、火山岩次之,主要岩性为变质粉砂岩、变质玄武岩、砂质

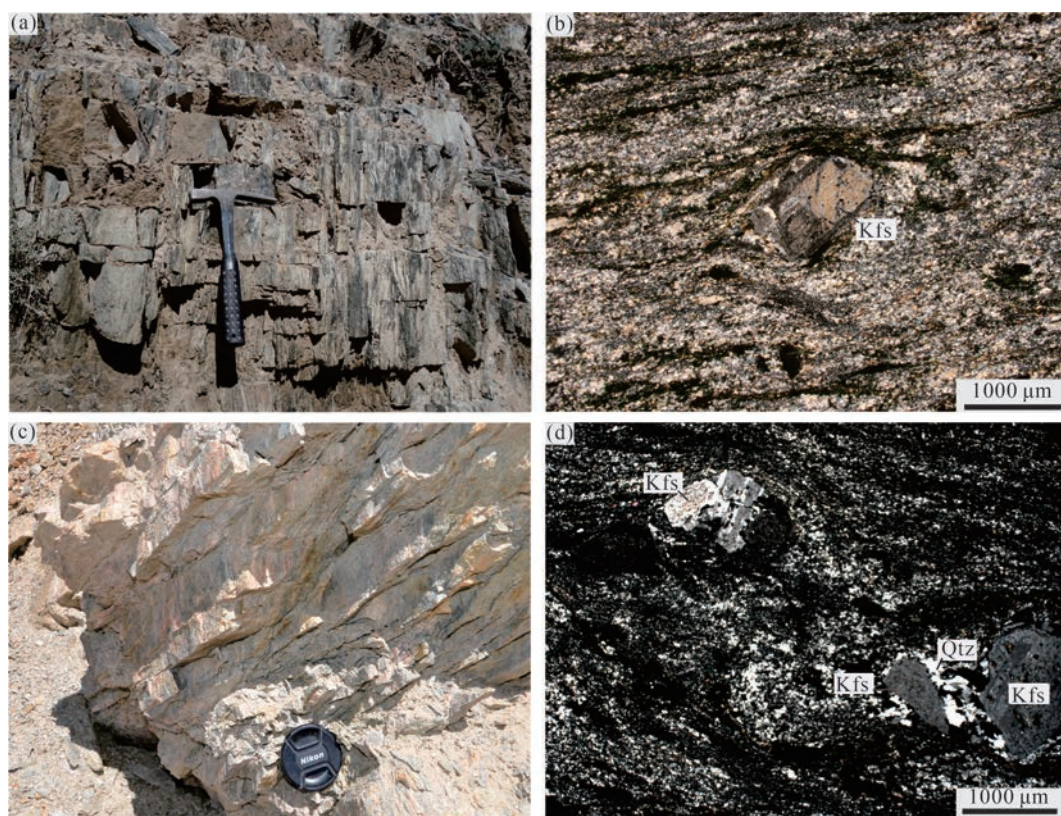


图 2 拉配泉组二段流纹岩原位及镜下(正交)照片(a,b)和三段流纹岩原位及镜下(正交)照片(c,d)

Fig. 2 In-situ and microscopic(orthogonal) photographs of the second member(a,b) and the third member(c,d) rhyolite of the Lapeiquan Formation

Kfs—钾长石;Qtz—石英

仪(Neptune)和氟化氙准分子激光器(New Wave 193 nm FX)。实验过程中采用激光剥蚀系统产生的相应光束能量密度为 10 J/cm^2 ,束斑直径为 $32 \mu\text{m}$,共剥蚀 40 s,频率为 5 Hz。以锆石 91500 为测试过程中的外标,校正仪器质量偏差与元素分馏;实验中以标准锆石 GJ-1 为盲样检验 U-Pb 定年数据质量;锆石中的 Pb 元素含量标定采用 NIST SRM 610 为外标,Si 为内标;微量元素含量标定以 Zr 为内标(Liu et al.,2010a;Hu et al.,2011)。原始的测试数据用 ICPMSDataCal 软件(Liu et al.,2010b;高林志等,2015)和 Isoplot 程序进行处理(Ludwig,2003)。

全岩主量元素分析在中国地质调查局南京地质调查中心实验室完成,主量元素用 X 射线荧光光谱法(XRF)分析,仪器为 AFS-2202a 型 X 射线荧光光谱仪,分析误差优于 1%;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微量

元素测试分析,实验仪器为 ELAN-DRC-e ICP-MS,仪器灵敏度调整为 $1 \text{ ng/mL}^{115}\text{In}$,约 30000 cps。以多元素标准溶液为外标,以国际标样 AMH-1(安山岩)OU-6(板岩)为标准参考物质。测试元素的相对误差优于 $\pm 5\%$,具体步骤和全流程实验空白值数据 Qi et al.(2000)。

4 测试结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

分析测试结果详见表 1,代表性锆石测试点位相应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄及阴极发光(CL)图像见图 3。

拉配泉组二段流纹岩(样品 D1101)的锆石在单偏光镜下呈无色粉色,晶形较好,自形程度高,形态上呈柱状或长柱状,长 $50 \sim 150 \mu\text{m}$,长宽比为 $1.2 \sim 2$ 。在 CL 图像上可以清晰地看到锆石的振荡环带,显示典型的岩浆成因锆石特征(图 3-a)。对

其中具有代表性的 31 粒锆石进行 LA-ICP-MS U-Pb 测年。Th、U 含量变化总体较大, 分别为 $391 \times 10^{-6} \sim 3997 \times 10^{-6}$ 和 $603 \times 10^{-6} \sim 6885 \times 10^{-6}$, Th/U 值变化较大(表 1), 介于 0.13~3.78 之间。31 个测点除一个点具明显低的年龄值外(可能为试验误差), 其余测点都位于谐和线上, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $485 \pm 5 \sim 508 \pm 5$ Ma 之间, 年龄加权平均值为 497 ± 2.0 Ma (MSWD=1.03) (图 3-b)。

拉配泉组三段流纹岩(样品 DWTW01)的锆石在单偏光镜下呈无色、浅粉色, 晶形较好, 自形程度

普遍较高, 形态上呈柱状或长柱状, 长 $60 \sim 130 \mu\text{m}$, 长宽比为 $1 \sim 2$ 。在 CL 图像上可以清晰地看到锆石的振荡环带, 显示典型的岩浆成因锆石特征(图 3-c)。31 粒代表性锆石的 Th、U 含量变化较大, 分别为 $177 \times 10^{-6} \sim 550 \times 10^{-6}$ 和 $421 \times 10^{-6} \sim 833 \times 10^{-6}$, Th/U 值介于 0.42~0.68 之间, 大部分在 0.57 左右(表 1)。31 个测点除一个点明显高于其他点外, 其余测点都位于谐和线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $475 \pm 5 \sim 490 \pm 5$ Ma 之间, 年龄加权平均值为 483.4 ± 1.9 Ma (MSWD = 0.58) (图 3-d)。

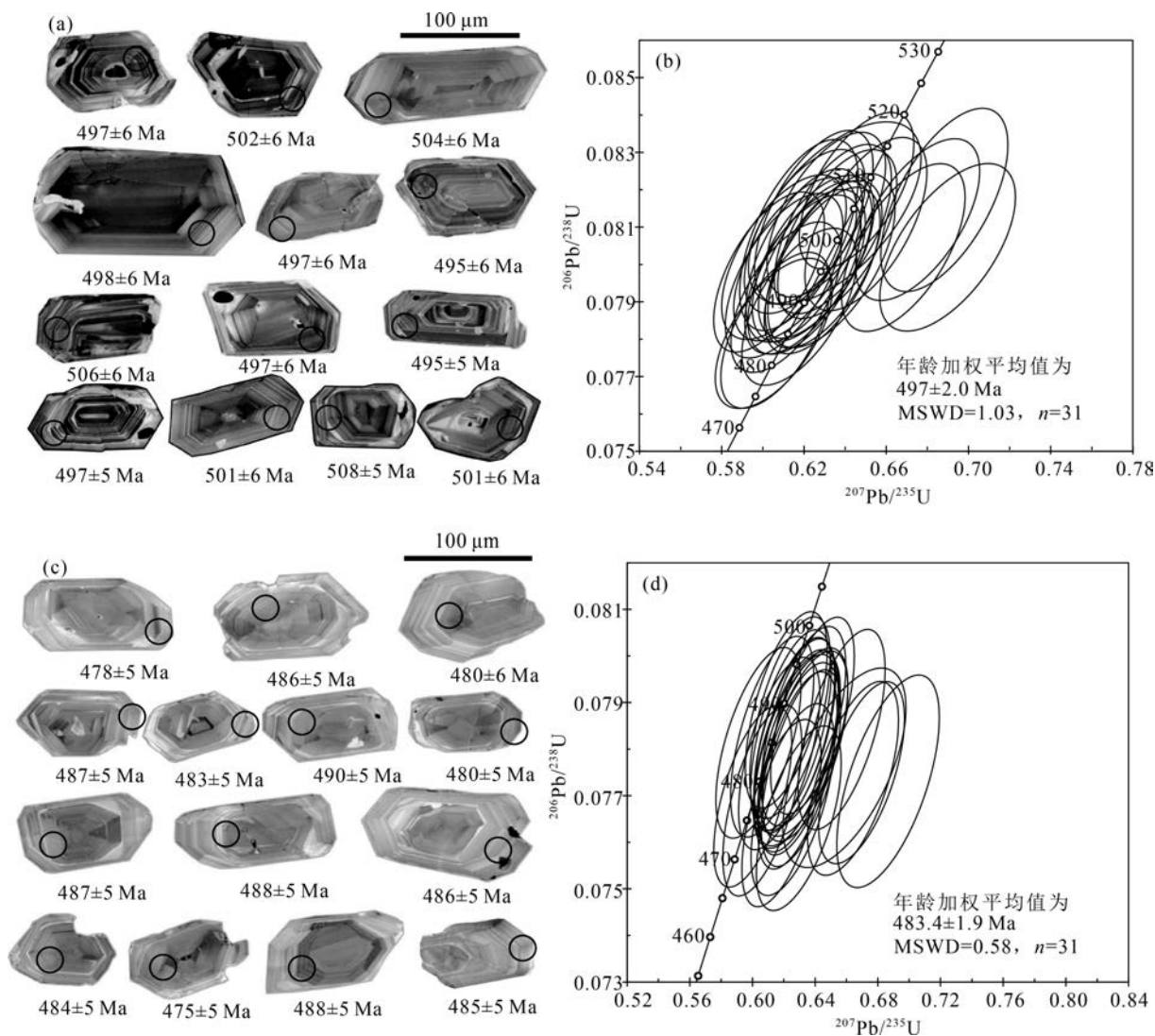


图 3 拉配泉组二段(a、b)、三段(c、d)流纹岩锆石阴极发光(CL)图像及锆石 U-Pb 谐和图
Fig. 3 CL images and U-Pb concordia diagrams of zircons from rhyolite in the second member(a,b) and third member(c,d) of the Lapeiquan Formation

表 1 拉配泉组二段、三段流纹岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 测试结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Th-Pb dating result of the second and third members of rhyolite of the Lapeiquan Formation

编号	含量/ 10^{-6}				同位素比值						年龄/Ma			
	Pb	U	Th	Th/U	$^{206}\text{Pb}/$	1σ	$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{206}\text{Pb}/$	1σ
					^{238}U		^{235}U		^{206}Pb		^{206}Pb		^{238}U	
2-1	80	925	771	0.8339	0.0801	0.0009	0.6158	0.0122	0.0557	0.0010	442	40	497	6
2-2	243	2620	3006	1.1472	0.0809	0.0009	0.6341	0.0116	0.0568	0.0009	484	36	502	6
2-3	92	1058	897	0.8472	0.0800	0.0009	0.6296	0.0116	0.0571	0.0010	495	37	496	6
2-4	128	1443	1418	0.9823	0.0808	0.0009	0.6363	0.0118	0.0571	0.0009	496	37	501	6
2-5	149	1663	1869	1.1239	0.0802	0.0009	0.6202	0.0116	0.0561	0.0009	455	37	498	6
2-6	53	623	443	0.7105	0.0814	0.0010	0.6350	0.0171	0.0566	0.0012	476	48	504	6
2-7	122	1320	1750	1.3258	0.0813	0.0009	0.6249	0.0118	0.0558	0.0010	443	38	504	6
2-8	93	1122	721	0.6422	0.0813	0.0009	0.6309	0.0118	0.0563	0.0010	463	38	504	6
2-9	55	670	432	0.6452	0.0801	0.0010	0.6334	0.0126	0.0574	0.0010	505	40	497	6
2-10	87	1054	806	0.7645	0.0797	0.0009	0.6195	0.0115	0.0564	0.0010	466	38	495	5
2-11	78	907	844	0.9299	0.0802	0.0009	0.6245	0.0121	0.0565	0.0010	472	39	497	6
2-12	99	1154	1013	0.8776	0.0808	0.0010	0.6177	0.0118	0.0555	0.0009	430	38	501	6
2-13	524	6685	3836	0.5738	0.0820	0.0009	0.6457	0.0114	0.0571	0.0009	496	36	508	5
2-14	102	1174	1053	0.8970	0.0811	0.0009	0.6502	0.0121	0.0582	0.0010	536	37	503	6
2-15	131	1470	1511	1.0278	0.0812	0.0009	0.6754	0.0123	0.0603	0.0010	615	36	503	5
2-16	55	663	452	0.6816	0.0809	0.0009	0.6205	0.0120	0.0556	0.0010	438	40	501	6
2-17	179	1996	2128	1.0662	0.0805	0.0009	0.6685	0.0123	0.0603	0.0010	613	36	499	6
2-18	107	1226	1223	0.9975	0.0817	0.0010	0.6883	0.0126	0.0611	0.0010	642	37	506	6
2-19	124	1415	1540	1.0882	0.0798	0.0009	0.6031	0.0110	0.0548	0.0009	405	37	495	5
2-20	142	1695	1593	0.9402	0.0782	0.0009	0.6063	0.0109	0.0562	0.0009	461	37	486	5
2-21	81	978	719	0.7354	0.0797	0.0009	0.6105	0.0117	0.0556	0.0010	435	39	494	6
2-22	50	603	391	0.6479	0.0802	0.0009	0.6104	0.0124	0.0552	0.0010	420	42	497	6
2-23	76	924	780	0.8441	0.0782	0.0008	0.6054	0.0116	0.0562	0.0010	460	40	485	5
2-24	142	1622	1721	1.0609	0.0798	0.0009	0.6289	0.0115	0.0571	0.0010	497	37	495	6
2-25	141	2072	3997	1.9291	0.0666	0.0007	0.5835	0.0105	0.0636	0.0011	727	37	415	4
2-26	64	779	494	0.6346	0.0798	0.0008	0.7140	0.0149	0.0649	0.0013	770	41	495	5
2-27	84	1050	552	0.5257	0.0798	0.0009	0.6214	0.0117	0.0565	0.0010	471	38	495	6
2-28	187	2098	2777	1.3238	0.0791	0.0008	0.6113	0.0109	0.0560	0.0009	454	37	491	5
2-29	127	1486	1399	0.9414	0.0801	0.0009	0.6255	0.0113	0.0566	0.0009	477	37	497	5
2-30	101	1136	1298	1.1429	0.0805	0.0009	0.6899	0.0135	0.0622	0.0011	681	36	499	6
2-31	127	1480	1573	1.0625	0.0789	0.0009	0.6184	0.0114	0.0568	0.0010	486	37	489	5
3-1	42	541	313	0.5783	0.0769	0.0008	0.6256	0.0108	0.0590	0.0009	567	34	478	5
3-2	61	552	338	0.6127	0.0905	0.0011	1.7886	0.0377	0.1433	0.0023	2267	28	559	7
3-3	56	698	444	0.6366	0.0776	0.0009	0.6587	0.0160	0.0616	0.0012	659	42	482	5
3-4	54	669	420	0.6277	0.0783	0.0009	0.6266	0.0105	0.0580	0.0009	531	32	486	5
3-5	62	763	520	0.6823	0.0778	0.0008	0.6297	0.0105	0.0587	0.0009	556	32	483	5

续表 1

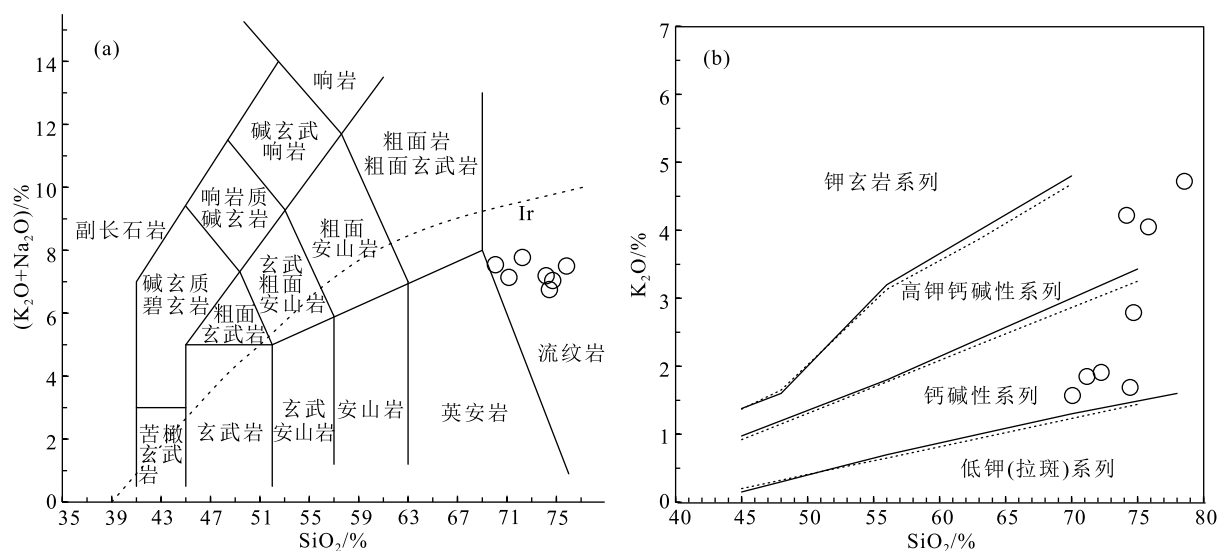
编号	含量/ 10^{-6}				同位素比值						年龄/Ma			
	Pb	U	Th	Th/U	$^{206}\text{Pb}/$	1σ	$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{206}\text{Pb}/$	1σ
					^{238}U		^{235}U		^{206}Pb		^{206}Pb			
3-6	44	545	339	0.6215	0.0773	0.0009	0.6865	0.0133	0.0644	0.0010	755	34	480	6
3-7	49	603	359	0.5956	0.0784	0.0009	0.6569	0.0113	0.0608	0.0009	631	32	487	5
3-8	49	623	341	0.5477	0.0769	0.0008	0.6063	0.0103	0.0572	0.0009	499	33	478	5
3-9	42	543	282	0.5192	0.0766	0.0008	0.6186	0.0103	0.0585	0.0009	550	33	476	5
3-10	35	434	243	0.5603	0.0783	0.0009	0.6126	0.0108	0.0568	0.0009	483	35	486	5
3-11	59	707	457	0.6468	0.0785	0.0009	0.7416	0.0200	0.0685	0.0015	884	45	487	6
3-12	58	701	404	0.5764	0.0791	0.0008	0.7493	0.0121	0.0687	0.0011	891	32	490	5
3-13	41	509	275	0.5398	0.0788	0.0009	0.6216	0.0107	0.0572	0.0009	499	34	489	5
3-14	44	541	319	0.5883	0.0783	0.0008	0.6272	0.0106	0.0581	0.0009	533	35	486	5
3-15	59	743	451	0.6075	0.0779	0.0008	0.6172	0.0106	0.0575	0.0009	509	33	484	5
3-16	55	683	417	0.6095	0.0784	0.0009	0.6246	0.0105	0.0578	0.0009	521	34	487	5
3-17	62	774	497	0.6424	0.0774	0.0008	0.6642	0.0119	0.0623	0.0010	683	33	480	5
3-18	37	467	223	0.4783	0.0780	0.0009	0.6285	0.0112	0.0584	0.0010	546	36	484	5
3-19	47	596	322	0.5402	0.0779	0.0009	0.6289	0.0105	0.0585	0.0009	550	34	484	5
3-20	39	487	252	0.5185	0.0785	0.0009	0.6325	0.0111	0.0584	0.0009	546	35	487	5
3-21	55	686	406	0.5914	0.0776	0.0009	0.6311	0.0104	0.0590	0.0009	567	34	482	5
3-22	38	487	236	0.4847	0.0781	0.0008	0.6337	0.0111	0.0589	0.0010	562	36	485	5
3-23	67	833	550	0.6595	0.0775	0.0009	0.6287	0.0104	0.0588	0.0009	560	33	481	5
3-24	52	657	356	0.5421	0.0780	0.0009	0.6278	0.0112	0.0584	0.0009	544	34	484	5
3-25	51	655	379	0.5788	0.0765	0.0008	0.6296	0.0111	0.0597	0.0010	592	35	475	5
3-26	57	719	392	0.5451	0.0787	0.0009	0.6240	0.0105	0.0575	0.0009	512	33	488	5
3-27	49	621	404	0.6506	0.0770	0.0008	0.6002	0.0102	0.0565	0.0009	474	34	478	5
3-28	36	461	243	0.5263	0.0787	0.0009	0.6383	0.0109	0.0588	0.0009	560	34	488	5
3-29	32	421	177	0.4208	0.0781	0.0008	0.6038	0.0111	0.0560	0.0010	454	38	485	5
3-30	58	737	473	0.6415	0.0775	0.0008	0.6697	0.0112	0.0627	0.0009	697	32	481	5
3-31	40	514	247	0.4809	0.0782	0.0008	0.6328	0.0115	0.0587	0.0010	557	35	485	5

4.2 全岩地球化学特征

拉配泉组二段流纹岩样品全岩地球化学分析结果见表 2。样品 SiO_2 含量介于 70.07%~78.55% 之间,均值为 73.90%; TiO_2 含量介于 0.15%~0.19% 之间,均值为 0.17%,属低 TiO_2 流纹岩; MgO 含量介于 0.32%~0.58% 之间,均值为 0.46%; CaO 含量介于 0.75%~2.60% 之间,均值为 1.63%; Na_2O 含量介于 2.27%~5.97% 之间,均值为 4.39%; K_2O 含量介于 1.57%~4.72% 之间,均值为 2.85%; Al_2O_3 含量介于 10.25%~14.38% 之间,均值为 12.71%。样品分异指数 DI 值高,在 84.18~92.92 之间,均大于 80,平

均为 88.39,可能反映了岩石较高的分异程度或源岩为偏硅质的特征(邱家骧等,1991)。

在 TAS 图解(图 4-a)上,样品点落入流纹岩区域。流纹岩总体具有较高的($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)含量,介于 6.75%~7.77% 之间,均值为 7.24%,除 D1101H1、D1101H3、D1101H4 样品的 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}<1$ 外(可能存在局部钾长石含量较高),其余 5 个样品的 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}>1.5$,为钠质型(邱家骧等,1991)。在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解(图 4-b)上,样品主要为钙碱性系列,少量为高钾钙碱性系列。在 $AR-\text{SiO}_2$ 图(图 5-b)中,样品点位于钙碱性和碱性界线附近。 A/CNK 值介于

图 4 拉配泉组流纹岩 TAS(a) 和 SiO_2 - K_2O 图解(b) (底图据 Le, 1984)Fig. 4 TAS(a) and K_2O - SiO_2 (b) diagrams of rhyolite in the Lapeiquan Formation

0.89~1.03 之间, A/NK 值介于 1.16~1.30 之间, 均值为 1.42, 在 A/CNK - A/NK 图解(图 5-a)中, 样品点大部分位于准铝质范围, 少量位于准铝质—过铝质过渡带。

稀土元素总量 ($\sum \text{REE}$) 介于 $292.84 \times 10^{-6} \sim 366.34 \times 10^{-6}$ 之间, 平均值为 340.09×10^{-6} 。轻、重稀土元素含量比值 LREE/HREE 介于 8.52~9.48 之间, 平均值为 8.99; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 10.23~12.73, 平均

值为 11.41。稀土元素标准化配分曲线总体呈右倾形式(图 6-a), 轻、重稀土元素分馏明显。 $\delta\text{Eu} = 0.10 \sim 0.19$, 平均值为 0.14, 反映了较强烈的负 Eu 异常。在微量元素蛛网图(图 6-b)中, 8 个样品具有相似的配分模式, 表现为大离子亲石元素 (LILE) 相对高场强元素 (HFSE) 明显富集, La、Nd、Ce、Sm、U、Th 等相对富集, Nb、Ti 等相对亏损。

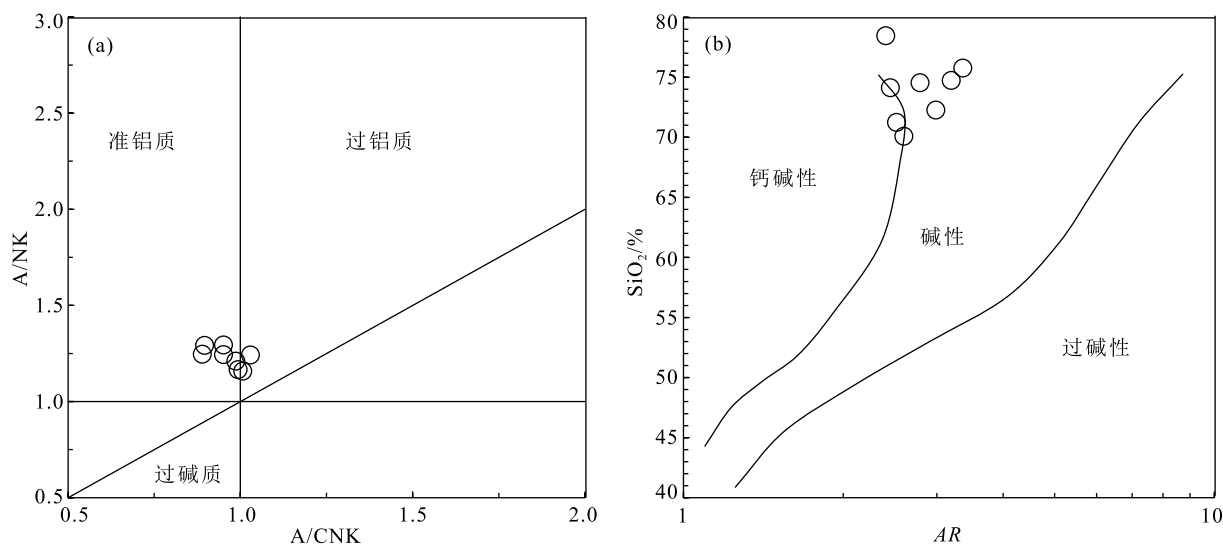
图 5 拉配泉组流纹岩 A/CNK - A/NK (a) 和 AR - SiO_2 (b) 图解Fig. 5 A/CNK - A/NK (a) and AR - SiO_2 (b) diagrams of rhyolite in the Lapeiquan Formation

表 2 拉配泉组二段流纹岩主量、微量和稀土元素分析结果
Table 2 Major, trace and rare earth element analytical data of the rhyolite in the second member of the Lapeiquan Formation

元素	D1101H1	D1101H2	D1101H3	D1101H4	D1101H5	D1101H6	D1101H7	D1101H8
SiO ₂	75.83	72.25	74.17	78.55	74.70	71.16	70.07	74.44
Al ₂ O ₃	11.75	14.17	12.26	10.25	12.38	13.86	14.38	12.59
CaO	0.98	1.46	1.87	0.75	1.10	2.60	2.54	1.70
MgO	0.36	0.46	0.43	0.32	0.58	0.51	0.53	0.48
K ₂ O	4.05	1.91	4.22	4.72	2.79	1.85	1.57	1.69
Na ₂ O	3.45	5.86	2.97	2.27	4.25	5.29	5.97	5.06
TiO ₂	0.16	0.17	0.16	0.15	0.17	0.18	0.17	0.19
P ₂ O ₅	0.021	0.019	0.024	0.020	0.021	0.022	0.024	0.022
MnO	0.037	0.050	0.053	0.034	0.053	0.069	0.064	0.053
烧失量	0.66	0.65	0.93	0.54	0.74	0.89	1.18	0.85
TFe ₂ O ₃	2.10	2.47	2.54	1.94	2.72	3.25	3.07	2.58
BaO	0.15	0.07	0.18	0.19	0.12	0.07	0.06	0.06
总量	99.55	99.54	99.81	99.73	99.62	99.75	99.63	99.72
K ₂ O/Na ₂ O	0.85	3.07	0.70	0.48	1.52	2.86	3.80	2.99
FeO/MgO	5.25	4.83	5.32	5.46	4.22	5.74	5.21	4.84
A/NK	1.17	1.21	1.30	1.16	1.24	1.30	1.25	1.24
A/CNK	0.99	0.99	0.95	1.00	1.03	0.90	0.89	0.95
分异指数 DI	91.68	88.80	87.23	92.92	89.28	84.18	84.91	88.12
Mg [#]	25.35	26.95	25.11	24.62	29.69	23.71	25.48	26.93
Li	1.58	1.55	1.92	1.22	1.89	1.27	1.62	1.48
Be	2.73	3.70	1.83	2.38	2.76	4.21	4.06	2.71
Sc	4.57	5.3	4.88	3.97	4.97	4.91	5.32	5.15
V	1.64	2.94	2.54	1.53	2.66	2.99	2.72	2.36
Cr	2.03	5	4.4	6.23	6.73	4.83	6.16	5.25
Co	164	126	174	181	152	124	99.5	134
Ni	7.59	5.68	7.26	10.6	11.3	6.51	5.35	5.29
Cu	1.14	1.14	1.95	1.28	1.93	1.35	1.61	1.07
Zn	60.7	80.5	61.9	61.2	85.6	76.2	79.3	59.4
Ga	14.9	19.4	21.3	12.2	17.2	25.3	22.3	18.7
Ge	1.14	1.37	1.66	0.886	1.24	2.06	1.68	1.59
As	0.99	1.14	1.39	1.14	1.12	1.60	1.53	1.33
Rb	92.9	46.4	96.1	89.2	67.5	47.1	44.5	44.1
Sr	92	182	181	74.4	124	286	249	172
Y	47.10	53.89	61.01	41.95	58.38	62.87	60.68	57.83
Zr	304	332	306	279	343	325	321	349
Nb	19.62	20.99	19.85	18.86	22.90	22.21	21.53	23.28
Sb	0.66	0.60	0.92	0.57	0.55	1.39	1.14	0.83

续表 2

元素	D1101H1	D1101H2	D1101H3	D1101H4	D1101H5	D1101H6	D1101H7	D1101H8
Ba	1470	679	1720	1830	1100	683	484	554
Nb/Ta	11.43	12.36	11.71	11.62	12.57	13.02	13.44	13.04
Rb/Nb	4.74	2.21	4.84	4.73	2.95	2.12	2.07	1.89
Rb/Sr	1.01	0.25	0.53	1.20	0.54	0.16	0.18	0.26
Sr/Y	1.95	3.38	2.97	1.77	2.12	4.55	4.10	2.97
La	62.1	71.4	62.5	57.3	72.2	66	62.3	70.5
Ce	107	113	111	103	122	120	111	124
Pr	12.5	13.5	12.5	11.2	14.3	13.4	12.3	14
Nd	45.3	49.3	46.7	42.1	52.5	50.2	45.2	51.4
Sm	8.29	9.28	9.31	8.08	9.56	9.56	8.52	9.99
Eu	0.96	1.22	1.74	0.79	1.14	1.44	1.32	1.14
Gd	8.18	8.66	9.23	8.26	9.29	9.52	8.75	9.37
Tb	1.28	1.44	1.48	1.16	1.52	1.56	1.42	1.54
Dy	7.7	8.82	9.29	7.26	9.37	9.94	9.39	9.18
Ho	1.53	1.79	1.85	1.4	1.98	2.11	1.94	1.96
Er	4.88	5.64	5.88	4.38	6	6.53	6.04	6
Tm	0.71	0.81	0.78	0.66	0.90	0.91	0.84	0.90
Yb	4.88	5.76	5.9	4.64	6.27	6.39	6.09	6.32
Lu	0.73	0.85	0.84	0.66	0.93	0.88	0.91	0.90
Hf	7.88	8.62	8.16	7.48	8.7	8.48	8.75	9.03
Ta	1.72	1.70	1.70	1.62	1.82	1.71	1.60	1.79
W	958	737	1080	1130	936	835	611	843
Pb	6.81	5.62	8.47	6.04	5.57	8.62	6.96	5.72
Th	23.5	24.8	23.3	21.4	26	24.8	23.9	26.7
U	5.87	7.25	8.19	4.82	7.01	7.83	7.6	6.92
LREE	283.25	311.59	304.77	264.42	330.08	323.48	301.32	328.87
HREE	29.88	33.76	35.25	28.42	36.27	37.84	35.38	36.17
Σ REE	313.14	345.36	340.02	292.84	366.34	361.31	336.70	365.04
LREE/HREE	9.48	9.23	8.65	9.30	9.10	8.55	8.52	9.09
$(La/Yb)_N$	12.73	12.40	10.59	12.35	11.52	10.33	10.23	11.16
δEu	0.12	0.14	0.19	0.10	0.12	0.15	0.15	0.12
$T_{Zr}/^{\circ}C$	847	847	842	845	862	833	828	862

注:主量元素含量单位为%,微量、稀土元素含量单位为 10^{-6} ; $A/NK = Al_2O_3/(Na_2O + K_2O)$; $A/CNK = Al_2O_3/(GaO + Na_2O + K_2O)$; $DI = Qz + Qr + Ab + Ne + Lc + Kp$; $Mg^{\#} = 100 * (MgO/40.3044)/(MgO/40.3044 + TFeO/71.844)$; $\delta Eu = 2Eu/(Sm + Gd)$; $T_{Zr}/^{\circ}C$ 计算据 Watson et al. (1983) 温度计算公式

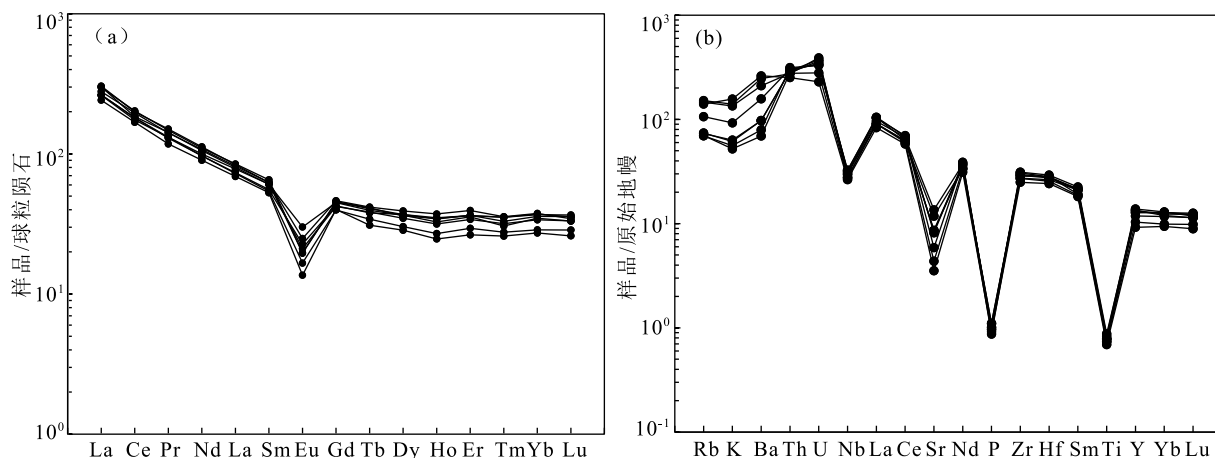


图6 拉配泉组流纹岩稀土元素配分图(a)和微量元素蛛网图(b) (标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 6 REE patterns(a) and trace element spider diagrams(b) of the rhyolite in the Lapeiquan Formation

5 讨论

5.1 火山岩形成的时代

已有研究表明,阿尔金北缘地区拉配泉组是喀腊大湾矿集区的主要赋矿地层(武彬等,2019),然而,对于其沉积时代及地层划分的认识还存在不足。20世纪80年代,1:20万索尔库里幅区域地质调查报告将其归为蓟县系塔昔达坂群(新疆维吾尔自治区地质局区域地质调查大队,1981);2008年,1:5万区域地质调查报告将其划分为3段,归为奥陶系(新疆维吾尔自治区地质矿产勘查第一地质大队,2008)。近年来,不断有学者对该地区开展研究工作,陈柏林等(2006)运用 SHRIMP 锆石 U-Pb 方法对研究区沉积岩系中的中酸性火山岩进行了测年,获得 477~485 Ma 的年龄;倪康等(2017)对区内拉配泉组三段流纹岩开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,获得 488 Ma 的年龄。本文研究表明,拉配泉组二段形成年龄为 497 ± 2.0 Ma,为晚寒武世,三段流纹岩年龄为 483.4 ± 1.9 Ma,与前人年龄数据相近,为早奥陶世。这一结果表明,拉配泉组属于晚寒武世—早奥陶世。

5.2 岩石成因

拉配泉组二段流纹岩地球化学特征显示,其具有高的 SiO_2 含量(70.07%~78.55%)、低的 TiO_2 (0.15%~0.19%)、 Fe_2O_3 (1.94%~3.25%)、 Al_2O_3 (10.25%~14.38%) 和 MgO (0.32%~0.58%) 含量,大离子亲石元素 LILE,如 Rb、Ba 等和轻稀土元素

(LREE)明显富集,高场强元素 Nb、Ta、Ti、Hf 等相对亏损。以上特征表明,流纹岩具有壳源成因(Zen,1986;Xu et al.,2009;李成志等,2020)。

流纹岩具有较平坦的稀土元素配分模式,明显的 Sr、Eu、Ti 和 P 负异常和较高的 Zr、Y、Ce 含量,这些特征与 A 型花岗岩一致(Whalen et al.,1987;King et al.,1997;邱检生等,2000)。(Zr+Nb+Ce+Y)-(Na₂O+K₂O)/GaO 和 $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}-\text{Zr}$ 图解(图7)显示,拉配泉组流纹岩样品均位于 A 型花岗岩区域,具有 A 型花岗岩特征。A 型花岗岩与高分异花岗岩根据元素含量特征可进行区分(胡培远等,2016),S 型花岗岩一般为强过铝质,明显不同于本文流纹岩铝质含量特征,高分异的 I 型花岗岩具全铁含量小于 1% 的特征及较高的 Rb 含量(大于 270×10^{-6}),均明显不同于本文结果(王强等,2000;胡培远等,2016)。花岗岩的形成温度可通过 Zr 饱和温度(T_{Zr})计算,由于锆石是花岗岩中较早结晶的矿物,Zr 饱和温度可近似代表岩石结晶温度(胡培远等,2016)。根据 Watson et al.(1983)温度计算公式,得到流纹岩样品锆石饱和温度为 828~862℃,平均温度为 845℃,符合 A 型花岗岩形成于较高温度的特征,高于 S 型花岗岩锆石饱和温度(平均 764℃)和 I 型花岗岩锆石饱和温度(平均 781℃)(King et al.,1997)。

结合前人研究成果,本次研究通过地球化学分析认为,拉配泉组二段主要来源于地壳物质的部分熔融,主要依据为:①岩石微量元素比值显示,Y/

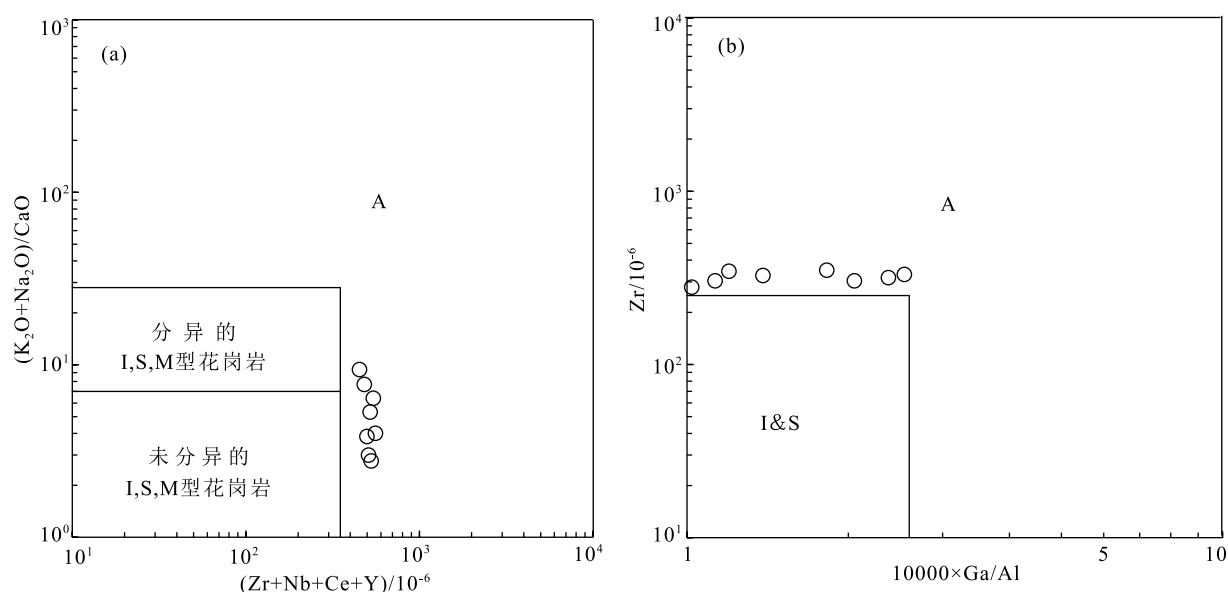


图 7 拉配泉组流纹岩 $Zr+Nb+Ce+Y-(Na_2O+K_2O)/CaO$ (a) 和 $10000 Ga/Al-Zr$ (b) 图解 (据 Whalen et al., 1987)

Fig. 7 $Zr+Nb+Ce+Y-(Na_2O+K_2O)/GaO$ (a) and $10000 \times Ga/Al-Zr$ (b) diagrams of the rhyolite in the Lapeiquan Formation

Nb 值为 2.22~3.07, 大于地幔成因的岩石 (<1.2), 与壳源成因岩石 (>1.2) 相符 (Eby, 1992); ② $Zr-Zr/Sm$ 图解 (图 8-a) 总体呈正相关, 显示其成岩过程以部分熔融为主; ③ 样品 $Mg^\#$ 值为 24~30 (平均 26), 明显低于地幔部分熔融形成的岩石 (朱弟成等, 2006; 李成志等, 2020) ($Mg^\#=68$), 与地壳物质熔融相符; ④ 在 $C/MF-A/MF$ 图解 (图 8-b) 中, 样品点全部位

于变质杂砂岩部分熔融区域。区域上, 与陈柏林等 (2016) 研究认为陆壳物质对喀腊大湾地区中酸性火山岩影响作用较强的结果相符。Eu ($\delta Eu=0.10 \sim 0.19$)、Sr 和 Ti 负异常说明, 岩浆源区可能存在斜长石残留 (Rapp et al., 1991; Martin, 1999; 李梦瞳等, 2020)。拉配泉组二段流纹岩成因可能主要是地壳物质的部分熔融, 同时源区可能存在斜长石的

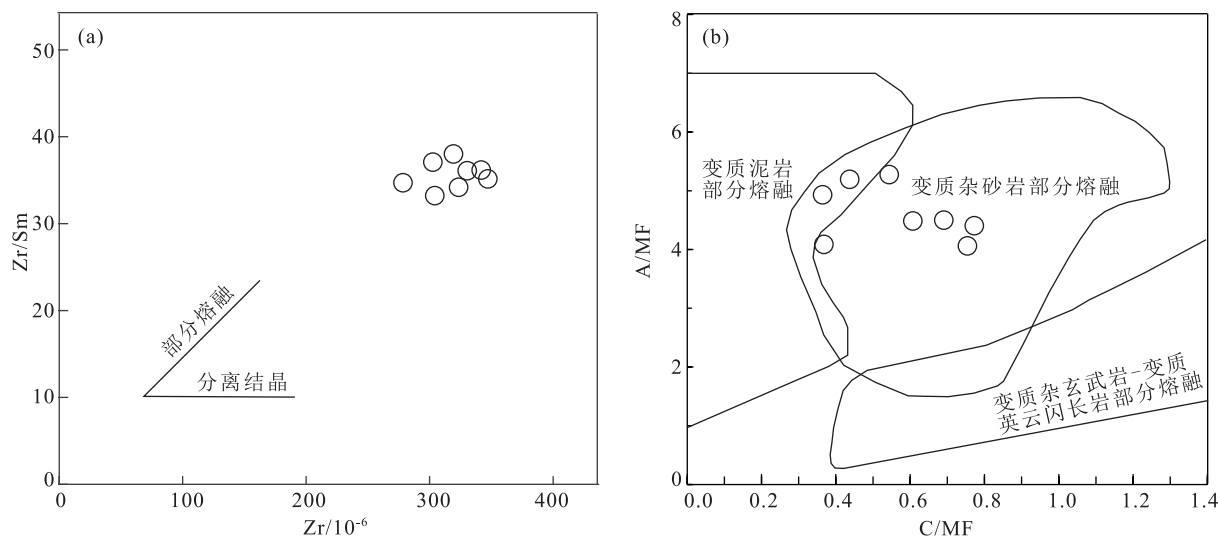


图 8 拉配泉组流纹岩 $Zr-Zr/Sm$ (a, 据 Schiano et al., 2010) 和 $C/MF-A/MF$ (b, 据 Altherr et al., 2000) 图解

Fig. 8 $Zr-Zr/Sm$ (b) and $C/MF-A/MF$ diagrams of rhyolite in the Lapeiquan Formation

A/MF —摩尔 $Al_2O_3/(MgO+TFEO)$; C/MF —摩尔 $CaO/(MgO+TFEO)$

残留。

5.3 构造环境

已有研究表明,在新元古代早期阿尔金地区与西北地区其他微地块一起成为 Rodinia 超大陆的一部分(倪康等,2017)。恰什坎萨伊沟南口双峰式火山岩年龄(750 Ma)表明,阿尔金北缘此时已经开始进入裂解阶段(Schiano et al., 2010),说明阿尔金北缘在新元古代已经开始裂解而形成初始洋盆,代表北阿尔金洋的形成。在贝壳滩—红柳泉地区发现高压低温变质带榴辉岩,于中寒武世(512 ± 3 Ma)进入榴辉岩相峰期变质阶段,反映俯冲至少在中寒武世已经开始(杨经绥等,2008)。在 520~495 Ma 期间,北阿尔金洋板块回转引起了弧后伸展,导致软流圈上涌,岩浆岩发育(Ye et al., 2018)。490~460 Ma 为大洋板块再次俯冲碰撞期(陈柏林等,2016; Ye et al., 2018)。本文拉配泉组二段流纹岩年龄为 497 ± 2 Ma, 与上述大洋板块回转代表的时限相符,其形成构造环境可能为弧后伸展阶段,拉配泉组三段流纹岩 483.4 ± 1.9 Ma, 与大洋板块再次俯冲时限相符(陈柏林等,2016; Ye et al., 2018)。

A 型火成岩形成的构造背景具有独特的构造指示意义,前人根据构造背景把 A 型花岗岩定义为非造山花岗岩和碰撞后花岗岩(王强等,2000; 李成志等,2020),其中 A₁ 型来源于地幔,代表非造山的大

陆裂谷, A₂ 型由地壳或岛弧派生,主要形成于碰撞后的拉张环境或板片俯冲引起的岩石圈伸展环境(蒋少涌等,2008)。在 Y-Nb-Ce (图 9-a) 和 Y/Nb-Ce/Nb (图 9-b) 图解中,拉配泉组火山岩样品点均落入 A₂ 型花岗岩区域。

不同的构造环境背景下形成的岩浆岩岩石类型不同,通过岩浆岩地球化学组分特征可以判断其形成的构造背景(董昕,2008; 李成志等,2020)。拉配泉地区流纹岩在 Y-Nb 和 (Y+Nb)-Rb 构造环境判别图(图 10)中,除个别样品点落入火山弧花岗岩和板内花岗岩分界线附近外,其余样品点落在板内花岗岩区域,说明拉配泉组二段火山岩形成于伸展构造环境。结合区域构造背景及岩石地球化学特征,笔者认为,拉配泉组二段火山岩形成于北阿尔金洋俯冲回转引起的弧后伸展环境。

6 结 论

(1) 通过对阿尔金喀腊大湾地区拉配泉组流纹岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,准确限定拉配泉组二段流纹岩年龄为 497 ± 2.0 Ma, 三段流纹岩年龄为 483.4 ± 1.9 Ma, 拉配泉组二段至三段的形成时代为晚寒武世—早奥陶世。

(2) 拉配泉组二段流纹岩具有富硅、贫铁、低镁, 富大离子亲石元素和轻稀土元素, 相对亏损高

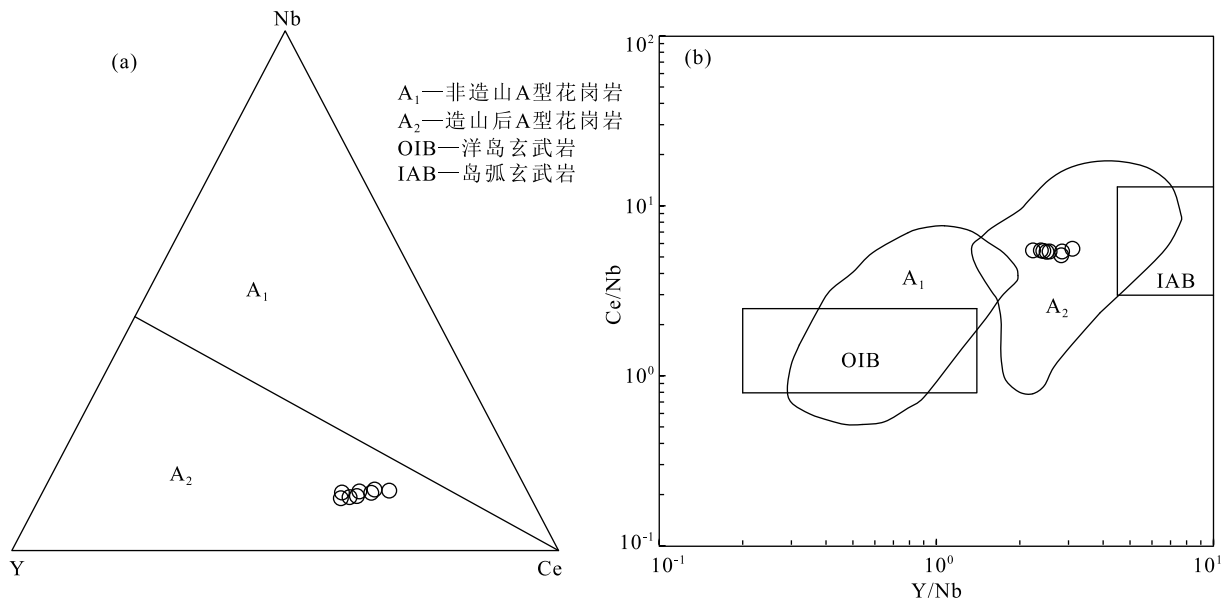


图9 拉配泉组流纹岩 A₁、A₂ 类型判别图(据 Eby, 1992)

Fig. 9 Diagrams for division of type A₁ and type A₂ of the rhyolite in the Lapeiquan Formation

a—Y-Nb-Ce 图解; b—Y/Nb-Ce/Nb 图解

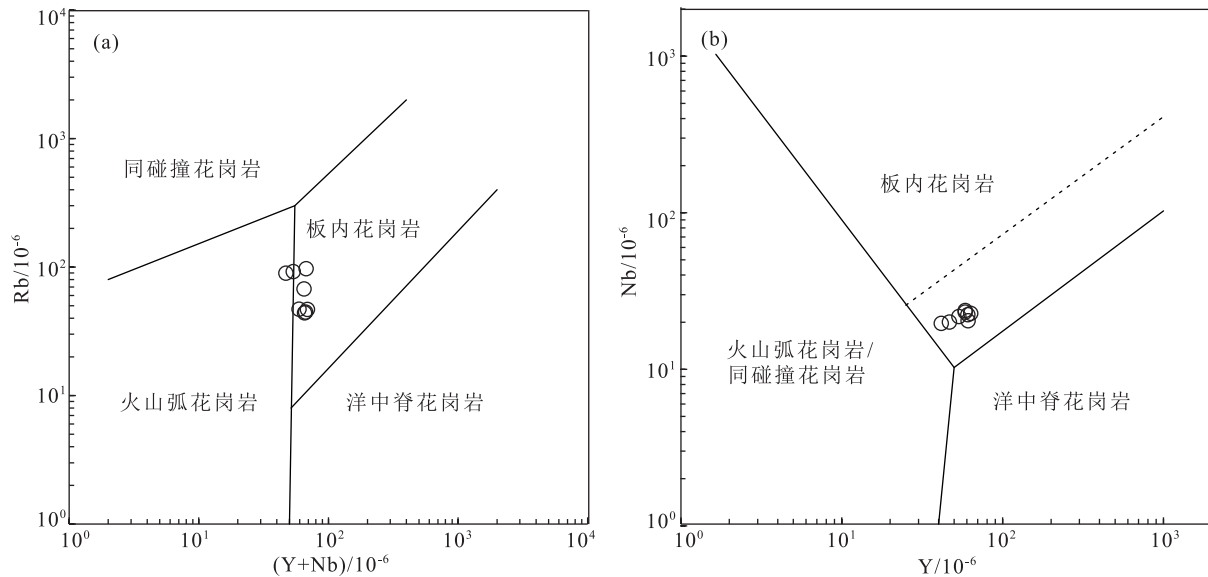


图 10 拉配泉组流纹岩 (Y+Nb)-Rb(a) 与 Y-Nb(b) 图解 (据 Pearce et al., 1984)

Fig. 10 (Y+Nb)-Rb(a) and Y-Nb(b) diagrams of the rhyolite in the Lapeiquan Formation

场强元素的特征,结合微量元素分析结果,拉配组二段流纹岩的成因可能主要是地壳物质的部分熔融,同时源区可能存在斜长石的残留。

(3) 岩石地球化学特征显示,拉配泉组二段流纹岩具有 A 型火成岩特征,进一步划属于 A₂ 类。结合研究区前人构造地质背景研究成果,推测拉配泉组二段流纹岩构造环境为北阿尔金洋回转引起的弧后伸展环境。

致谢:感谢中国地质调查局天津地质调查中心张健高级工程师,中国科学院地球化学研究所漆亮老师在实验分析测试中给予的帮助。感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见。

参考文献

- Altherr R, Holl A, Hegner E, et al. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and Northern Schwarzwald (Germany) [J]. *Lithos*, 2000, 50(1/2/3): 51-73.
- Eby G N. Chemical Subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications [J]. *Geology*, 1992, 20(7): 641.
- Hu Z C, Liu Y S, Chen L, et al. Contrasting matrix induced elemental fractionation in NIST SRM and rock glasses during laser ablation ICP-MS analysis at high spatial resolution [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2011, 26(2): 425-430.
- King P L, White A J R, Chappell B W, et al. Characterization and Origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia [J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38(3): 371-391.

- Le M R W. A proposal by the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks for a chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica (TAS) diagram [J]. *Australian J. Earth Sci.*, 1984, 31: 243-255.
- Liu L, Wang C, Chen D L, et al. Petrology and geochronology of HP-UHP rocks from the south Altyn Tagh, northwestern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35: 232-244.
- Liu Y J, Neubauer F, Genser J, et al. Geochronology of the initiation and displacement of the Altyn strike-slip fault, western China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 29(2/3): 243-252.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 2010a, 51(1/2): 537-571.
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010b, 55(15): 1535-1546.
- Ludwig K R. User's manual for isoplot 3.0: A geochemical toolkit for Microsoft Excel [J]. *Berkely Geochronology Center Special Publication*, 2003, 4: 1-70.
- Martin H. Adakitic magmas: Modern analogues of Archean granitoids [J]. *Lithos*, 1999, 46(3): 411-429.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956-983.
- Qi L, Hu J, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Talanta*, 2000, 51(3): 507-513.
- Rapp R P, Watson E B, Miller C F. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites [J].

- Precambrian Research, 1991, 51(1/4): 1–25.
- Schiano P, Monzier M, Eissen J P, et al. Simple mixing as the major control of the evolution of volcanic suites in the Ecuadorian Andes [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2010, 160(2): 297–312.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]// Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publication, 1989, 42(1): 13–345.
- Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1983, 64(2): 295–304.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95(4): 407–419.
- Xu W L, Ji W Q, Pei F P, et al. Triassic volcanism in eastern Heilongjiang and Jilin Provinces, NE China: Chronology, geochemistry, and tectonic implications [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 34(3): 392–402.
- Ye X T, Zhang C L, Wang A G, et al. Early Paleozoic slab rollback in the North Altun, Northwest China: New evidence from mafic intrusions and high-Mg andesites [J]. Lithosphere, 2018, 10: 687–707.
- Zen E A. Aluminum enrichment in silicate melts by fractional crystallization: Some mineralogic and petrographic constraints [J]. Journal of Petrology, 1986, 27(5): 1095–1117.
- 陈柏林, 崔玲玲, 白彦飞, 等. 阿尔金断裂走滑位移的新认识——来自阿尔金山东段地质找矿进展的启示 [J]. 岩石学报, 2010, 26(11): 3387–3396.
- 陈柏林, 李松彬, 蒋荣宝, 等. 阿尔金喀腊大湾地区中酸性火山岩 SHRIMP 年龄及其构造环境 [J]. 地质学报, 2016, 90(4): 708–727.
- 陈宣华, 尹安, Gehrels G E, 等. 阿尔金山东段地质热年代学与构造演化 [J]. 地质前缘, 2009, 16(3): 207–219.
- 陈正乐, 万景林, 王小凤, 等. 阿尔金断裂 8Ma 左右的快速走滑及其地质意义 [J]. 地球学报, 2002, 23(4): 295–300.
- 崔军文, 唐哲民, 邓晋福, 等. 阿尔金断裂系 [M]. 北京: 地质出版社, 1999: 1–249.
- 董昕. 西藏冈底斯带西南部中生代花岗岩年代学与地球化学 [D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2008.
- 高林志, 尹崇玉, 张恒, 等. 云南晋宁地区柳坝塘组凝灰岩 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄及其对晋宁运动的制约 [J]. 地质通报, 2015, 34(9): 1595–1604.
- 胡培远, 李才, 吴彦旺, 等. 青藏高原古特提斯洋早石炭世弧后拉张: 来自 A 型花岗岩的证据 [J]. 岩石学报, 2016, 32(4): 1219–1231.
- 蒋少涌, 赵葵东, 姜耀辉, 等. 杭带湘南—桂北段中生代 A 型花岗岩带成岩成矿特征及成因讨论 [J]. 高校地质学报, 2008, 14(4): 496–509.
- 李猛, 查显锋, 胡朝斌, 等. 东昆仑西段阿确墩地区白沙河岩组锆石 U–Pb 年龄——对前寒武纪基底演化的约束 [J]. 地质通报, 2021, 40(1): 42–58.
- 李梦瞳, 唐军, 王志伟, 等. 内蒙中部苏左旗早石炭世火山岩年代学与地球化学研究: 对中亚造山带东部石炭纪构造演化和地壳属性的制约 [J]. 岩石学报, 2020, 36(3): 801–819.
- 李成志, 杨文光, 朱利东, 等. 西藏墨竹工卡地区早侏罗世花岗岩地球化学、岩石成因及其地质意义 [J]. 地球科学, 2020, 45(5): 1556–1572.
- 刘良, 孙勇, 校培喜, 等. 阿尔金发现超高压 (>3.8 GPa) 石榴二辉橄榄岩 [J]. 科学通报, 2002, 47(9): 657–662.
- 倪康, 武彬, 叶现韬. 新疆阿尔金北缘拉配泉组流纹岩的锆石 U–Pb 年龄及其地质意义 [J]. 华东地质, 2017, 38(3): 168–174.
- 戚学祥, 李海兵, 吴才来, 等. 北阿尔金恰什坎萨依花岗岩闪长岩的 SHRIMP U–Pb 锆石定年及其地质意义 [J]. 科学通报, 2005, 50(6): 571–576.
- 邱家骧, 林景任. 岩石化学 [M]. 北京: 地质出版社, 1991: 30–240.
- 邱检生, 王德滋, 蟹泽聪史, 等. 福建沿海铝质 A 型花岗岩的地球化学及岩石成因 [J]. 地球化学, 2000, 29(4): 313–321.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第一地质大队, 黄金地质研究所. 若羌县阿克达坂东一带区域地质调查报告 (1:5 万) [R]. 2008.
- 田辉, 张健, 李怀坤, 等. 蓟县系中元古代高于庄组凝灰岩锆石 LA–MC–ICPMS U–Pb 定年及其地质意义 [J]. 地球学报, 2015, 36(5): 647–658.
- 王坤, 蔡志超, 王玺, 等. 东昆仑西段原特提斯洋洋盆闭合时间——来自新疆木孜塔格地区同碰撞花岗岩的证据 [J]. 地质通报, 2023, 42(9): 1556–1570.
- 王强, 赵振华, 熊小林, 桐柏—大别造山带燕山晚期 A 型花岗岩的厘定 [J]. 岩石矿物学杂志, 2000, 19(4): 297–306.
- 武彬, 王爱国, 张传林, 等. 新疆若羌喀腊大湾铁矿床辉钼矿 Re–Os 定年及成因 [J]. 地质通报, 2019, 38(8): 1362–1368.
- 新疆维吾尔自治区地质局区域地质调查大队. 索尔库里幅区域地质报告 (1:20 万) [R]. 1981.
- 杨经绥, 史仁灯, 吴才来, 等. 北阿尔金地区米兰红柳沟蛇绿岩的岩石学特征和 SHRIMP 定年 [J]. 岩石学报, 2008, 24(7): 1567–1584.
- 张传林, 马华东, 李怀坤, 等. 塔里木北缘库鲁克塔格地区古元古界——祝贺芮行健先生 90 华诞 [J]. 华东地质, 2022, 43(2): 133–140.
- 张建新, 孟繁聪, 于胜尧, 等. 北阿尔金 HP/LT 蓝片岩和榴辉岩的 Ar–Ar 年代学及其区域构造意义 [J]. 中国地质, 2007, 34(4): 558–564.
- 朱弟成, 潘桂荣, 莫宣学, 等. 冈底斯中北部晚侏罗世—早白垩世地球动力学环境: 火山岩约束 [J]. 岩石学报, 2006, 22(3): 534–546.