北东帕米尔木吉乡琼让二云母花岗岩的成因及其成矿意义

钱旭坤[1)],刘晓强[1,2)],马华东[3,4)],西艾力·阿尔肯[1)],宋志豪[5)]

1) 新疆大学地质与矿业工程学院,乌鲁木齐,830017;
2) 新疆中亚造山带大陆动力学与成矿预测自治区重点实验室,乌鲁木齐,830017;
3) 新疆维吾尔自治区人民政府国家 305 项目办公室,乌鲁木齐,830000;
4) 新疆自然资源与生态环境研究中心,乌鲁木齐,830000;
5) 河海大学海洋学院,南京,210098

内容提要:西昆仑—帕米尔地区三叠纪花岗岩与古特提斯演化和稀有金属成矿密切相关。本文对北东帕米尔阿克陶县木吉乡南西琼让二云母花岗岩进行了系统岩相学、锆石 U-Pb 年代学、主微量元素地球化学及锆石 Hf 同位素研究。年代学测试结果显示,琼让二云母花岗岩为晚三叠世岩浆活动的产物。地球化学特征显示,二云母花岗岩富 SiO_2(73.24% ~ 74.09%)、Al_2O_3(14.50% ~ 15.01%)和 K_2O(5.52% ~ 5.75%),贫 TiO_2(0.15% ~ 0.18%)、MgO(0.30% ~ 0.37%),且呈强过铝质的地球化学特征(A/CNK = 1.12 ~ 1.15)。岩石具有明显的轻重稀土分馏((La/Yb)$_N$ = 44.62 ~ 54.58)及 Eu 负异常(Eu/Eu* = 0.52 ~ 0.59)。在微量元素原始地幔标准化蜘蛛网图中,琼让二云母花岗岩明显富集大离子亲石元素(如,Rb、Th、U、K)与轻稀土元素,亏损 Sr、Ba、Nb、Ta、Ti、P 和重稀土元素。综合分析认为,琼让二云母花岗岩属 S-型花岗岩,为变泥质岩源经云母脱水熔融而成。琼让二云母花岗岩中岩浆锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ = −7.93 ~ −0.91,大红柳滩地区钙碱性花岗岩锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ = −8.8 ~ −1.4。琼让二云母花岗岩中含较高的 Li 和 Be,且形成时间与构造环境与大红柳滩锂铍伟晶岩矿类似,推测木吉三叠纪花岗岩具有明显的硬岩型锂铍矿找矿潜力。

关键词:S-型花岗岩;三叠纪;成因;成矿;北东帕米尔

位于青藏高原西北缘的西昆仑—帕米尔造山带是多期构造叠加而成的复合型造山带,经历了从新元古代晚期—新生代的长期演化过程(邓万明,1989; Yin and Harrison, 2000; 姜春发,2002)。从震旦纪晚期开始,该造山带经历了强烈的俯冲增生、古近纪时期的造山运动及地层的伸展、逆冲推覆和隆升等过程(Xiao Wenjiao et al., 2002; Li Yipeng et al., 2020; 张传林等,2019,2022; Liu Xiaoqiang et al., 2020)。完整的特提斯洋演化,导致该地区产出大量岩浆活动及成矿作用。前人对该地区的超大型伟晶岩锂铍矿研究发现,稀有金属矿化有关的花岗岩与 220 ~ 210 Ma 二云母花岗岩或白云母花岗岩密切相关,后者属于高分异淡色花岗岩(Yan Qinghe et al., 2018; Zhu Mingtian et al., 2022)。

西昆仑—帕米尔造山带内三叠纪花岗岩与古特提斯洋演化密切相关。区内三叠纪花岗岩自乌孜别里山口向东经木吉—布伦口—慕士塔格延伸至大红柳滩以东,构成了长数百千米的岩带。前人对该花岗岩带的研究多集中于部分交通便利区域(如,中国—巴基斯坦国际公路沿线(Zhang Yu et al., 2016; Chen Shenqiang et al., 2021)、新藏公路沿线(Zhang Yu et al., 2016)和 Li、Be 等金属伟晶岩发育的大红柳滩地区(邹天人等,2006),而对西段木吉乡一带的花岗岩的研究仍相对薄弱。这在一定程度制约了对区内古特提斯演化过程的探讨。另外,目前在三叠纪花岗岩带西段相继发现稀有金属伟晶岩矿床(如,卡拉瓦拉(朱明田等,2022)、肖尔布龙(王核等,2022)),暗示在三叠纪岩浆岩带的西段也

注:本文为国家重点研发计划子课题(批准号:2021YFC2901904)和新疆维吾尔自治区重点研发任务(编号:2022B03015-2)的成果。
收稿日期:2024-09-24;改回日期:2024-12-12;网络首发:2024-12-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2024.12.055
作者简介:钱旭坤,男,1998 年生,硕士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业;Email:qianxukun@163.com。通讯作者:刘晓强,男,1987 年生,博士,副教授,主要从事岩浆岩与成矿的研究;Email:xiaoqliu2011@163.com。

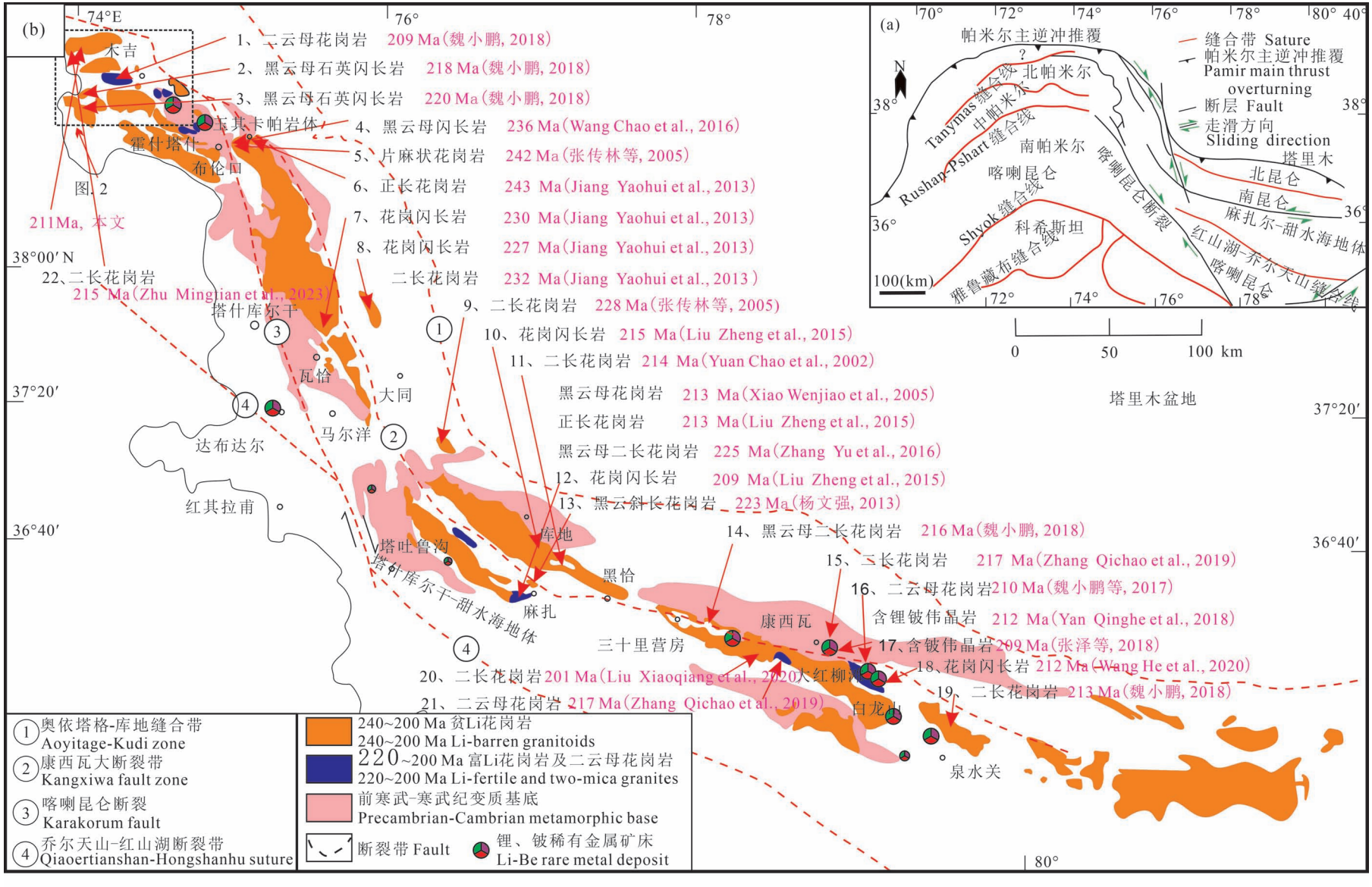

图1 青藏高原西北缘构造简图（a）（据Robinson et al., 2012修改）和西昆仑-帕米尔造山带三叠纪花岗岩及稀有金属伟晶岩分布图（b）（据Zhu Mingtian et al., 2022修改）

Fig. 1 Division of geological tectonic units in northwestern Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau (a) (after Robinson et al., 2012) and regional geological map of the West Kunlun-Pamir orogenic belt showing the position of the Triassic granitoids and associated rare metal pegmatites (b) (after Zhu Mingtian et al., 2022)

存在明显稀有金属成矿潜力。

已有资料显示,在西昆仑三叠纪岩浆岩带东段大红柳滩地区,稀有金属伟晶岩与区内三叠纪 S-型花岗岩关系密切。本次研究采用野外调查和室内研究相结合的研究方法,通过对三叠纪岩浆岩带西段阿克陶县木吉乡南西琼让 S-型二云母花岗岩样品进行岩相学、年代学、主微量元素和锆石 Hf 同位素特征的研究,在岩石成因和构造背景的研究基础上,与大红柳滩稀有金属矿区初步对比,探讨木吉地区的稀有金属成矿潜力。

1　区域地质背景与样品特征

帕米尔构造结位于青藏高原西北缘(图 1a),自南向北可分为南帕米尔、中帕米尔和北帕米尔三部分(Robinson et al., 2012)。南帕米尔位于 Rushan—Pshart 缝合线以南,其东南部以晚石炭世到白垩纪的沉积岩和火山岩为主,西南部则主要是前寒武纪变质基底岩系组成的新生代穹隆系统,并被中生代与古近纪的花岗质岩体侵入(Zanchi et al., 2000; Angiolini et al., 2013, 2015)。中帕米尔地体位于 Tanymas 缝合线与 Rushan—Pshart 缝合线之间,包括震旦纪晚期变质岩系及具有被动大陆边缘属性的古生代沉积岩(Burtman and Molnar, 1993)。北帕米尔位于 Tanymas 缝合线北侧(图 1a),主要由古生代岩浆岩、晚三叠世到早侏罗世的花岗岩以及海相沉积岩组成,其上被石灰岩、粉砂岩和砂岩覆盖(Robinson, 2015)。以 Robinson 为代表的西方学者将北帕米尔归属为三叠纪增生杂岩(如 Robinson et al., 2012)。而国内部分学者将北帕米尔归属于早古生代原特提斯洋俯冲形成的增生杂岩(Zhang Chuanlin et al., 2018)。

帕米尔高原横跨多个国家,我国境内主要是帕米尔的北东部,下称北东帕米尔。最近的年代学结果显示,北东帕米尔的重要岩石单元布伦阔勒群,为寒武纪增生杂岩,而非三叠纪增生杂岩或前寒武纪结晶基底(Zhang Chuanlin et al., 2018; Liu Xiaoqiang et al., 2023)。该群主要沿公格尔山—慕士塔格呈近 SN 向展布,其中心被中生代(215.4 ± 0.9 ~ 232.8 ± 1.5 Ma)慕士塔格岩体侵入(康磊等,2012; Jiang Yaohui et al., 2013),东部被早古生代(447.7 ± 5.2 ~ 473.4 ± 5.3 Ma)大同岩体侵入(Liao Shiyong et al., 2010)。

西昆仑—造山带广泛发育与古特提斯演化相关的早中生代侵入岩,构成一条西起北东帕米尔木吉,东至西昆仑泉水关以东的早中生代岩浆岩带(图 1b)。该岩浆岩带岩浆岩主要包括 I-型花岗岩(242.9 ± 2.6 ~ 209.9 ± 1.3 Ma)和少量 S-型花岗岩(209.7 ± 1.3 ~ 198.9 ± 1.0 Ma)。其中 I 型花岗岩普遍发育于整个早中生代岩浆岩带中,而 S 型花岗岩分布在早中生代岩浆岩的东段及西段(Liu Xiaoqiang et al., 2020,本文)。在岩浆岩带东段的大红柳滩地区发育晚三叠世 S-型花岗岩和伟晶岩,与区内大型—超大型稀有金属矿产密切相关(如王核等,2023)。伟晶岩和 S-型花岗岩关系密切,主要侵位于康西瓦岩群和三叠纪巴颜喀拉山群。大红柳滩锂辉石伟晶岩主要赋存于三叠纪巴颜喀拉山群,岩性主要包括黑云母石英片岩、二云母石英片岩、变砂岩等,该区已发现大红柳滩稀有金属矿、白龙山超大型伟晶岩型锂铍矿和雪凤岭锂矿等矿区。而北东帕米尔的木吉—布伦口稀有金属带是西昆仑成矿带最西段,区内发育数千条伟晶岩脉(Zhu Mingtian et al., 2022),部分伟晶岩发育稀有金属矿(王核等,2022)。

研究区位于北东帕米尔阿克陶县木吉乡地区(图 1b,图 2)。出露地层主要包括下古生界布伦阔勒群、志留系和泥盆系。其中,布伦阔勒群主要包括黑云母片岩,夹石英岩、大理岩和含石榴子石片岩,包括少量斜长角闪岩和变粒岩,地层走向呈近东西向,向北倾斜。志留系地层为一套浅海碎屑岩—碳酸盐相沉积组合(李荣社等,2008),普遍被三叠纪花岗岩类侵入。泥盆系主要出露于木吉东侧,由紫红色石英砂岩夹绿色灰质砂岩条带和含砾石英砂岩组成,发育大型斜层理和槽状层理。

研究区三叠纪花岗岩广泛侵入布伦阔勒群和志留系。花岗岩常以岩基或岩脉产出,岩体长轴方向为北西走向,与区域内主要断层延伸方向一致。木吉三叠纪岩浆岩主要包括石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和二云母花岗岩,并发育近万条的花岗伟晶岩脉(如朱明田等,2022)。其中闪长岩常构成复式岩体的中心相(图 2),部分呈岩浆成因的暗色微粒包体产出。花岗闪长岩常分布于闪长岩周围,与闪长岩和更外围的花岗岩构成复式岩体。二长花岗岩发育花岗质细晶岩脉。二云母花岗岩的分布非常有限,主要产于花岗闪长岩和二长花岗岩周围,或直接产于地层中。局部二云母花岗岩中存在围岩捕掳体。在布伦阔勒群中分布较多花岗质伟晶岩,主要呈 NW—SE 向延伸。花岗伟晶岩发育于三叠纪二长花岗岩、花岗闪长岩和云母花岗岩周围,长数

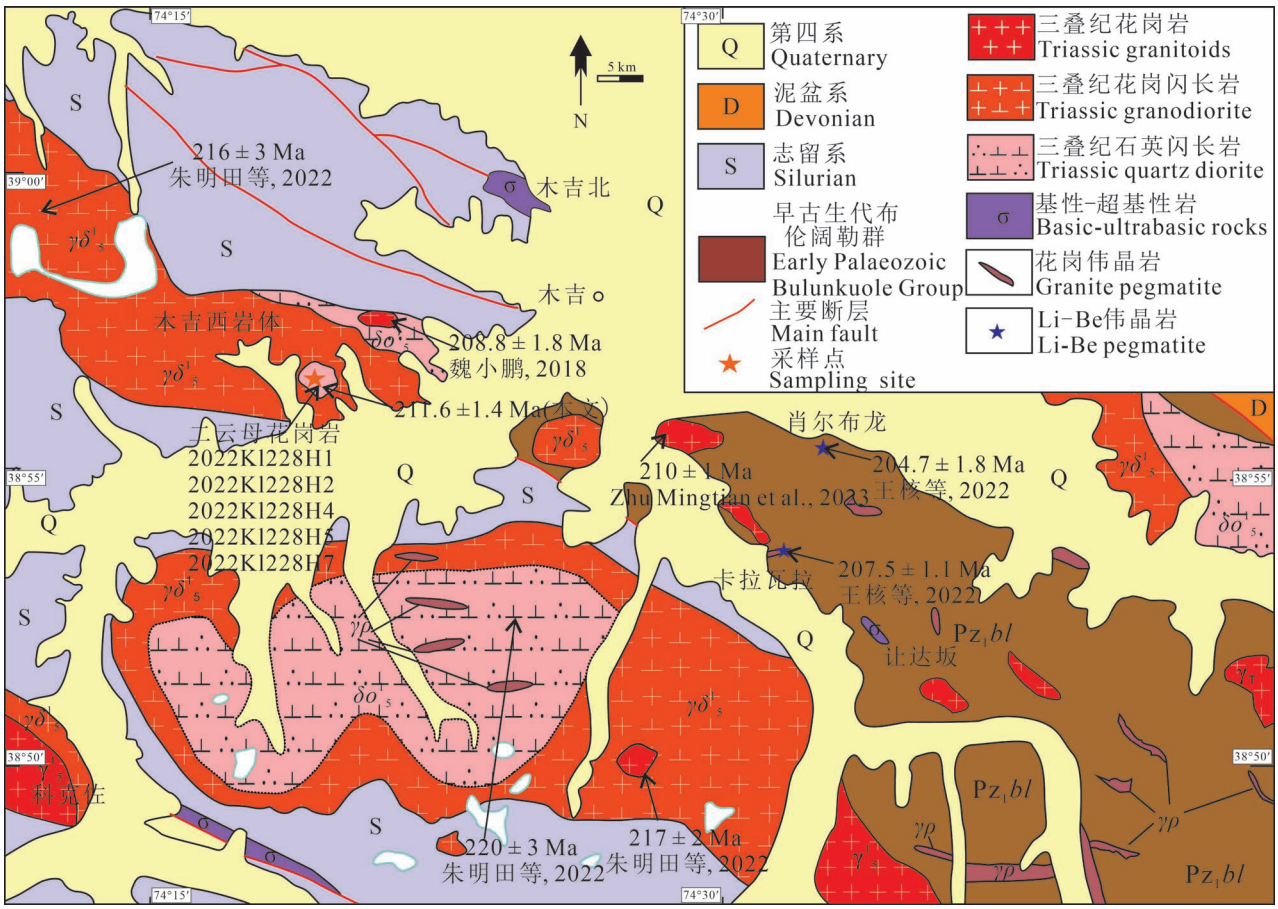

图 2 北东帕米尔木吉地质简图(据 1:250000 地质图改绘)

Fig. 2 Geological map of Muji area in NE Pamir (modified from the 1:250000 geological map)

1:250000 地质图图名为艾提开尔丁萨依,编号为 J43C002002,地质资料来源于 2003~2005 年河南省地址调查院基础地质调查中心

米—数百米。部分伟晶岩脉存在 Li 和 Be 矿化(如肖尔布龙稀有金属伟晶岩(204.7 ± 1.8 Ma, 王核等,2022)及卡拉瓦拉稀有金属伟晶岩(207.5 ± 1.1 Ma, 王核等,2022)。

本研究的二云母花岗岩样品采自木吉乡南西的琼让村一带(图 2)。二云母花岗岩手标本呈灰白色,块状构造,中—细粒结构(图 3a、b),主要矿物包括斜长石(20% ~ 25%)、碱性长石(20% ~ 30%)、石英(35% ~ 40%)、白云母(8% ~ 12%)和黑云母(7% ~ 10%),副矿物以锆石为主(图 3c,d)。斜长石呈半自形—自形长条状,晶体长 1.0 ~ 2.5 mm,发育聚片双晶和卡纳复合双晶;碱性长石主要为微斜长石,呈半自形—他形长条状,晶体长 2.0 ~ 2.5 mm,发育格子双晶;石英呈不规则粒状,粒径 1.0 ~ 2.5 mm;黑云母呈现棕色,鳞片状结构,单偏光下呈深褐色;白云母单偏光下呈无色鳞片状,与黑云母共生,干涉色达Ⅱ级黄。

2 分析方法

2.1 锆石 U-Pb 测年

在无污染环境下对岩石样品进行粉碎和淘洗处理,使用显微镜对锆石颗粒进行筛选。然后将锆石颗粒固定在环氧树脂底座并抛光以获得均匀表面。利用锆石 CL 图像对锆石内部结构进行观察并选出合适的测试点。随后在中国地质调查局天津地质矿产研究所采用 Neptune MC-ICP-MS 和 193 nm 准分子激光烧蚀系统相结合的 LA-MC-ICP-MS 对锆石进行 U-Pb 定年,测试时间为 2022 年 8 月 26 日。具体操作步骤参考耿建珍等(2011)(表 1)。

2.2 全岩主、微量元素分析

二云母花岗岩的主、微量元素在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。主量元素测试前需对样品进行熔融处理,制作玻璃熔片,熔融温度 1050 ℃、熔样时长 15min。主量元素分析测试在日本理学

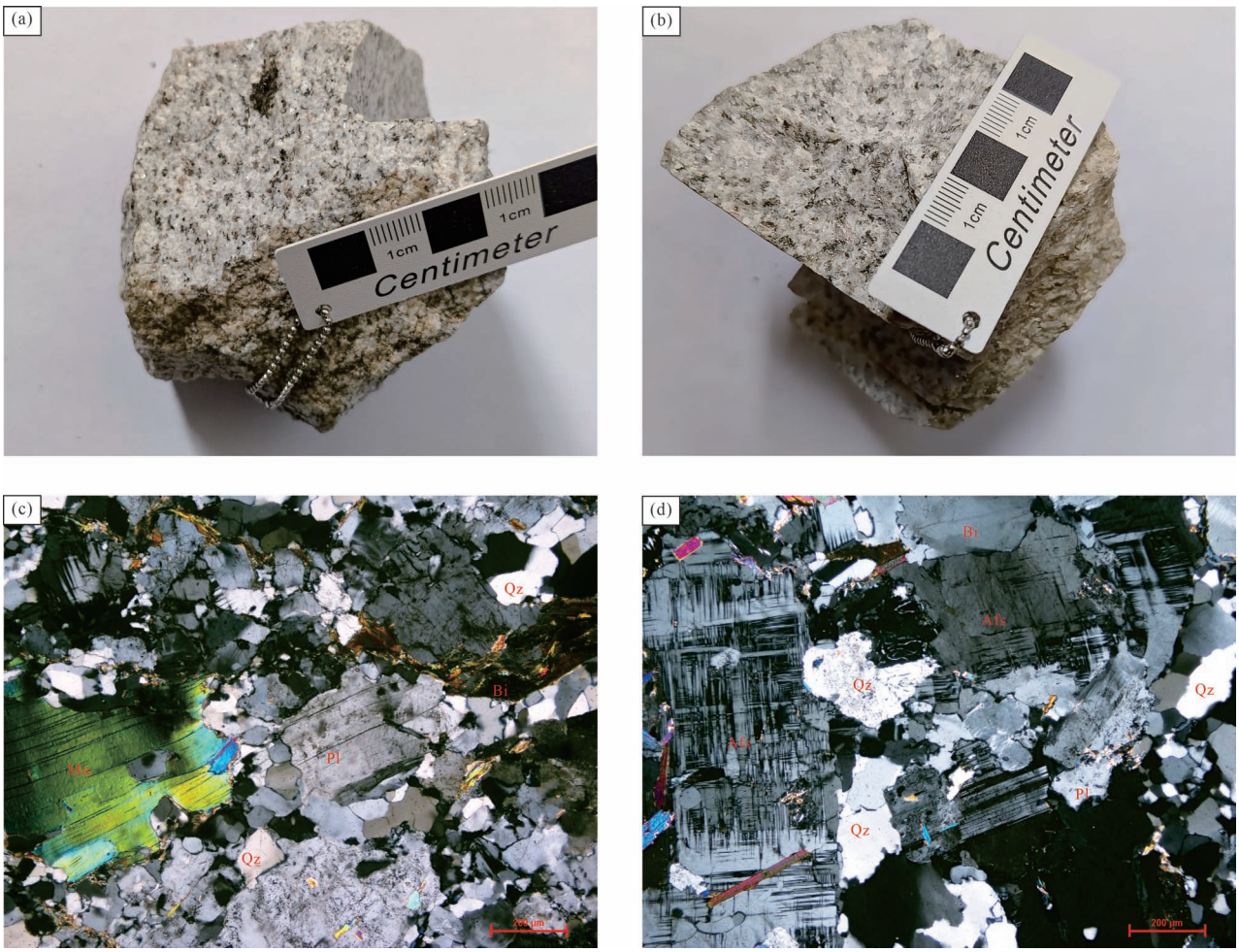

图 3 北东帕米尔木吉乡琼让二云母花岗岩手标本(a)(b)和显微照片(c)(d)

Fig. 3 Hand specimen (a) (b) and microphotographs (c) (d) of two-mica granites from the Qiongrang, NE Pamir

Pl—斜长石; Afs—碱性长石; Mu—白云母; Bi—黑云母; Qz—石英

Pl—plagioclase; Afs—alkali feldspar; Mu—muscovite; Bi—biotite; Qz—quartz

(Rigaku)生产的 ZSX Primus Ⅱ型波长色散 X-射线荧光光谱仪(XRF)上完成,数据校正采用理论 α 系数法,相对误差小于 2%,测试时间为 2022 年 11 月 11 日。全岩微量元素含量测试利用 Agilent 7700e ICP-MS 完成,具体分析步骤如下:① 对样品进行烘干并称取 50 mg 粉末;② 将 1.0 mL 高纯度 HNO_3 和 1.0 mL HF 加入粉末中,并置入溶样弹加热;③ 等溶样弹冷却后,开盖进行蒸干;④ 加入 1.0 mL HNO_3 和 1.0 mL 超纯水,再次将溶样进行加热;⑤ 加入 2% HNO_3 稀释溶液至 100 g 利用 ICP-MS 进行测试(表 2),测试时间为 2022 年 11 月 27 日。

2.3　锆石微区 Hf 同位素分析

锆石 Hf 同位素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司采用 LA-MC-ICP-MS 完成。测试使用的仪器为 Neptune Plus 型 MC-ICP-MS,激光剥蚀系统为 Geolas HD。采用单点剥蚀方式,激光束斑直径和频率分别为 44 μm 和 8 Hz,测试时间为 2023 年 6 月 23 日。具体操作步骤参考 Hu Zhaochu et al. (2012)(表 3)。

3　分析结果

3.1　测年结果

琼让二云母花岗岩的锆石颗粒自形程度较高,晶体呈短柱状或四方双锥状,整体呈无色透明。CL 图像(图 4a)显示,锆石颗粒具有明显的岩浆振荡生长环带,长度变化范围为 70~170 μm,长宽比范围为 2:1 ~ 3:1。二云母花岗岩共进行了 29 个锆石的分析(表 1)。所测点的 Th/U 变化范围为 0.01 ~ 0.77。其中,12 个测点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄明显偏

表 1 北东帕米尔木吉乡琼让二云母花岗岩的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果

Table 1 LA-MC-ICP-MS U-Pb isotopic analyses for the zircons from the Qiongrang two-mica granites in Muji Town, NE Pamir

测点号	元素含量(×10⁻⁶)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度(%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	
1	16.01	103.7	491.1	0.21	0.05180	0.00170	0.2400	0.0088	0.03360	0.00060	276.6	77.0	218.4	8.0	213.0	3.8	99
2	51.34	679.4	1516	0.45	0.05060	0.00080	0.2326	0.0043	0.03334	0.00040	222.7	37.7	212.4	3.9	211.4	2.4	100
3	50.73	98.78	384.8	0.26	0.06905	0.00110	1.2710	0.0257	0.13350	0.00180	900.3	32.3	833.0	16.9	807.9	11.0	98
4	62.70	419.5	1959	0.21	0.05044	0.00080	0.2305	0.0039	0.03314	0.00040	215.2	35.2	210.6	3.6	210.2	2.4	100
5	33.97	456.7	1030	0.44	0.05308	0.00110	0.2351	0.0053	0.03213	0.00040	332.2	47.4	214.4	4.8	203.8	2.2	97
6	75.47	110.4	1205	0.09	0.05836	0.00080	0.5328	0.0092	0.06622	0.00080	543.1	31.5	433.7	7.5	413.3	5.0	98
7	23.47	83.98	163.8	0.51	0.06661	0.00130	1.2330	0.0269	0.13430	0.00150	825.6	41.7	815.9	17.8	812.3	9.2	100
8	40.83	184.3	611.7	0.30	0.05687	0.00100	0.5224	0.0103	0.06661	0.00070	486.6	38.9	426.7	8.4	415.7	4.7	99
9	39.30	25.07	1262	0.02	0.05258	0.00090	0.2442	0.0050	0.03368	0.00050	310.9	38.2	221.9	4.5	213.5	2.9	98
10	205.8	200.6	6722	0.03	0.05047	0.00070	0.2321	0.0042	0.03335	0.00040	216.7	33.7	211.9	3.8	211.5	2.8	100
11	21.62	79.29	674.3	0.12	0.05304	0.00170	0.2436	0.0082	0.03332	0.00040	330.3	70.7	221.4	7.5	211.3	2.6	98
12	120.0	165.6	921.6	0.18	0.07056	0.00100	1.2890	0.0230	0.13250	0.00160	944.6	29.8	841.0	15.0	802.3	10.0	98
13	25.42	115.4	794.7	0.15	0.05155	0.00120	0.2378	0.0058	0.03345	0.00040	265.5	52.1	216.6	5.3	212.1	2.4	99
14	22.07	54.53	701.6	0.08	0.05240	0.00130	0.2394	0.0062	0.03314	0.00040	302.8	55.2	218.0	5.6	210.2	2.5	98
15	38.78	365.1	1207	0.30	0.05093	0.00090	0.2257	0.0043	0.03214	0.00040	237.7	39.4	206.6	3.9	203.9	2.2	99
16	14.72	87.49	113.1	0.77	0.07400	0.00250	1.1520	0.0397	0.11290	0.00120	1041	67	778.1	26.8	689.5	7.6	94
17	43.54	196.6	1377	0.14	0.05157	0.00110	0.2341	0.0065	0.03293	0.00040	266.5	50.7	213.6	6.0	208.8	2.7	99
18	163.1	389.6	1198	0.33	0.06962	0.00100	1.2820	0.0227	0.13360	0.00170	917.3	30.5	837.8	14.8	808.1	10.1	98
19	49.92	61.57	230.1	0.27	0.09968	0.00150	2.8930	0.0523	0.21050	0.00250	1618	29	1380	25	1231	15	94
20	198.0	1452	6271	0.23	0.05719	0.00100	0.2685	0.0048	0.03404	0.00060	499.0	36.7	241.5	4.3	215.8	3.7	94
21	22.16	110.3	682.6	0.16	0.05124	0.00100	0.2388	0.0052	0.03381	0.00040	251.5	47.0	217.5	4.8	214.3	2.5	99
22	35.04	133.3	237.9	0.56	0.06805	0.00120	1.2810	0.0259	0.13650	0.00170	870.0	35.7	837.1	16.9	824.8	10.3	99
23	89.44	299.4	1374	0.22	0.05816	0.00090	0.5221	0.0087	0.06511	0.00070	535.8	32.7	426.6	7.1	406.6	4.5	98
24	74.09	541.6	2238	0.24	0.05261	0.00090	0.2410	0.0047	0.03322	0.00040	311.8	37.2	219.2	4.3	210.7	2.5	98
25	36.47	127.9	547.8	0.23	0.05665	0.00110	0.5217	0.0109	0.06680	0.00090	477.7	41.5	426.3	8.9	416.9	5.4	99
26	143.39	75.32	4721	0.02	0.05039	0.00070	0.2309	0.0040	0.03323	0.00040	213.0	33.4	210.9	3.6	210.7	2.6	100
27	27.31	143.6	831.8	0.17	0.05172	0.00140	0.2389	0.0069	0.03350	0.00040	272.9	62.7	217.5	6.3	212.4	2.4	99
28	231.2	297.5	7569	0.04	0.05442	0.00080	0.2488	0.0058	0.03317	0.00060	388.3	33.0	225.6	5.2	210.3	3.7	96
29	97.43	106.5	602.6	0.18	0.07522	0.00110	1.7170	0.0284	0.16550	0.00180	1074	29	1015	17	987.5	10.9	99

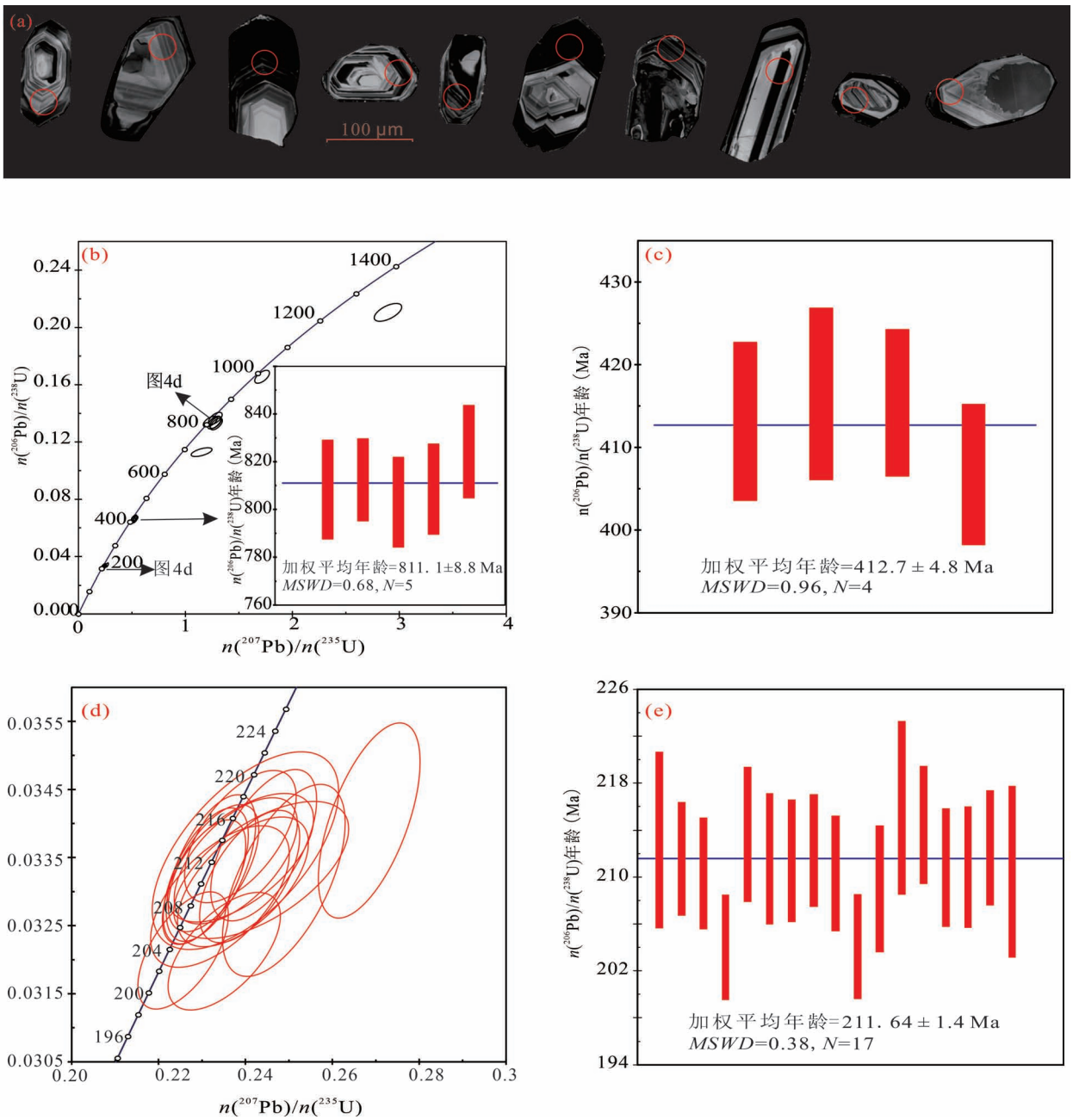

图 4 北东帕米尔木吉乡琼让二云母花岗岩的锆石 CL 图(a)和 U-Pb 同位素谐和图(b)(c)(d)(e)

Fig. 4 CL images (a) and U-Pb concordia diagrams (b) (c) (d) (e) of the zircons from the Qiongrang two-mica granites in Muji Town, NE Pamir

老,应为继承锆石或捕获锆石,不参与加权平均年龄的计算。在 12 个测点中 5 个测点的$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄变化范围为 802 ~ 820 Ma,加权平均值为 811.1 ± 8.8 Ma (MSWD = 0.68, 图 4b), 4 个测点的$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄变化范围为 407 ~ 417 Ma,加权平均值为 412.7 ± 4.8 Ma(MSWD = 0.96,图 4c),其余 3 测点的年龄分别为 690 Ma、988 Ma 和 1231 Ma。其余 17 个测点的$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄较集中,且谐和度较高。这 17 个测点的加权平均值为 211.6 ± 1.4 Ma(MSWD = 0.38,图 4e),代表了琼让二云母花岗岩的成岩年龄(晚三叠世)。

3.2　主、微量元素特征

5 件二云母花岗岩全岩的主、微量元素分析结果见表 2。扣除烧失量并重新进行均一化处理后,琼让二云母花岗岩的主微量元素特征相对一致。样品的SiO_2较高(73.24% ~ 74.09%),总体富钾

表 2 北东帕米尔木吉乡琼让二云母花岗岩的主元素(%)、微量元素($\times10^{-6}$)测试结果

Table 2 Major (%) and trace ($\times10^{-6}$) elements compositions of the Qiongrang two-mica granites in Muji Town, NE Pamir

样品名称	2022KL 228H1	2022KL 228H2	2022KL 228H4	2022KL 228H5	2022KL 228H7	样品名称	2022KL 228H1	2022KL 228H2	2022KL 228H4	2022KL 228H5	2022KL 228H7
SiO_2	72.84	72.88	73.71	72.37	72.61	Y	7.52	6.95	7.37	7.27	7.07
TiO_2	0.15	0.17	0.15	0.17	0.18	Zr	89.4	84.9	82.6	81.8	88.3
Al_2O_3	14.79	14.41	14.42	14.83	14.70	Nb	11.4	12.2	11.0	13.1	12.9
TFe_2O_3	1.10	1.20	1.12	1.28	1.22	Sn	7.56	9.09	8.54	11.1	8.20
MnO	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	Cs	7.50	13.1	14.6	15.9	7.16
MgO	0.30	0.36	0.30	0.33	0.34	Ba	290	427	292	298	308
CaO	1.21	1.23	1.15	1.13	1.15	Hf	2.93	2.60	2.57	2.69	2.68
Na_2O	3.05	2.68	2.98	2.91	2.79	Ta	1.46	1.52	1.54	1.66	1.38
K_2O	5.50	5.66	5.49	5.62	5.68	Pb	45.9	49.7	47.8	46.3	47.6
P_2O_5	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	Th	16.0	17.1	16.3	15.8	17.1
LOI	0.60	0.70	0.54	0.80	0.79	U	2.86	2.91	2.50	2.67	3.18
SUM	99.74	99.45	100.03	99.62	99.63	La	32.0	34.7	32.6	30.4	34.2
A/CNK	1.12	1.13	1.12	1.15	1.15	Ce	65.1	70.9	66.7	63.0	68.9
A/NK	1.35	1.37	1.33	1.36	1.37	Pr	6.97	7.55	7.13	6.59	7.46
Li	172	142	164	118	193	Nd	25.1	27.3	25.4	23.5	26.0
Be	3.92	6.02	6.72	6.60	4.10	Sm	5.43	5.71	5.53	5.23	5.77
Sc	1.50	1.55	1.11	1.59	1.76	Eu	0.853	0.973	0.883	0.762	0.891
V	5.38	5.92	4.80	6.18	6.79	Gd	3.75	3.96	3.71	3.43	3.80
Cr	3.32	5.35	3.66	4.68	4.25	Tb	0.445	0.445	0.453	0.431	0.463
Co	1.24	1.50	1.24	1.39	1.43	Dy	1.84	1.78	1.77	1.83	1.74
Ni	1.59	2.18	1.64	1.88	1.93	Ho	0.270	0.249	0.266	0.248	0.279
Cu	2.50	1.74	1.90	2.87	1.72	Er	0.634	0.595	0.605	0.614	0.604
Zn	41.0	46.4	39.8	41.8	46.7	Tm	0.0780	0.0696	0.0747	0.0805	0.0766
Ga	19.2	19.4	18.2	20.6	20.6	Yb	0.514	0.456	0.487	0.478	0.476
Rb	279	279	278	290	291	Lu	0.0635	0.0600	0.0631	0.0629	0.0714
Sr	107	111	105	102	104	∑REE	143	155	146	137	151

(K_2O = 5.52% ~ 5.75%, K_2O/Na_2O = 1.80 ~ 2.11)和碱(K_2O+Na_2O = 8.44%~8.63%),具较低的 MgO(0.30 ~ 0.37%)和 TiO_2(0.15 ~ 0.18%)。在 TAS 图解(图 5a)上,所有样品均落于花岗岩范围内。岩石的 Al_2O_3 变化范围为 14.50%~15.01%,具有强过铝质的地球化学特征(A/CNK = 1.12 ~ 1.15,图 5b)。另外,二云母花岗岩的 Nb/Ta (7.11 ~ 9.36)和 Zr/Hf 比值(30.35 ~ 32.91)均低于球粒陨石临界值(Nb/Ta = ~ 17.6, Zr/Hf = ~ 36.3)(Sun and McDonough, 1989)。锆石的分离结晶作用会导致残余岩浆的 Zr/Hf 比值降低,且在低温条件下,Zr 含量也要接近 100 $\times10^{-6}$ 时才能发生锆石的结晶作用。琼让二云母花岗岩的 Zr 含量较低,指示经历了锆石的分离结晶作用。琼让二云母花岗岩的稀土元素总量适中(∑REE = 136.65 $\times10^{-6}$ ~ 154.72$\times10^{-6}$)。在球粒陨石标准化稀土元素配分图上,存在明显的轻重稀土分异现象,整体呈右倾特征($(La/Yb)_N$ = 44.62 ~ 54.58,图 6a)。岩石呈明显的负 Eu 现异常(Eu/Eu^* = 0.52 ~ 0.59),可能与岩浆演化过程斜长石的晶出有关。稀土元素总体表现出“海鸥”型配分曲线(蔡磊等,2023)。在原始地幔标准化微量元素蜘蛛网图(图 6b)中,琼让二云母花岗岩富集大离子亲石元素(如,Rb、U、K)和 Th,亏损高场强元素(如,Nb、Ta、P、Ti)、Sr、Ba 和重稀土元素,显示出类似 S-型花岗岩的地球化学特征(Chappell and White, 1992)。

3.3 锆石的微区 Hf 同位素

原位锆石 Hf 同位素分析共计 20 个点,测试结果见表 3。锆石 $n(^{176}Lu)/n(^{177}Hf) < 0.002$,变化范围为 0.000023 ~ 0.001844,因此,本实验测定的 $n(^{176}Lu)/n(^{177}Hf)$代表了锆石形成的 Hf 同位素体系。12 颗锆石的 $n(^{176}Hf)/n(^{177}Hf)$ 变化较大

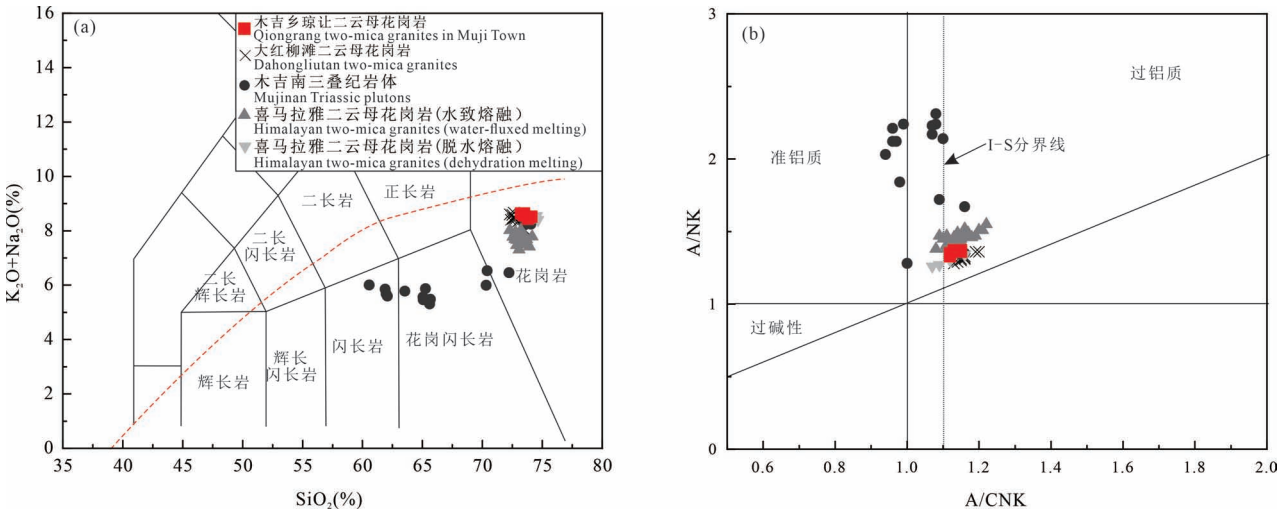

图 5 北东帕米尔木吉乡琼让二云母花岗岩的 TAS(a)(据 Rickwood, 1989)和 A/CNK—A/NK 图解(b)(据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 5 TAS (a) (after Rickwood, 1989), A/CNK—A/NK (b) (after Maniar and Piccoli, 1989) diagrams of the Qiongrang two-mica granites in Muji Town, NE Pamir

大红柳滩二云母花岗岩数据引自 Zhang Qichao et al., 2019;木吉南三叠纪岩体数据引自朱明田等,2022;水致部分熔融数据引自 Gao Li-e and Zeng Lingsen, 2014;脱水部分熔融数据引自 Gao Li-e et al., 2013

Dahongliutan two-mica granites values from Zhang Qichao et al., 2019; Mujinan Triassic plutons values from Zhu Mingtian et al., 2022; Himalayan two-mica granites (water-fluxed melting) values from Gao Li-e and Zeng Lingsen, 2014; Himalayan two-mica granites (dehydration melting) values from Gao Li-e et al., 2013

(0.281162 ~ 0.282620),其 ε_{Hf}(211.6 Ma)的变化范围为-7.63 ~ -0.91,二阶段模式年龄的变化范围为 1306 ~ 1733 Ma。5 颗锆石 $n(^{176}Hf)/n(^{177}Hf)$ 的变化范围为 0.281680 ~ 0.281914,ε_{Hf}(412.7 Ma)的变化范围为-29.9 ~ -21.6,对应的二阶段模式年龄(T_{DM2})的变化范围为 2758 ~ 3280 Ma。3 颗锆石的 $n(^{176}Hf)/n(^{177}Hf)$ 变化范围为 0.281162 ~0.281340,ε_{Hf}(811Ma)的变化范围为-39.6 ~

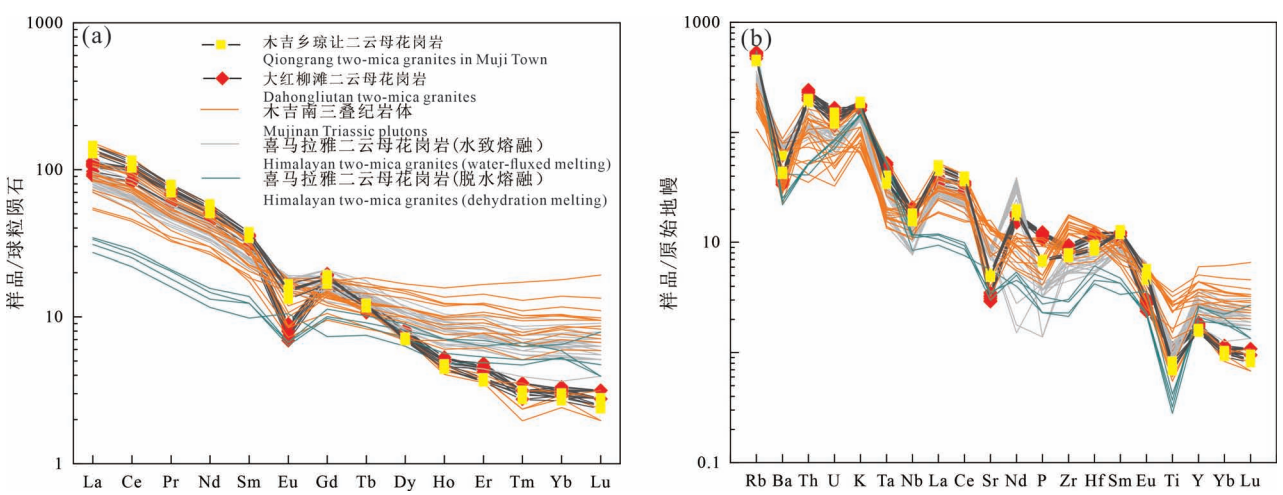

图 6 北东帕米尔木吉乡琼让二云母花岗岩稀土元素球粒陨石标准化图解(a)与原始地幔标准化微量元素蜘蛛网图(b)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and Primitive mantle-normalized trace element spidergram (b) of the Qiongrang two-mica granites in Muji Town, NE Pamir

标准化数值引自 Sun and McDonough, 1989; 数据来源同图 5

Normalization values from Sun and McDonough, 1989; data sources are the same to the fig. 5

表 3 北东帕米尔木吉乡琼让二云母花岗岩锆石 Hf 同位素分析结果图

Table 3 Zircon Hf isotopic data of the Qiongrang two-mica granites in Muji Town, NE Pamir

点号	年龄(Ma)	$\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}$		$\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}$		$\frac{n(^{176}Yb)}{n(^{177}Hf)}$		$\varepsilon_{Hf}(t)$	$\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_i$	T_{DM1}(Ma)	T_{DM2}(Ma)	$f_{Lu/Hf}$
		测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ					
1	211.6	0.282567	0.000013	0.001451	0.000008	0.051478	0.001451	−2.82	0.282561	981.0	1426	−0.96
2	412.7	0.281899	0.000016	0.001533	0.000012	0.059784	0.001533	−22.24	0.281887	1928	2800	−0.95
3	211.6	0.282620	0.000014	0.001162	0.000011	0.041253	0.001162	−0.91	0.282615	899.0	1306	−0.97
4	412.7	0.281866	0.000011	0.000145	0.000005	0.004755	0.000145	−23.01	0.281865	1904	2851	−1.00
5	811.1	0.281162	0.000014	0.000919	0.000011	0.031524	0.000919	−39.59	0.281148	2904	4163	−0.97
6	412.7	0.281680	0.000014	0.001384	0.000029	0.050169	0.001384	−29.95	0.281669	2225	3280	−0.96
7	211.6	0.282570	0.000012	0.001295	0.000026	0.044144	0.001295	−2.67	0.282565	973.0	1419	−0.96
8	211.6	0.282430	0.000012	0.001224	0.000010	0.048750	0.001224	−7.63	0.282425	1169	1733	−0.96
9	211.6	0.282613	0.000019	0.000755	0.000010	0.028193	0.000755	−1.08	0.28261	899.0	1317	−0.98
10	211.6	0.282506	0.000012	0.000484	0.000004	0.019719	0.000484	−4.83	0.282504	1041	1556	−0.99
11	412.7	0.281914	0.000011	0.001041	0.000020	0.038211	0.001041	−21.56	0.281906	1882	2758	−0.97
12	811.1	0.281254	0.000010	0.000023	0.000001	0.000944	0.000023	−35.83	0.281254	2716	3935	−1.00
13	811.1	0.281340	0.000013	0.000923	0.000019	0.032909	0.000923	−33.28	0.281326	2662	3775	−0.97
14	211.6	0.282437	0.000013	0.000955	0.000017	0.033835	0.000955	−7.34	0.282433	1150	1713	−0.97
15	412.7	0.281906	0.000012	0.000392	0.000005	0.013285	0.000392	−21.67	0.281903	1861	2765	−0.99
15	211.6	0.282514	0.000011	0.000189	0.000003	0.008079	0.000189	−4.51	0.282513	1022	1535	−0.99
17	211.6	0.282616	0.000014	0.001844	0.000096	0.065569	0.001844	−1.12	0.282609	921.0	1320	−0.94
18	211.6	0.282524	0.000014	0.000729	0.000039	0.029431	0.000729	−4.23	0.282521	1022	1516	−0.98
19	211.6	0.282570	0.000012	0.000968	0.000010	0.036864	0.000968	−2.64	0.282566	964.0	1415	−0.97
20	211.6	0.282547	0.000011	0.000861	0.000008	0.034104	0.000861	−3.42	0.282544	994.0	1467	−0.97

注:计算公式如下:

$$\varepsilon_{Hf}(t)=10000\cdot\left\{\frac{\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_S-\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_S\cdot(e^{\lambda t}-1)}{\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_{CHUR,0}-\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{CHUR}\cdot(e^{\lambda t}-1)}-1\right\};\quad T_{DM1}=\frac{1}{\lambda}\cdot\ln\left\{1+\frac{\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_S-\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_{DM}}{\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_S-\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{DM}}\right\}$$

$$T_{DM\,2CC}=T_{DM1}-(T_{DM1}-t)\cdot\frac{f_{CC}-f_S}{f_{CC}-f_{DM}};\quad f_{Lu/Hf}=\frac{\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_S}{\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{CHUR}}-1$$

其中:$\lambda(^{176}Lu)=1.865\times10^{-11}$/ a (Schere et al., 2001); $\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_S$ 和 $\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_S$ 为样品测量值; $\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{CHUR}=0.0332$, $\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_{CHUR,0}=0.282772$ (Blichert-Toft et al., 1997); $\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{DM}=0.0384$, $\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_{DM}=0.28325$ (Griffin et al., 2000); $\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{平均地壳}=0.015$; $f_{CC}=\frac{\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{平均地壳}}{\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{CHUR}}-1$; $f_S=f_{Lu/Hf}$; $f_{DM}=\frac{\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{DM}}{\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{CHUR}}-1$; t 为锆石结晶年龄。

−33.3,二阶段模式年龄(T_{DM2})的变化范围为 3775 ~ 4163 Ma。

4 讨论

4.1 岩石类型

目前,A-、I-、S-、M-型花岗岩的分类方案已得到普遍共识。不同类型的花岗岩具有不同的矿物学和地球化学特征(Whalen et al., 1987; Chappell and White, 1992)。从矿物学角度来看,I-型花岗岩的特征矿物有角闪石,而 S-型花岗岩的特征矿物为白云母、堇青石、石榴子石等富铝矿物。琼让二云母花岗岩普遍发育白云母,表明其可能为 S-型花岗岩。另

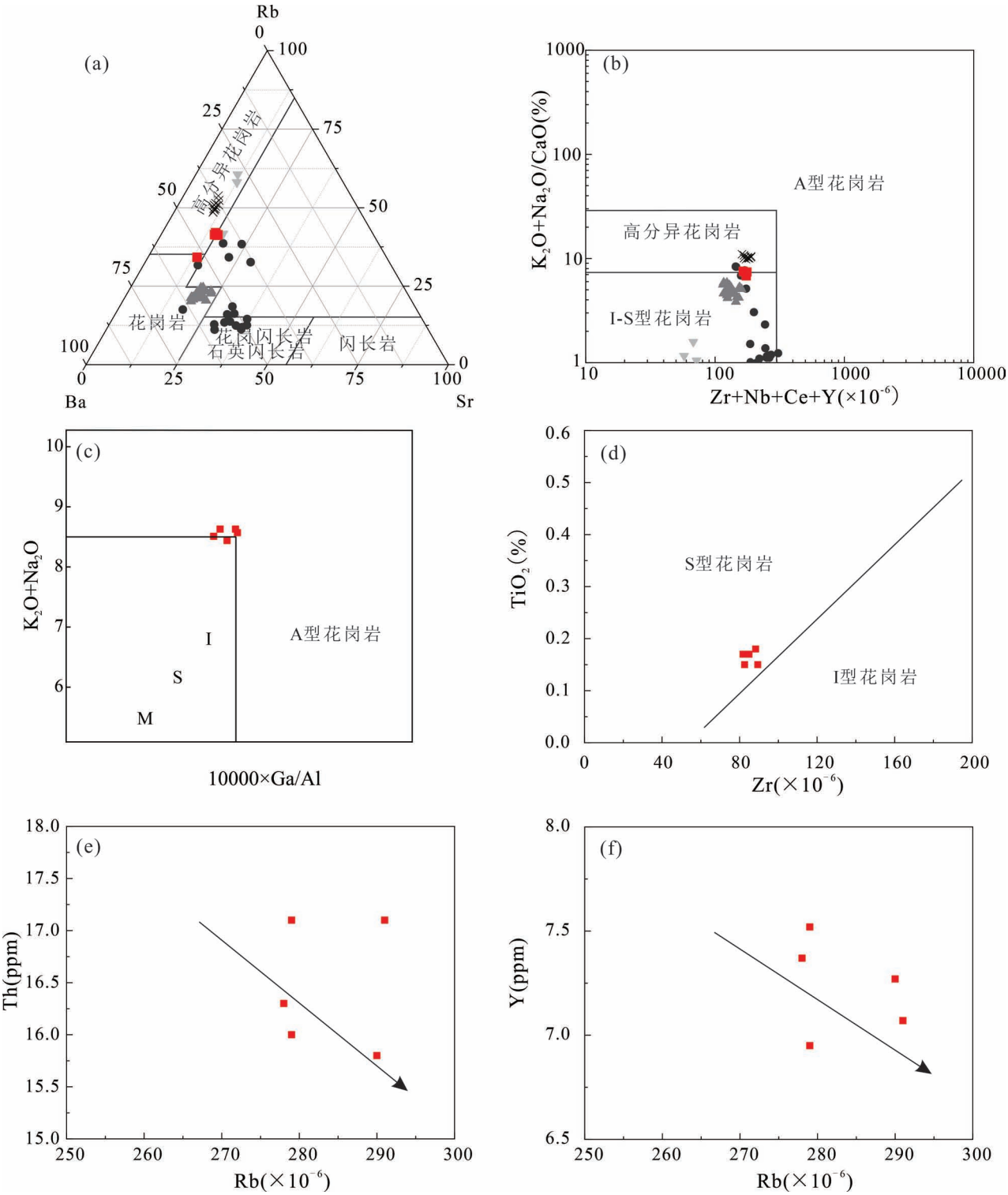

图 7 北东帕米尔木吉乡琼让二云母花岗岩类型判别图解:(a)据 Bouseily and Sokkary, 1975;(b)(c)据 Whalen et al., 1987;(d)据 Watson and Harrison, 1983;(e)(f)据 Chappell, 1999

Fig. 7 Discrimination diagrams for the genetic types of the Qiongrang two-mica granites in Muji Town, NE Pamir: (a) after Bouseily and Sokkary, 1975; (b) (c) after Whalen et al., 1987; (d) after Watson and Harrison, 1983; (e) (f) after Chappell, 1999

外,I-型花岗岩的源区主要为火成岩,常呈准铝质—弱过铝质(A/CNK<1.1),其 SiO_2 一般较低,Na_2O 较高(>3.2%);而 S-型花岗岩常呈强过铝质(A/CNK>1.1),Na_2O 含量较低(<3.2%),源区主要为沉积岩(Ghani et al., 2013)。琼让二云母花岗岩具有高 SiO_2(73.24% ~ 74.09%)、K_2O(5.52% ~ 5.75%)和 K_2O/Na_2O(1.8 ~ 2.11),且具有强过铝质的地球化学特征,符合前述的 S-型花岗岩的特征。

琼让二云母花岗岩的分异指数(DI)较高(89.73 ~ 90.45),表明岩体受到较高程度的结晶分异作用。这与 Rb—Ba—Sr 相关图解中大部分样品落于高分异花岗岩范围及样品较大的 K_2O+Na_2O/CaO,大部分投点位于高分异花岗岩边缘(图 7a、b)一致。在 $10000\times Ga/Al$—K_2O+Na_2O 相关图中样品多数投于 I- S- M- 型花岗岩范围,其余样品位于 A-型界线值边缘。但高分异 I-型花岗岩和 S-型花岗岩在该图中与典型的 A-型花岗岩重叠,也会导致些 A-型花岗岩和实际为高分异的 I-型花岗岩或者 S-型花岗岩(图 7c,邓晋福等, 2015)。因此,本研究认为,琼让二云母花岗岩应为高分异花岗岩。已有证据证明高分异 I-型花岗岩的 TFeO 一般<1.0%(舒徐洁等,2018)。琼让二云母花岗岩的 TFeO 的变化范围为 1.00% ~ 1.16%,具有过铝质的地球化学特征。CIPW 标准矿物计算得出,刚玉分子质量分数的变化范围为 1.83 ~ 2.26,指示其 S-型花岗岩的属性。这与在 Zr—TiO_2 相关图解(图 7d)所有二云母花岗岩投于 S-型花岗岩范围一致。另外,在过铝质岩浆系统中,Th 和 Y 优先进入富 Th 和 Y 的矿物(如,独居石),经分异作用的 S-型花岗岩常具有较低的 Th

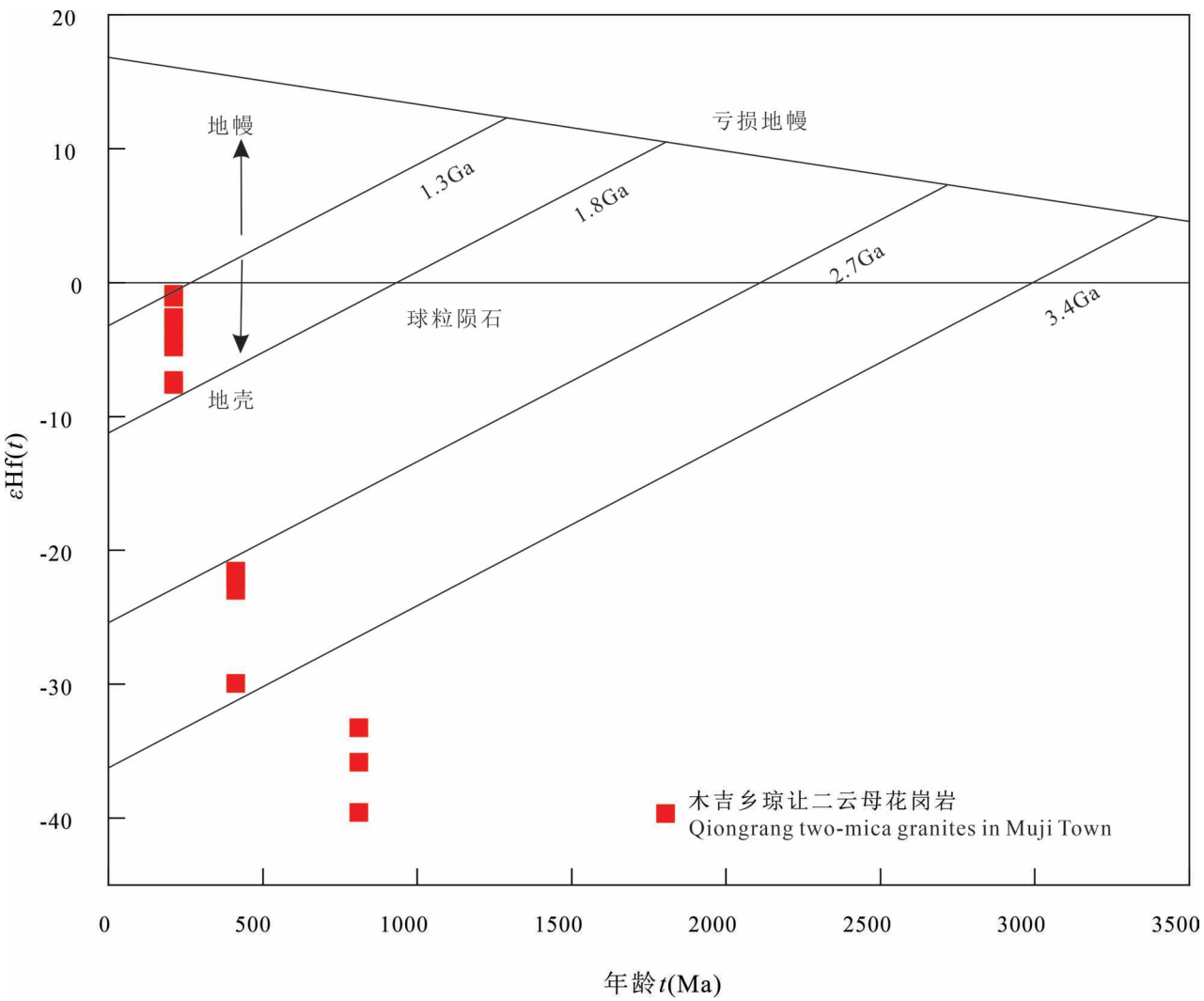

图 8 北东帕米尔木吉乡琼让二云母花岗岩的锆石 $\varepsilon Hf(t)$—年龄图解

Fig. 8 Hf isotopic composition and U-Pb ages of zircons of the Qiongrang two-mica granites in Muji Town, NE Pamir

和 Y 浓度,且伴随 Rb 的增加呈负相关。而在准过铝质岩浆系统中,富 Th 和 Y 矿物在岩浆演化早期并未结晶,导致岩浆中的 Rb 与 Th 和 Y 呈正相关。琼让二云母花岗岩的 Th 和 Y 伴随 Rb 的增加呈负相关(图 7e、f),这与典型的 I-型花岗岩的地球化学特征不符(Chappell, 1999)。

4.2　岩石成因

花岗岩中存在继承或捕获锆石反映了其岩浆源区或深部地壳组成。琼让二云母花岗岩中发育大量的继承锆石:802 ~ 820 Ma(加权平均值为 811.1 ± 8.8 Ma,图 4b)和 407 ~ 417 Ma(权平均值为 412.7 ± 4.8 Ma, 图 4c),并发育 690 Ma、988 Ma 和 1231 Ma 的锆石。锆石的 Hf 同位素方面,由于继承锆石或捕获锆石的存在,琼让二云母花岗岩表现出极大不均一性的 $\varepsilon_{Hf}(t)$。其中,三叠纪岩浆锆石的$\varepsilon_{Hf}(t)$的变化范围为-7.63 ~ -0.91,在年龄与 $\varepsilon_{Hf}(t)$的相关图解中,所有点均投入古元古代—中元古代(1.8 ~ 1.3 Ga)地壳演化线之间(图 8)。5 颗锆石的 ε_{Hf}(412.7 Ma)为-29.9 ~ -21.6,对应的二阶段模式年龄(T_{DM2})变化范围为 2758 ~ 3280 Ma。3 颗锆石的 ε_{Hf}(811 Ma)变化范围为-39.59 ~ -33.28,二阶段模式年龄(T_{DM2})的变化范围为 3775~4163 Ma。前人研究表明,西昆仑大红柳滩地区的钙碱性花岗岩的 $\varepsilon_{Hf}(t)$=-8.8 ~ -1.4,二阶段模式年龄(T_{DM2})的变化范围为 1900 ~ 2000 Ma,表明其来源于古老地壳(Zhang Qichao et al., 2019)。花岗岩类的 $\varepsilon_{Hf}(t)$范围变化表明其来源以地壳成分为主,并受少量地幔成分的影响(Zhang Qichao et al., 2019)。琼让二云母花岗岩中白云母含量较多,表明该花岗岩为含白云母过铝质花岗岩类(MPG),岩浆来源于壳源物质(魏小鹏等,2017)。锆石原位 Hf 同位素分析结果显示,代表岩浆结晶年龄的锆石测点的 $\varepsilon_{Hf}(t)$均在地壳演化线范围内,也指示琼让二云母花岗岩的成岩物质具有壳源特征。

在哈克图解(图 9)上,MgO、Na_2O、K_2O、CaO、Al_2O_3 等与 SiO_2 存在负相关趋势,指示岩浆发生了明显的分离结晶作用。琼让二云母花岗岩的 CaO 和 Al_2O_3 伴随 SiO_2 的增加而降低及 Eu 的负异常都

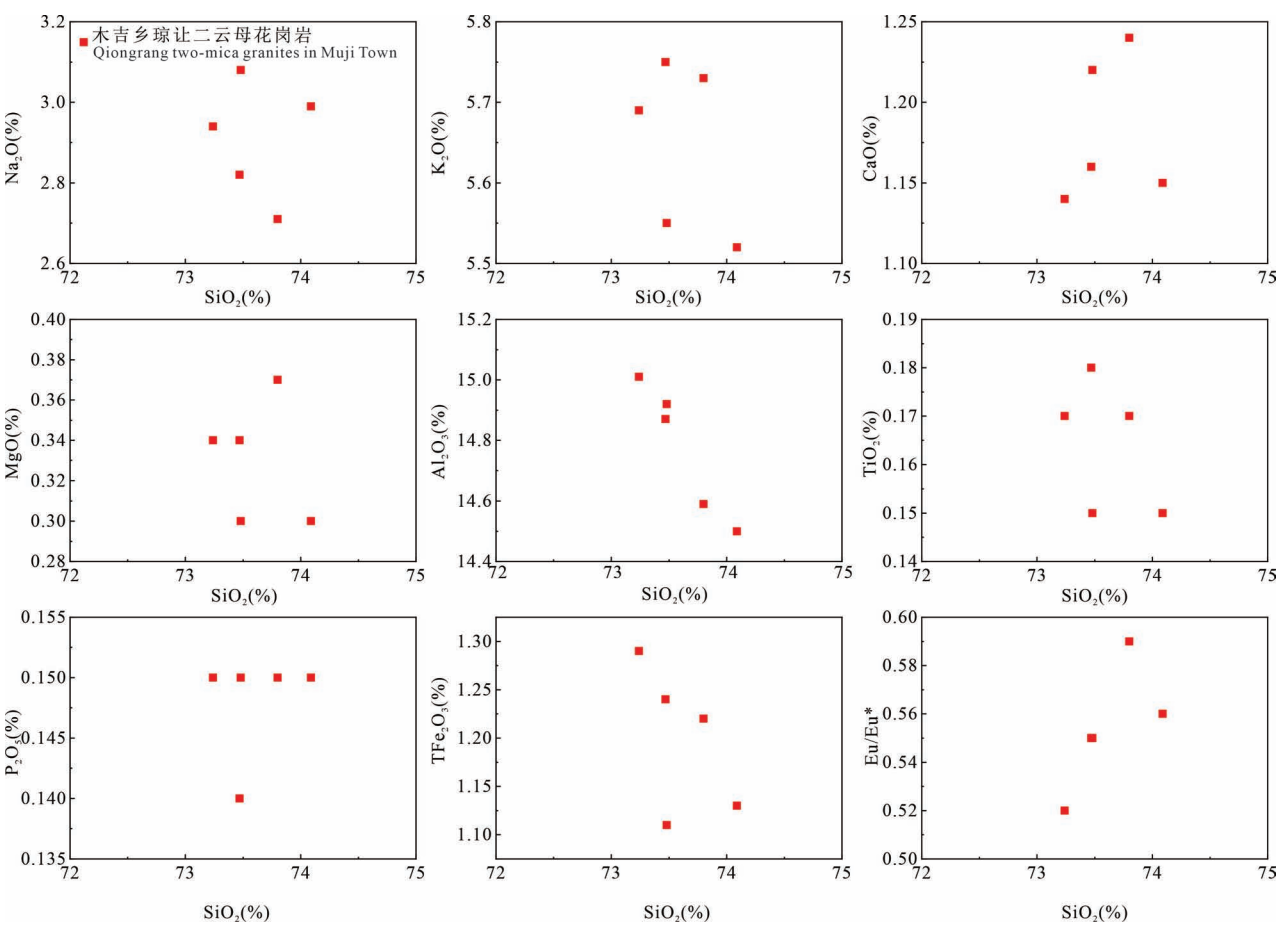

图 9 北东帕米尔木吉乡琼让二云母花岗岩的 Harker 图解

Fig. 9 Harker diagram of the Qiongrang two-mica granites in Muji Town, NE Pamir

指示了斜长石的分离结晶现象。P_2O_5 伴随 SiO_2 的增加不发生明显变化,表明磷灰石的分离结晶不显著。Ti 的强烈亏损也表明岩浆可能经历了钛铁矿和/或金红石的分离结晶作用。琼让二云母花岗岩具有明显高的 $K_2O + Na_2O/CaO$ 比值和低的 Nb/Ta 和 Zr/Hf 比值,反映出其经历过明显的结晶分异及热液出溶作用。琼让二云母花岗岩的 Zr 含量较低,可能经历了锆石的分离结晶作用。但花岗岩的分离结晶仅仅依靠哈克图解是不可靠的,由于花岗岩理论仿造玄武岩理论得出,且在镜下并未发现明显证据,因此是否发生分离结晶作用还需进一步讨论(张旗和原杰,2024)。

CaO/Na_2O 和 Rb/Sr—Ba 体系被认为可指示过铝质花岗岩的源区成分(Knesel and Davidson, 2002)。研究表明,泥质岩部分熔融形成的花岗岩的 CaO/Na_2O 比值一般低于 0.3,相反碎屑砂岩部分熔融形成的花岗岩的 CaO/Na_2O 比值一般大于 0.3(Sylvester, 1998)。琼让二云母花岗岩的 CaO/Na_2O 变化范围为 0.38 ~ 0.46,在 Al_2O_3/TiO_2—CaO/Na_2O 相关图解(图 10a)上,样品均落于泥质岩来源的熔体区。这与 Rb/Sr—Rb/Ba 相关图解上样品点落在泥质岩来源的熔体附近一致(图 10b)。因此,研究认为琼让二云母花岗岩的岩浆源区可能为富黏土的泥质岩。

伴随源区温压和含水量的变化,变沉积岩会发生低温情况的水致熔融和高温条件的含水矿物的

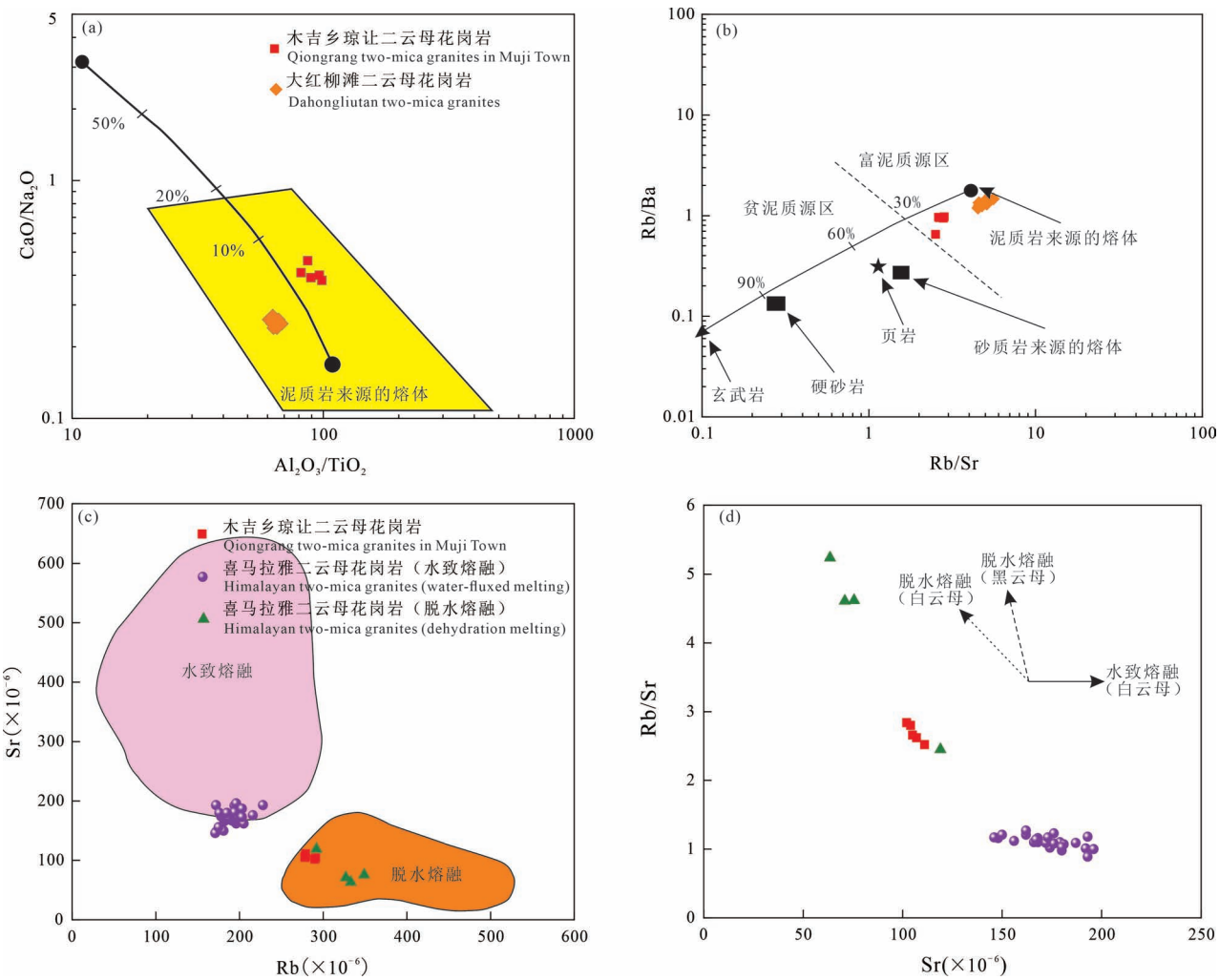

图 10 北东帕米尔木吉乡琼让二云母花岗岩的 CaO/Na_2O—Al_2O_3/TiO_2(a)(据 Sylvester, 1998);Rb/Ba—Rb/Sr(b)(据 Sylvester, 1998);Rb—Sr(c)(据 Gao Li-e et al., 2017);Sr—Rb/Sr(d)(据 Weinberg and Hasalová, 2015)相关图解

Fig. 10 CaO/Na_2O—Al_2O_3/TiO_2 (a) (after Sylvester, 1998); Rb/Ba—Rb/Sr (b) (after Sylvester, 1998); Rb—Sr (c) (after Gao Li-e et al., 2017); Sr—Rb/Sr (d) (after Weinberg and Hasalová, 2015) diagrams of the Qiongrang two-mica granites in Muji Town, NE Pamir

(如,云母)脱水熔融。由于白云母和黑云母的熔融温度不同,会出现白云母—黑云母的递进部分熔融(Knesel and Davidson, 2002; Zeng Lingsen et al., 2005, 2011)。Rb、Ba 和 Sr 可用来指示变沉积岩的部分熔融方式(Gao Li-e et al., 2017)。一般来说,Sr、Ba、Ca 等主要赋存在长石中;而 Rb 则主要存在于云母中。脱水部分熔融相对水致部分熔融将消耗较少的斜长石和较多的云母(Conrad et al., 1988),且白云母发生脱水熔融的温度较水致熔融高(707 ~ 770℃)。另外,脱水部分熔融会将残留相中的云母矿物带入熔体中并发生反应。因此,脱水熔融形成较低 Sr、Ba 和 Ca,较高 Rb 及较大 Rb/Sr 的熔体(如,喜马拉雅淡色花岗岩的脱水熔融,Gao Li-e et al., 2013)。Sr 元素的亏损暗示源区内可能有斜长石矿物的残留或结晶分离相的存在(张洪亮等,2019)。根据 CIPW 标准矿物计算,琼让二云母花岗岩的液相线温度的变化范围为 786 ~ 804℃,这一温度也和喜马拉雅淡色花岗岩的脱水熔融方式的温度条件类似。在 Rb—Sr 相关图解(图 10c)上,琼让二云母花岗岩和脱水部分熔融的喜马拉雅淡色花岗岩均落于同一区域。在 Sr—Rb/Sr 相关图解(图 10d)上,琼让二云母花岗岩表现出和喜马拉雅脱水熔融成因二云母花岗岩一致的趋势,也表明琼让二云母花岗岩主要受控于变沉积岩白云母脱水熔融作用。

综上所述,琼让二云母花岗岩为典型 S-型花岗岩,其形成于相对高温条件下变泥质岩源区云母矿物的脱水熔融,岩浆固结之前经历了斜长石和锆石等矿物的分离结晶作用。

4.3　构造意义及成矿潜力

西昆仑—帕米尔造山带广泛发育的三叠纪岩浆岩,西起乌孜别里山口,东经木吉、布伦口、麻扎,延伸经三十里营房、康西瓦和大红柳滩,到达奇台达坂

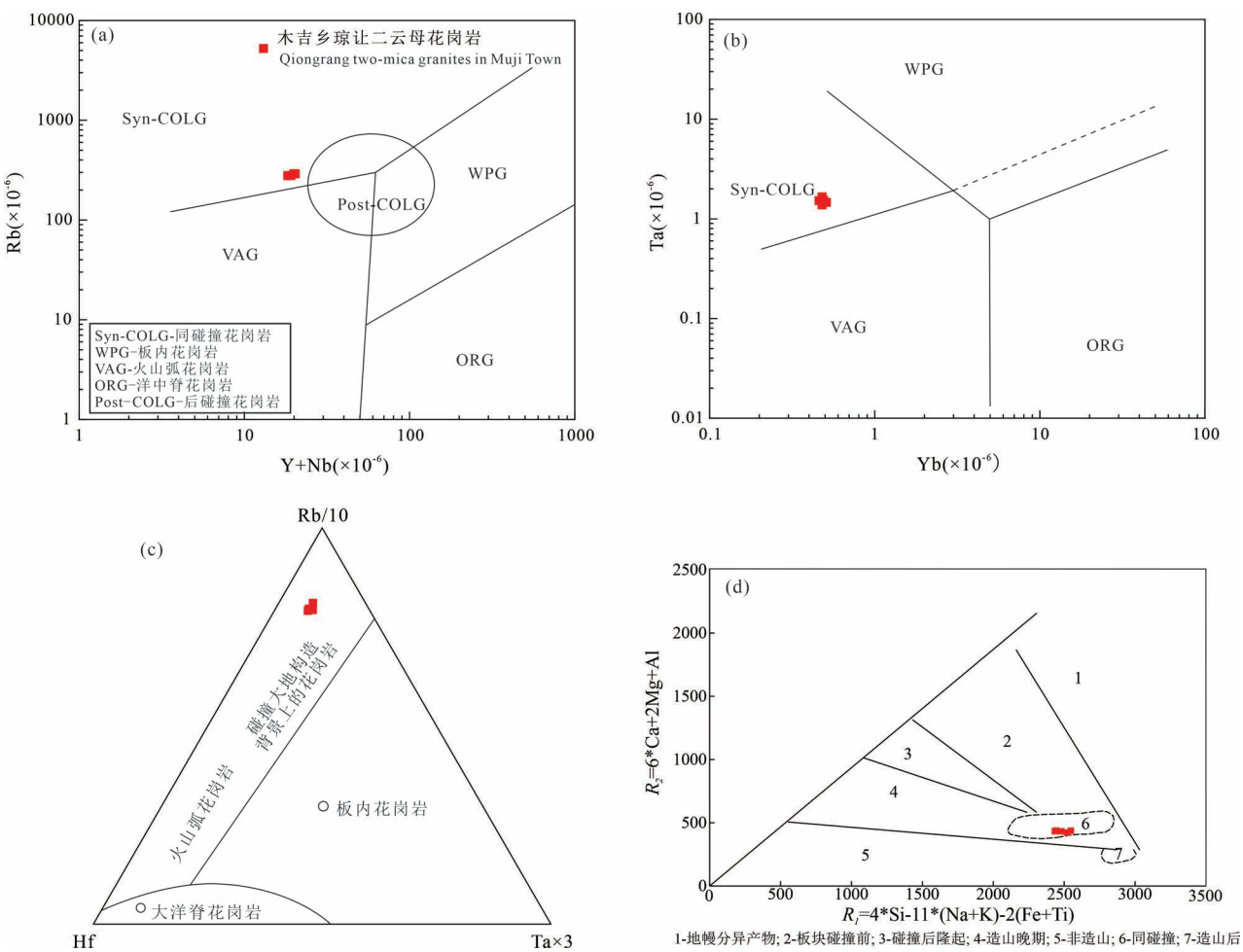

图 11 北东帕米尔木吉乡琼让二云母花岗岩的构造环境判别图解:(a)(b)(c)据 Pearce et al., 1984;(d)据 Batchelor and Bowden, 1985

Fig. 11 Identification map of the tectonic environment of the Qiongrang two-mica granites in Muji Town, NE Pamir: (a) (b) (c) after Pearce et al., 1984; (d) after Batchelor and Bowden, 1985

东部,绵延数百千米的岩浆岩带。这些岩浆岩以I-型花岗岩为主(242.9 ± 2.6 ~ 209.9 ± 1.3 Ma),少量为 S-型花岗岩(209.7 ± 1.3 ~ 198.9 ± 1.0 Ma)。其中,I-型花岗岩发育于整个岩浆岩带,而 S-型花岗岩集中分布于岩浆岩带的东、西段(Liu Xiaoqiang et al., 2020)。在构造环境判别图(图11a、b)上,琼让二云母花岗岩均投在同碰撞花岗岩区域。另外,在 Hf—Ta×3—Rb/10 三角图解和 R_1—R_2 相关图解中也显示其形成于同碰撞阶段。因此,我们认为琼让二云母花岗岩应形成于古特提斯洋闭合过程的同碰撞环境。

有学者提出,西昆仑造山带上稀有金属的成矿和三叠纪晚期强过铝质的 S-型花岗岩存在联系(乔耿彪等,2015;魏小鹏等,2017;Wang He et al.,2020)。研究表明,稳定的构造环境有利于稀有金属的富集,从而促进成矿作用。世界大型含锂辉石伟晶岩可能出现在长期活动的深断裂边缘的构造背景,或出现在剪切和拉伸位错存在的碰撞后区域。Wang Tao 等(2007)认为,阿尔泰地区的大型稀有金属矿化伟晶岩主要侵位于后碰撞环境。Zagorsky 等(2014)认为,中亚断褶带的大型含锂辉石伟晶岩的形成与岩石圈伸展有关。Li、Be 等稀有金属在白云

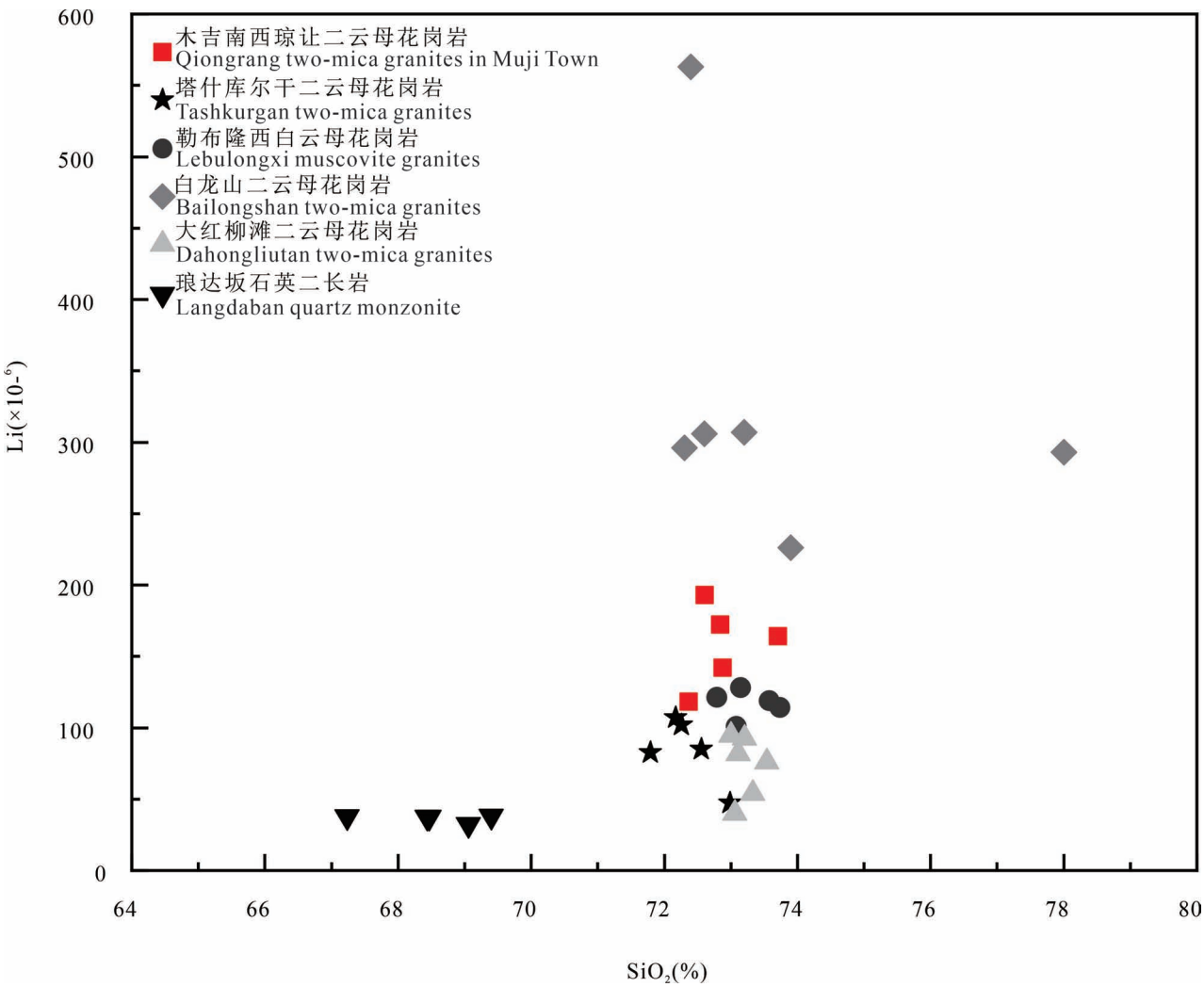

图 12 北东帕米尔木吉乡琼让二云母花岗岩 Li—SiO_2 相关图解

Fig. 12 Li—SiO_2 plots of the Qiongrang two-mica granites in Muji Town, NE Pamir

塔什库尔干二云母花岗岩数据引自马鑫等,2022;勒布隆西白云母花岗岩数据引自 Zhu Mingtian et al., 2022;白龙山二云母花岗岩数据引自王振宏等,2024;大红柳滩二云母花岗岩数据引自庹明洁等,2024;琅达坂石英二长岩数据引自刘铮等,2024

Tashkurgan two-mica granitesvalues from Ma Xin et al., 2022; Lebulongxi muscovite granites values from Zhu Mingtian et al., 2022; Bailongshan two-mica granites values from Wang Zhenhong et al., 2024; Dahongliutan two-mica granites values from Tuo Mingjie et al., 2024; Langdaban quartz monzonite values from Liu Zheng et al., 2024

母花岗岩中更富集,这一特征与西昆仑三叠纪岩浆岩带东段的大红柳滩锂铍伟晶岩矿集区的 S-型花岗岩一致,两者具有类似的形成时间和成矿条件。

西昆仑稀有金属伟晶岩矿床普遍与富含白云母的过铝质花岗岩在时空上有密切联系(Yan Qinghe et al., 2022)。富含白云母的花岗岩和印度—亚洲碰撞后产出在青藏高原南部喜马拉雅地区的新生代淡色花岗岩具有类似的矿物学和地球化学特征(朱明田等,2022; Yan Qinghe et al., 2022)。木吉—布伦口稀有金属矿化远景区已经发现大面积和铍、锂、铌钽等稀有金属矿化有关的异常,这些异常范围较广且分带清晰,因此该带具有良好的找矿前景。将木吉南西琼让二云母花岗岩与西昆仑地区典型 S 型花岗岩进行对比,可以发现木吉南西琼让二云母花岗岩富集 Li 这一碱金属元素,且西昆仑含白云母矿物的花岗岩均具有较高的 Li 含量。因白龙山二云母花岗岩形成区域位于白龙山大型锂矿区附近,因此 Li 含量相比其他含白云母花岗岩较高,木吉南西琼让二云母花岗岩 Li 含量较其他典型含白云母花岗岩相近或偏高(图 12)。这一结果也说明含白云母的花岗岩在多地被认为是稀有金属伟晶岩的母岩体。当 SiO_2 含量为 72%~74%时,Li 含量有明显的上升,很可能表明气相的出溶与逃逸促进了碱金属的富集作用,且富挥发分流体可以使 Be 含量富集 1000 多倍(Thomas et al., 2011)。琼让二云母花岗岩明显的 P 异常可能代表其发生过强烈的挥发分的聚集及出溶,因此导致其 Li、Be 含量较高,熔体不断出溶的挥发分可以促进伟晶岩的流体出溶,提高碱金属的萃取水平,使伟晶岩流体中 Li、Be 含量不断富集。木吉地区所处的西昆仑稀有金属成矿带因为古特提斯洋的北向俯冲会出现大面积的断裂缝隙。因为流体的不断扩散,会使其沿着裂隙进行远距离迁移,同时对围岩进行碱金属的萃取。因此我们认为木吉南西琼让二云母花岗岩具有强过铝质、高分异及富 H_2O 等挥发分的地球化学特征可以促进碱金属元素的强烈富集,预测该区域二云母花岗岩岩体具有分异出伟晶岩的潜力。

5　结论

(1)北东帕米尔阿克陶县木吉南西琼让二云母花岗岩的 U-Pb 成岩年龄为(211.6 ± 1.4)Ma,形成于晚三叠世。

(2)木吉南西琼让二云母花岗岩为 S-型花岗岩,其形成于以变泥质岩为主的云母脱水熔融的岩浆源区,在上升过程经历了强烈的结晶分异作用。木吉南西琼让二云母花岗岩形成于同碰撞的构造背景。

(3)木吉南西琼让二云母花岗岩的 Li 和 Be 较高,其形成时间、构造环境和西昆仑东段大红柳滩稀有金属伟晶岩矿集区一致,指示北东帕米尔木吉地区也具有稀有金属的找矿潜力。

致谢:审稿专家审阅文稿并提出了宝贵意见,使本文内容和结构等更加合理、充实,在此向他们致以衷心的感谢。

参　考　文　献　/　References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

蔡磊, 霍艳, 丁枫, 费光春,范宇航,田京京,邹婧,张鹏浩. 2023. 特提斯喜马拉雅东部早白垩世双峰式火山岩地球化学特征及地质意义. 矿物岩石,43 (1):42 ~ 60.

邓晋福,刘翠,冯艳芳,肖庆辉,狄永军,苏尚国,赵国春,段培新,戴蒙. 2015. 关于火成岩常用图解的正确使用:讨论与建议. 地质论评,61 (4):717 ~ 734.

邓万明. 1989. 喀喇昆仑—西昆仑地区基性—超基性岩初步考察. 自然资源学报,4 (3):204 ~ 211.

耿建珍,李怀坤,张健,周红英,李惠民. 2011. 锆石 Hf 同位素组成 LA-MC-ICP-MS 测定. 地质通报,30 (10):1508 ~ 1513.

姜春发. 2002. 中央造山带几个重要地质问题及其研究进展. 地质通报,21(8~9):453 ~ 455.

康磊,校培喜,高晓峰,董增产,过磊,奚仁刚. 2012. 西昆仑慕士塔格岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年: 对古特提斯碰撞时限的制约. 地质论评,58 (4):763 ~ 774.

李荣社,计文化,杨永成. 2008. 昆仑山及邻区地质. 北京:地质出版社:75 ~ 77.

刘铮,闫庆贺,王核,高昊,刘好. 2024. 西昆仑稀有金属成矿带成矿大地构造背景:来自琅达板岩体的地球化学制约. 地球化学,1 ~ 13.

马鑫,但卫,王强,杨亚楠,唐国荣,唐功建. 2022. 中帕米尔塔什库尔干早白垩世二云母花岗岩与中—基性包体的岩石成因及其地质意义. 大地构造与成矿学,46 (2):380 ~ 397.

乔耿彪,张汉德,伍跃中,金谋顺,杜玮,赵晓健,陈登辉. 2015. 西昆仑大红柳滩岩体地质和地球化学特征及对岩石成因的制约. 地质学报,89 (7):1180 ~ 1194.

舒徐洁,陈志洪,朱延辉,廖圣兵,周博文,李功振,赵旭辰,刘爽,陈雷超. 2018. 赣南兴国东固高分异花岗岩成因及地质意义. 地质论评,64 (1):108 ~ 126.

庹明洁,夏永旗,李诺,加娜提古丽·吾斯曼,于杰,祁冬梅,李婷,邰宗尧. 2024. 西昆仑大红柳滩地区花岗岩类侵位时代与成因. 矿床地质,43 (2):265 ~ 288.

王核,高昊,王赛蒙,闫庆贺,王振宏,黄亮,秦艳. 2022. 新疆西昆仑木吉地区锂铍稀有金属伟晶岩锆石及铌钽铁矿 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义. 岩石学报,38 (7):1937 ~ 1951.

王核,黄亮,马华东,李永,王威,肖飞,白洪阳,王堃宇. 2023. 西昆仑大红柳滩—白龙山矿集区锂矿成矿特征与成矿规律初探. 岩石学报,39 (7):1931 ~ 1949.

王振宏,王核,白洪阳,黄亮,王堃宇,刘金恒. 2024. 西昆仑克里雅

地区晚三叠世 S 型花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学、Hf—Nd 同位素特征及其地质意义. 岩石学报,40 (8):2415 ~ 2428.
魏小鹏,王核,胡军,慕生禄,丘增旺,闫庆贺,李沛. 2017. 西昆仑大红柳滩二云母花岗岩地球化学和地质年代学研究及其地质意义. 地球化学,46 (1):66~80.
张传林,马华东,刘晓强. 2022. 帕米尔构造结结构特征与构造演化. 地质论评,68 (5):1653 ~ 1673.
张传林,马华东,朱炳玉,叶现韬,邱林,赵海香,刘晓强,丁腾,王倩,郝晓姝. 2019. 西昆仑—喀喇昆仑造山带构造演化及其成矿效应. 地质论评,65 (5):1077 ~ 1102.
张洪亮,杨文光,朱利东,卢志友,苏鑫,李成志. 2019. 南拉萨地块高分异 S 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义. 矿物岩石,39 (1):52 ~ 62.
张旗,原杰. 2024. 地球化学研究的危机与机遇. 地质论评,70 (5):1907 ~ 1926.
朱明田,董志国,张连昌. 2022. 西昆仑北段木吉地区三叠纪岩体与稀有金属伟晶岩的关系探讨. 岩石学报,38 (7):2003~2016.
邹天人,李庆昌. 2006. 中国新疆稀有及稀土金属矿床. 北京:地质出版社:93 ~ 96.
Angiolini L, Zanchi A, Zanchetta S, Nicora A, Vuolo I, Berra F, Henderson C, Malaspina N, Rettori R, Vachard D, Vezzoli G. 2015. From rift to drift in South Pamir (Tajikistan): Permian evolution of a Cimmerian terrane. Journal of Asian Earth Sciences, 102: 146 ~ 169.
Angiolini Lucia, Zanchi Andrea, Zanchetta Stefano, Nicora Alda, Vezzoli Giovanni. 2013. The Cimmerian geopuzzle: new data from South Pamir. Terra Nova, 25 (5): 352 ~ 360.
Batchelor R A, Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. Chemical geology, 48(1~4): 43 ~ 55.
Burtman V S, Molnar P. 1993. Geological and geophysical evidence for deep subduction of continental crust beneath the Pamir. Geological society of America, special paper, 281: 1 ~ 76 .
Cai Lei, Huo Yan, Ding Feng, Fei Guangchun, Fan Yuhang, Tian Jingjing, Zou Jin, Zhang Penghao. 2023&. Geochemical Characteristics and Geological Significance of Early Creataceous Bimodal Volcanic Rocks in Eastern Tethyan Himalaya. Mineralogy and Petrology, 43 (1): 42 ~ 60.
Chappell B W, White A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 83 (1~2): 1 ~ 26.
Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. Lithos, 46 (3): 535 ~ 551.
Chen Shenqiang, Chen Hanlin, Zhu Kongyang, Tao Yuan. 2021. Petrogenesis of the Middle – Late Triassic S- and I-type granitoids in the eastern Pamir and implications for the Tanymas – Jinshajiang Paleo-Tethys Ocean. International Journal of Earth Sciences, 110: 1213 ~ 1232.
Conrad W K, Nicholls I A, Wall V J. 1988. Water-saturated and undersaturated melting of metaluminous and peraluminous crustal compositions at 10 kb: evidence for the origin of silicic magmas in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand, and other occurrences. Journal of Petrology, 29 (4): 765 ~ 803.
Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, Xiao Qinghui, Di Yongjun, Su Shangguo, Zhao Guochun, Duan Peixin, Dai Meng. 2015&. On the Correct Application in the Common Igneous Petrological Diagrams: Discussion and Suggestion. Geological Review, 61 (4): 717 ~ 734.
Deng Wanming. 1989&. A Preliminary Study on the Basic—Ultrabasic Rocks of the Karakoram—Western Kunlun Mts . Journal of Natural Resources, 4 (3): 204 ~ 211.
El Bouseily A M, El Sokkary A A. 1975. The relation between Rb, Ba and Sr in granitic rocks. Chemical Geology, 16 (3): 207 ~ 219.
Gao Li – e, Zeng Lingsen, Asimow Paul D. 2017. Contrasting geochemical signatures of fluid-absent versus fluid-fluxed melting of muscovite in metasedimentary sources: The Himalayan leucogranites. Geology, 45 (1): 39 ~ 42.
Gao Li-e, Zeng Lingsen, Hou Kejun, Guo Chunli, Tang Suohan, Xie Kejia, Hu Guyuem, Wang Li. 2013. Episodic crustal anatexis and the formation of Paiku composite leucogranitic pluton in the Malashan Gneiss Dome, Southern Tibet. Chinese Science Bulletin, 58: 3546 ~ 3563.
Gao Li-e, Zeng Lingsen. 2014. Fluxed melting of metapelite and the formation of Miocene high-CaO two-mica granites in the Malashan gneiss dome, southern Tibet. Geochimica et Cosmochimica Acta, 130: 136 ~ 155.
Geng Jianzhen, Li Huaikun, Zhang Jian, Zhou Hongying, Li Huimin. 2011&. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-MC-ICP-MS. Geological Bulletin of China, 30 (10): 1508 ~ 1513.
Ghani Azman A, Searle Michael, Robb Laurence, Chung Sunlin. 2013. Transitional IS type characteristic in the main range granite, Peninsular Malaysia. Journal of Asian Earth Sciences, 76: 225 ~ 240.
Hu Zhaochu, Liu Yongsheng, Gao Shan, Liu Wengui, Zhang Wen, Tong Xirun, Lin Lin, Zong Keqing, Li Ming, Chen Haihong, Zhou Lian, Yang Lu. 2012. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 27 (9): 1391 ~ 1399.
Jiang Yaohui, Jia Ruya, Liu Zheng, Liao Shiyong, Zhao Peng, Zhou Qing. 2013. Origin of Middle Triassic high-K calc-alkaline granitoids and their potassic microgranular enclaves from the western Kunlun orogen, northwest China: A record of the closure of Paleo-Tethys. Lithos, 156: 13 ~ 30.
Jiang Chunfa. 2002&. Several important Geological problems in the Central Orogenic Belt and their research progress. Geological Bulletin of China, 21 (8~9): 453 ~ 455.
Kang Lei, Xiao Peixi, Gao Xiaofeng, Dong Zengchan, Guo Lei, Xi Rengang. 2012&. LA-ICP-MS U-Pb Dating of the Zircon from Muztagata Pluton in Western Kunlun Orogenic Belt: Constraints on the Time of Paleotethys' Collision. Geological Review, 58 (4): 763 ~ 774.
Knesel K M, Davidson J P. 2002. Insights into collisional magmatism from isotopic fingerprints of melting reactions. Science, 296 (5576): 2206 ~ 2208.
Li Rongshe, Ji Wenhua, Yang Yongcheng. 2008#. Geology of Kunlun Mountains and Adjacent Areas. Beijing: Geological Publishing House: 75 ~ 77.
Li Yipeng, Robinson Alexander C, Lapen Thomas J, Righter Minako, K Michael. 2020. Muztaghata dome Miocene eclogite facies metamorphism: A record of lower crustal evolution of the NE Pamir. Tectonics, 39 (7): e2019TC005917.
Liao Shiyong, Jiang Yaohui, Jiang Shaoyong, Yang Wanzhi, Zhou Qing, Jin Guodong, Zhao Peng. 2010. Subducting sediment-derived arc

granitoids: evidence from the Datong pluton and its quenched enclaves in the western Kunlun orogen, northwest China. Mineralogy and Petrology, 100: 55 ~ 74.

Liu Xiaoqiang, Zhang Chuanlin, Zou Haibo, Wang Qian, Hao Xiaoshu, Zhao Haixiang, Ye Xiantao. 2020. Triassic—Jurassic granitoids and pegmatites from western Kunlun—Pamir syntax: Implications for the paleo-tethys evolution at the northern margin of the Tibetan plateau. Lithosphere, 2020 (1).

Liu Xiaoqiang, Zhang Chuanlin, Zou Haibo, Ye Xiantao. 2023. Diverse metavolcanic sequences in the Cambrian accretionary complex at the Pamir Syntax: Implications for tectonic evolution from Proto-Tethys to Paleo-Tethys. Journal of Asian Earth Sciences, 241: 105481.

Liu Zheng, Yan Qinghe, Wang He, Gao Hao, Liu Hao. 2024&. Tectonic setting of the rare metal belt in the Western Kunlun Orgenic Belt: Geochemical constraint from the Langdaban intrusion. Geochimica, 1 ~ 13.

Ma Xin, Dan Wei, Wang Qiang, Yang Yanan, Tang Guorong, Tang Gongjian. 2022&. Petrogenesis of the Taxkorgan Early Cretaceous Two-mica Granites and Medium—mafic Magmatic Enclaves in the Central Pamir and Their Geological Significance. Geotectonica et Metallogenia, 46 (2): 380 ~ 397.

Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. Geological Society of America Bulletin, 101 (5): 635 ~ 643.

Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 25 (4): 956 ~ 983.

Qiao Gengbiao, Zhang Hande, Wu Yuezhong, Jin Moushun, Du Wei, Zhao Xiaojian, Chen Denghui. 2015&. Petrogenesis of the Dahongliutan Monzogranite in Western Kunlun: Constraints from SHRIMP Zircon U-Pb Geochronology and Geochemical Characteristics. Acta Geologica Sinica, 89 (7): 1180 ~ 1194.

Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. Lithos, 22(4): 247 ~ 263.

Robinson A C. 2015. Mesozoic tectonics of the Gondwanan terranes of the Pamir plateau. Journal of Asian Earth Sciences, 102: 170 ~ 179.

Robinson Alexander C, Ducea Mihai, Lapen Thomas J. 2012. Detrital zirconand isotopic constraints on the crustal architecture and tectonic evolution of the northeastern Pamir. Tectonics, 31 (2): 1 ~ 16.

Shu Xujie, Chen Zhihong, Zhu Yanhui, Liao Shengbing, Zhou Bowen, Li Gongzhen, Zhao Xuchen, Liu Shuang, Chen Leichao. 2018&. Genesis of Donggu Highly Fractionated Granites, Xingguo, Southern Jiangxi, and Its Geological Significance. Geological Review, 64 (1): 108 ~ 126.

Sun Shen-su, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle compositions and process en Saunders AD Norry, MJ (eds), Magmatism in the ocean basins. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313 ~ 345.

Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. Lithos, 45 (1~4): 29 ~ 44.

Tuo Mingjie, Xia Yongqi, Li Nuo, Jianatiguli · Wusiman, Yu Jie, Qi Dongmei, Li Ting, Tai Zongyao. 2024&. Age and petrogenesis of granitoids in Dahongliutan area, West Kunlun. Mineral Deposits, 43 (2): 265 ~ 288.

Thomas, R, Webster, J D, Davidson P. 2011. Be-daughter minerals in fluid and melt inclusions: implications for the enrichment of Be in granite – pegmatite systems. Contributions to Mineralogy and Petrology, 161: 483 ~ 495.

Wang He, Gao Hao, Wang Saimeng, Yan Qinghe, Wang Zhenhong, Huang Liang, Qin Yan. 2022&. Zircon and columbite—tantalite U-Pb geochronology of Li—Be rare metal pegmatite and its geological significance in Muji area, West Kunlun, China. Acta Petrologica Sinica, 38 (7): 1937 ~ 1951.

Wang He, Gao Hao, Zhang Xiaoyu, Yan Qinghe, Xu Yigang, Zhou Kailin, Dong Rui, Li Pei. 2020. Geology and geochronology of the super-large Bailongshan Li – Rb – (Be) rare-metal pegmatite deposit, West Kunlun orogenic belt, NW China. Lithos, 360: 105449.

Wang He, Huang Liang, Ma Huadong, Li Yong, Wang Wei, Xiao Fei, Bai Hongyang, Wang Kunyu. 2023. Geological characteristics and metallogenic regularity of lithium deposits in Dahongliutan—Bailongshan area, West Kunlun, China. Acta Petrologica Sinica, 39 (7): 1931 ~ 1949.

Wang Tao, Tong Ying, Jahn Bor-ming, Zou Tianren, Wang Yanbin, Hong Dawei, Han Baofu. 2007. 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. Ore Geology Reviews, 32 (1~2): 325 ~ 336.

Wang Zhenhong, Wang He, Bai Hongyang, Huang Liang, Wang Kunyu, Liu Jinheng. 2024&. Geochemistry, zircon U-Pb dating, Hf—Nd isotopic characteristic and geological significance of Late Triassic S-Type granite in the Keliya region, West Kunlun Orogen. Acta Petrologica Sinica, 40 (8): 2415 ~ 2428.

Watson E B, Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. Planetary Science Letters, 64 (2): 295 ~ 304.

Wei Xiaopeng, Wang He, Hu Jun, Mu Shenglu, Qiu Zengwang, Yan Qinghe, Li Pei. 2017&. Geochemistry and geochronology of the Dahongliutan two-mica granite pluton in western Kunlun orogen: Geotectonic implications. Geochimica, 46 (1): 66 ~ 80.

Weinberg R F, Hasalová P. 2015. Water-fluxed melting of the continental crust: A review. Lithos, 212: 158 ~ 188.

Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95: 407 ~ 419.

Xiao Wenjiao, Windley B F, Chen Hanlin, Zhang Guocheng, Li Jiliang. 2002. Carboniferous—Triassic subduction and accretion in the Western Kunlun, China: Implications for the collisional and accretionary tectonics of the Northern Tibetan Plateau. Geology, 30: 295 ~ 298.

Yan Qinghe, Qiu Zengwang, Wang He, Wang Min, Wei XiaoPeng, Li Pei, Zhang Rongqing, Li Congying, Liu Jianping. 2018. Age of the Dahongliutan rare metal pegmatite deposit, West Kunlun, Xinjiang (NW China): Constraints from LA – ICP – MS U – Pb dating of columbite-(Fe) and cassiterite. Ore Geology Reviews, 100, 561 ~ 573.

Yan Qinghe, Wang He, Chi Guoxiang, Wang Qiang, Hu Huan, Zhou Kailin, Zhang Xiaoyu. 2022. Recognition of a 600-km-long Late Triassic rare metal (Li—Rb—Be—Nb—Ta) pegmatite belt in the western Kunlun orogenic belt, Western China. Economic Geology, 117 (1): 213 ~ 236.

Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan—Tibetan orogen . Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28 (1): 211 ~ 280.

Zagorsky V Ye, Vladimirov A G, Makagon V M, Kuznetsova L G, Smirnov S Z, D'yachkov B A, Annikova I Yu, Shokalsky S P,

Uvarov A N. 2014. Large fields of spodumene pegmatites in the settings of rifting and postcollisional shear - pull-apart dislocations of continental lithosphere. Russian Geology and Geophysics, 55 (2): 237 ~ 251.

Zanchi A, Poli S, Fumagalli P, Gaetani M. 2000. Mantle exhumation along the Tirich Mir Fault Zone, NW Pakistan: pre-mid-Cretaceous accretion of the Karakoram terrane to the Asian margin. Geological Society, London, Special Publications, 170 (1): 237 ~ 252.

Zeng Lingsen, Asimow Paul D, Saleeby Jason B. 2005. Coupling of anatectic reactions and dissolution of accessory phases and the Sr and Nd isotope systematics of anatectic melts from a metasedimentary source. Geochimica et Cosmochimica Acta, 69 (14): 3671 ~ 3682.

Zeng Lingsen, Gao Li-e, Xie Kejia, Jing Liu-Zeng. 2011. Mid-Eocene high Sr/Y granites in the Northern Himalayan Gneiss Domes: Melting thickened lower continental crust. Earth and Planetary Science Letters, 303 (3~4): 251 ~ 266.

Zhang Chuanlin, Ma Huadong, Liu Xiaoqiang. 2022&. Architecture and tectonic evolution of the Pamir Plateau: A review. Geological Review, 68 (5): 1653 ~ 1673.

Zhang Chuanlin, Ma Huadong, Zhu Bingyu, Ye Xiantao, Qiu Lin, Zhao Haixiang, Liu Xiaoqiang, Ding Teng, Hao Xiaoshu. 2019&. Tectonic evolution of the Western Kunlun—Karakorum Orogenic Belt and its coupling with the mineralization effect. Geological Review, 65 (5): 1077 ~ 1102.

Zhang Chuanlin, Zou Haibo, Ye Xiantao, Chen Xiangyan. 2018. Tectonic evolution of the NE section of the Pamir Plateau: New evidence from field observations and zircon U-Pb geochronology. Tectonophysics, 723: 27 ~ 40.

Zhang Hongliang, Yang Wenguang, Zhu Lidong, Lu Zhiyou, Su Xin, Li Chengzhi. 2019&. Zircon U-Pb age, Geochemical Characteristics and Geological significance of Hjghly Differentiated S-type Granites in the South Lhasa Block. Mineralogy and Petrology, 39 (1): 52 ~ 62.

Zhang Qichao, Liu Yan, Wu Zhenhan, Huang He, Li Kan, Zhou Qing. 2019&. Late Triassic granites from the northwestern margin of the Tibetan Plateau, the Dahongliutan example: petrogenesis and tectonic implications for the evolution of the Kangxiwa Palaeo-Tethys. International Geology Review, 61 (2): 175 ~ 194.

Zhang Yu, Niu Yaoling, Hu Yan, Liu Jinju, Ye Lei, Kong Juanjuan, Duan Meng. 2016. The syncollisional granitoid magmatism and continental crust growth in the West Kunlun Orogen, China - Evidence from geochronology and geochemistry of the Arkarz pluton. Lithos, 245: 191 ~ 204.

Zhu Mingtian, Dong Zhiguo, Zhang Lianchang. 2022&. Genetic discussion between the Triassic plutons and race metal pegmatite in the Muji area from north section of the Western Kunlun, China. Acta Petrologica Sinica, 38 (7): 2003 ~ 2016.

Zhu Mingtian, Dong Zhiguo, Zhang Lianchang. 2022. Volatile accumulation for the mineralization of Li-Be pegmatites in the northeastern Pamir, Western Kunlun, China. International Geology Review, 65 (8): 1354 ~ 1371.

Zhang Qi, Yuan Jie. 2024&. The crisis and opportunity of geochemical research, 70 (5): 1907 ~ 1926.

Zou Tianren, Li Qingchang. 2006#. Rare and rare earth metal deposits in Xinjiang, China. Beijing: Geological Publishing House: 93 ~ 96.

Petrogenesis and metallogenic significance of Qiongrang two-mica granites in Muji Town, NE Pamir

QIAN Xukun[1)], LIU Xiaoqiang[1,2)], MA Huadong[3,4)], XIAILI Aerken[1)], SONG Zhihao[5)]

1) *School of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi*, 830017;

2) *Xinjiang Key Laboratory for Geodynamic Processes and Metallogenic Prognosis of the Central Asian Orogenic Belt, Urumqi*, 830017;

3) *National* 305 *Project Office, Urumuqi*, 830000;

4) *Xinjiang Natural Resources and Ecological Environment Research Center, Urumuqi*, 830000;

5) *College of Oceanography, Hohai University, Nanjing*, 210098

Objectives: The Triassic granites in the West Kunlun—Pamir region is intricately linked to the evolution of the ancient Paleo-Tethys and metallogenesis of rare metals. Through the geochemical test of Qiongrang two-mica granites, the metallogenic potential of Li—Be rare metal deposit is determined in Muji area.

Results: We conducted a comprehensive study of the petrology, zircon U-Pb geochronology, major and trace element geochemistry, and zircon Hf isotopic analysis of two-mica granites from the Qiongrang, SW Muji, NE Pamir. Zircon U-Pb dating yield the age of around 211.6 Ma, suggesting two-mica granites from the Qiongrang emplaced at Late Triassic. The two-mica granites from the Qiongrang exhibit high levels of SiO_2(73.24% ~ 74.09%), Al_2O_3(14.50% ~ 15.01%), and K_2O (5.52% ~ 5.75%), and low TiO_2(0.15% ~ 0.18%) and MgO (0.30% ~ 0.37%). They also exhibit strongly peraluminous geochemical features (A/CNK = 1.12 ~ 1.15). The studied rocks are rich in Rb, Th, U, K and LREE, depleted in Sr, Ba, Nb, Ta, Ti, P and HREE, with

obviously fractionation of LREE and HREE ($(La/Yb)_N$ = 44.62 ~ 54.58) and negative Eu anomaly (Eu/Eu* = 0.52 ~ 0.59), belonging to strongly differentiated S-granite, formed by the dehydration melting of mica from metamudstone sources. The zircon $\varepsilon_{Hf}(t)$ value of two-mica granites from the Qiongrang from −7.93 to −0.91, and the zircon $\varepsilon_{Hf}(t)$ value of the Dahongliutan granites range from −8.8 to −1.4.

Conclusions: The Qiongrang two-mica granites in Muji Town contain relatively high levels of Li and Be, and they are closely related in time—space to the Dahongliutan rare metal pegmative veins, it is speculated that the Qiongrang two-mica granites in Muji Town possess significant potential for the exploration of hard-rock lithium—beryllium mineralization.

Keywords: S-type granite; Triassic; petrogenesis; metallogeny; Northeastern Pamir

Acknowledgements: This paper is the result of the subproject of the National Key Research and Development Program (No. 2021YFC2901904) and the Key Research and Development Task of Xinjiang Uyghur Autonomous Region (No. 2022B03015-2)

First author: QIAN Xukun, male, born in 1998, master student; Email: qianxukun @ 163.com

Corresponding author: LIU Xiaoqiang, male, born in 1987, Ph. D., associate professor, is mainly engaged in research of magmatic rocks and mineralization; Email: xiaoqliu2011@ 163.com

Manuscript received on: 2024-09-24; Accepted on: 2024-12-12; Published online on: 2024-12-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2024.12.055 **Edited by**: ZHANG Yuxu