

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.989



东天山哈尔里克地区晚石炭世淡色花岗岩成因及其地质意义

朱小辉^{1,2,3}, 朱涛¹, 张欣¹, 奚任刚¹, 孟勇¹, 王凯¹

1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西西安 710054

2. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 陕西西安 710069

3. 西北大学地质学系, 陕西西安 710069

摘要: 淡色花岗岩对深入理解造山带构造演化具有重要意义。哈尔里克山南麓小铺地区出露多种类型的淡色花岗岩脉, 包括黑云母花岗岩、二云母花岗岩、含电气石花岗岩以及含石榴石花岗岩。岩石地球化学研究显示这些淡色花岗岩整体具有高硅($\text{SiO}_2 = 73.22\% \sim 75.12\%$)、铝($\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.59\% \sim 14.49\%$)、碱($\text{ALK} = 7.11\% \sim 9.67\%$)、低钛($\text{TiO}_2 = 0.01\% \sim 0.14\%$)、铁($\text{TFeO} = 0.26\% \sim 1.37\%$)、镁($\text{MgO} = 0.09\% \sim 0.46\%$)、钙($\text{CaO} = 0.46\% \sim 1.92\%$)的特点, 属于弱过铝质钙碱性—钾玄岩系列岩石。其中黑云母花岗岩具有较高的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值($0.46 \sim 0.47$)和低的 Rb/Sr 比值($0.31 \sim 0.33$), 指示其为砂质源岩经黑云母脱水熔融形成; 二云母花岗岩和含电气石花岗岩具有较低的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值($0.11 \sim 0.31$)和高的 Rb/Sr 比值($1.41 \sim 3.75$), 为泥质源岩经白云母脱水熔融形成; 含石榴石花岗岩具有强烈的 Eu 负异常以及“海鸥状”稀土配分模式, 为高分异型花岗岩。小铺淡色花岗岩初始岩浆温度较低($T = 637 \sim 744^\circ\text{C}$), 结合其野外地质特征, 认为其形成可能与深部物质的折返、造山带的伸展垮塌有关。利用 LA-ICP-MS 微区原位锆石 U-Pb 定年获得黑云母花岗岩的形成时代为 308.5 ± 2.2 Ma, 含电气石花岗岩的形成时代为 307.8 ± 2.3 Ma, 二者在误差范围内近乎一致, 指示哈尔里克地区在晚石炭世末处于伸展构造背景。

关键词: 锆石 U-Pb 定年; 淡色花岗岩; 后碰撞; 哈尔里克; 地球化学。

中图分类号: P59

文章编号: 1000-2383(2018)12-4443-16

收稿日期: 2018-03-23

Petrogenesis and Geological Implications of Late Carboniferous Leucogranites in Harlik Area, Eastern Tianshan

Zhu Xiaohui^{1,2,3}, Zhu Tao¹, Zhang Xin¹, Xi Rengang¹, Meng Yong¹, Wang Kai¹

1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Ministry of Natural Resources, Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, China

2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China

3. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

Abstract: The leucogranite provides key insights into the tectonic evolution of orogenic belt. Petrology, geochemistry and geochronology results show that there are four types of leucogranites in the Xiaopu area in the southern piedmont of the Harlik area, eastern Tianshan, including the biotite leucogranite, two-mica leucogranite, tourmaline-bearing leucogranite and garnet-bearing leucogranite. These leucogranites are rich in silica ($\text{SiO}_2 = 73.22\% - 75.12\%$), aluminium ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.59\% - 14.49\%$), alkali ($\text{ALK} = 7.11\% - 9.67\%$), but low in titanium ($\text{TiO}_2 = 0.01\% - 0.14\%$), iron ($\text{TFeO} = 0.26\% - 1.37\%$), magnesium ($\text{MgO} = 0.09\% - 0.46\%$) and calcium ($\text{CaO} = 0.46\% - 1.92\%$), which belong to the calc-alkaline to shoshonite peraluminous granite. The high $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ ($0.46 - 0.47$) and low Rb/Sr ($0.31 - 0.33$) ratios of the biotite leucogranite imply

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41402051); 中国地质调查局工作项目(Nos.1212012110000026, DD20179395)。

作者简介: 朱小辉(1986—), 博士研究生, 岩石学专业。ORCID: 0000-0001-7848-4007. E-mail: zhuxiaohui_012@163.com

引用格式: 朱小辉, 朱涛, 张欣, 等, 2018. 东天山哈尔里克地区晚石炭世淡色花岗岩成因及其地质意义. 地球科学, 43(12): 4443-4458.

that it was formed by the biotite dehydration of greywacke, whereas the low $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ (0.11–0.31) and high Rb/Sr (1.41–3.75) ratios indicate that the two-mica and tourmaline-bearing leucogranites were formed by the muscovite dehydration of meta-pelitic-arenaceous sedimentary rocks, and the strong negative Eu anomalies and “seagull forms” REE patterns reveal that the garnet-bearing leucogranite belongs to highly fractionated granite. Considered the geological features and low initial temperature ($T=637-644\text{ }^{\circ}\text{C}$), the Xiaopu leucogranites were probably formed related to the exhumation of deep material, or extensional collapse of the orogen. Zircon U-Pb results show that the formation ages of biotite and tourmaline-bearing leucogranites are $308.5\pm 2.2\text{ Ma}$ and $307.8\pm 2.3\text{ Ma}$, respectively. Combining with the previous data, it is suggested that the Harlik area was in extensional tectonic setting in the Late Carboniferous.

Key words: LA-ICP-MS U-Pb dating; leucogranite; post-collision; Harlik area; geochemistry.

0 引言

中亚造山带位于西伯利亚板块和塔里木—华北板块之间,是一条记录了古亚洲洋形成、俯冲消减、弧—陆碰撞、陆—陆碰撞、地壳增厚及伸展垮塌等全过程的增生型造山带(Şengör *et al.*, 1993; Xiao *et al.*, 2004; Windley *et al.*, 2007).随着各演化阶段构造体制和动力学的不断变化,造山带不同部位的 P - T - X 条件(温度—压力—含水量)也在发生变化,继而引起造山带深部地幔与地壳物质发生不同程度的部分熔融,形成具有不同地球化学特征的岩浆岩,对这些岩石进行详细研究可为认识深部物质响应造山过程提供重要信息.哈尔里克山地处中亚造山带腹地,保存了丰富的与造山过程有关的沉积、变形、变质以及岩浆作用信息(赵明等, 1997, 2002; 顾连兴等, 2006; 李锦轶等, 2006; 宋鹏等, 2018),是研究古亚洲洋构造演化的理想窗口.人们已沿哈尔里克山主脊发现了大量奥陶纪—志留纪(469~430 Ma)时期的岛弧岩浆岩,指示本地区在早古生代存在洋壳的俯冲消减作用(曹福根等, 2006; 郭华春等, 2006; 马星华等, 2015; 刘亮等, 2017).此外,本地区广泛发育晚石炭世—早二叠世(320~285 Ma)岩浆活动(赵明等, 2002; 孙桂华等, 2005, 2007a; 顾连兴等, 2006; 汪传胜等, 2009a, 2009b; 陈希节和舒良树, 2010; 陈希节等, 2016; 宋鹏等, 2018),但前人对这些岩石形成的构造背景尚存在不同看法.笔者在哈尔里克山南麓晚石炭世居里得能组(C_2j)变沉积岩(混合岩)中发现了大量的淡色花岗岩脉,已有研究表明该类型花岗岩多是壳源岩石低程度部分熔融的产物(Braun *et al.*, 1996; Nabelek and Bartlett, 1998),其形成与造山过程中构造体制的转换密切相关(Chung *et al.*, 2005; 张宏飞等, 2005; 曾令森和高利娥, 2017).为此,本文对这些淡色花岗岩开展了系统的岩石学、地球化学和锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学研究,以期对哈尔里克地区构造演化提供约束.

1 区域地质概况与岩石学特征

哈尔里克山位于东天山北部,夹持于准噶尔地块和吐哈地块之间,北侧以卡拉麦里—莫钦乌拉断裂为界,与东准噶尔造山带相邻,西接博格达造山带,东邻甘肃北山,构造位置上处于准噶尔造山带与天山造山带的交汇部位(李锦轶, 2004).区内出露的地层以奥陶系和石炭系的火山岩—火山碎屑岩—沉积岩组合为主,其中奥陶系主要沿哈尔里克山主脊出露,下石炭统及上石炭统则分别出露于哈尔里克山的北坡与南坡,泥盆系、二叠系、侏罗系只在局部地区有少量出露.本地区侵入岩浆活动强烈,侵入岩面积可占整个基岩出露区的 60% 以上,主要为中酸性岩石,并发育大量辉绿岩墙(图 1).

在哈尔里克山东段南麓沁城乡小铺地区发育一条递增变质带,由南向北可划分为绢云母—绿泥石带、黑云母—石榴石带、十字石带、红柱石—矽线石带以及混合岩带(赵明等, 1997).原 1:20 万地质图曾将其统一划为晚石炭世居里得能组;曹福根等(2009)从黑云母—石榴石带浅变质火山岩中获得 $707\pm 190\text{ Ma}$ 和 $757\pm 190\text{ Ma}$ 两组全岩 Sm-Nd 等时线年龄,据此将该浅变质岩系划为前南华纪青石峡组,并将其北侧遭受了强烈变质作用的高级变质岩系划为新太古代小铺岩群,认为是吐哈地块的基底;孙桂华等(2007b)对黑云母带浅变质砂岩中的碎屑锆石进行了 SHRIMP U-Pb 定年,限定其沉积时代晚于 388 Ma,认为该套变质岩为晚石炭世沉积.

野外地质调查显示,小铺地区的混合岩中发育大量的淡色花岗岩脉(图 2a),最大宽度约为 5 m,延伸可达数十米.这些淡色花岗岩在矿物组成上比较相似,主要由石英、碱性长石、斜长石、黑云母以及白云母组成,但在矿物含量上有所区别,在少数淡色花岗岩脉中还可见到石榴石、电气石等副矿物.笔者依据岩石的矿物组合及含量变化特征,将这些淡色花

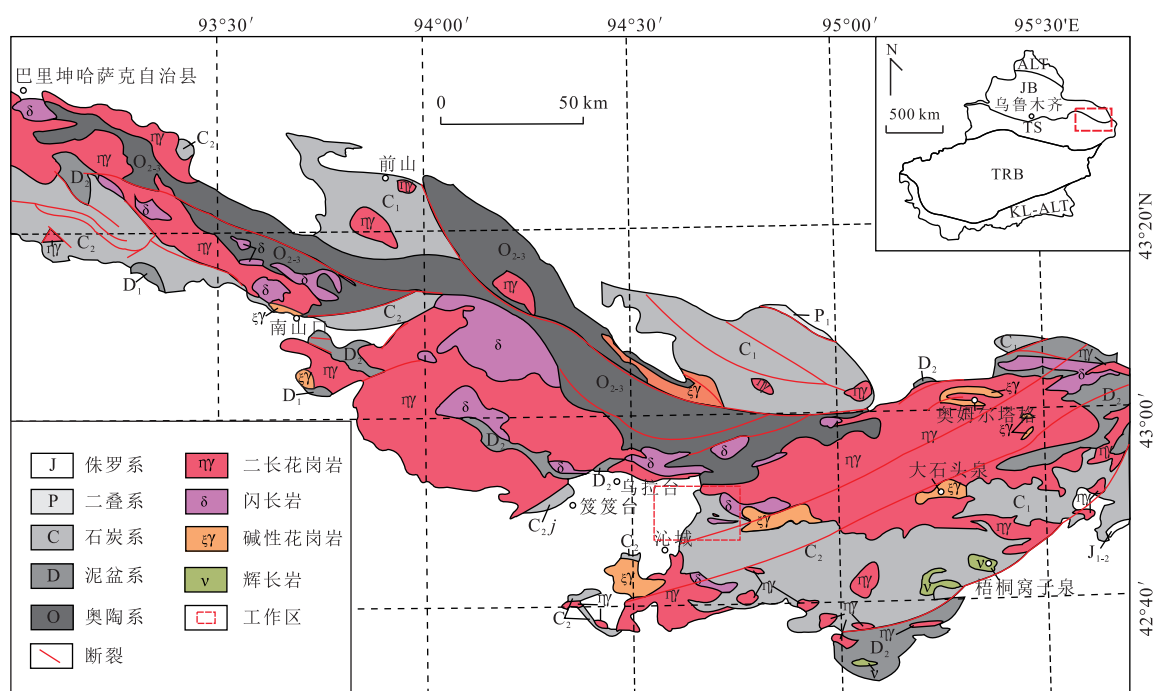


图 1 哈尔里克山地区地质简图
Fig.1 Geological sketch of the Harlik area

据孙桂华(2007)修改.ALT.阿尔泰造山带;JB.准噶尔盆地;TS.天山造山带;TRB.塔里木盆地;KL-ALT.昆仑—阿尔金造山带

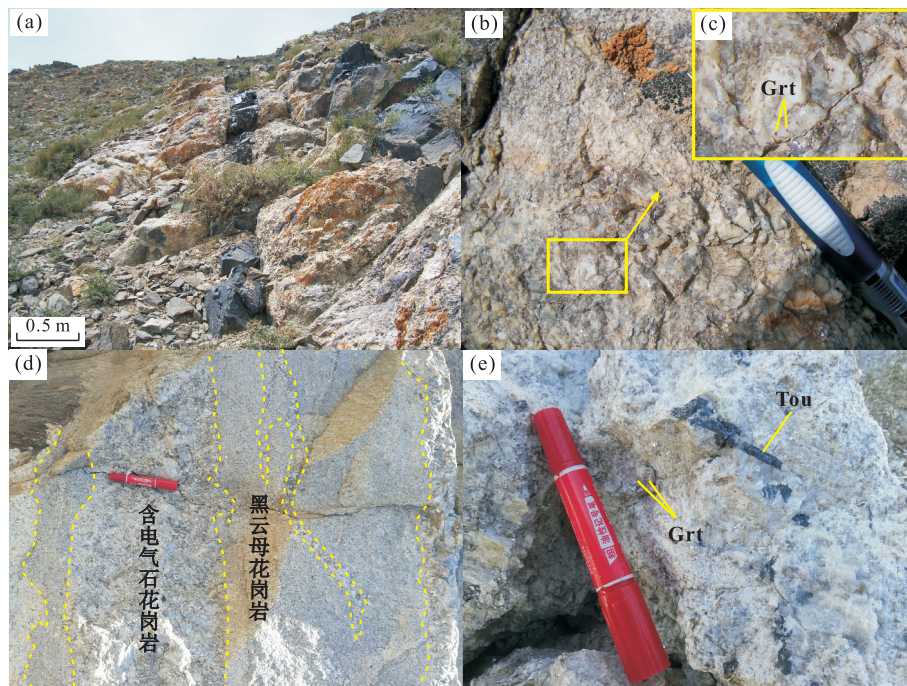


图 2 小铺地区淡色花岗岩野外露头照片
Fig.2 The outcrop photos for the leucogranites from Xiaopu area
Grt.石榴子石;Tou.电气石

花岗岩脉分别命名为黑云母花岗岩($\text{Qtz} + \text{Kfs} + \text{Pl} + \text{Bt} \pm \text{Mus}$; 采样坐标: $42^{\circ}50'55''\text{N}, 94^{\circ}42'13''\text{E}$)、二云母花岗岩($\text{Qtz} + \text{Kfs} + \text{Pl} + \text{Mus} + \text{Bt}$; 采样坐标: $42^{\circ}51'3''$

$\text{N}, 94^{\circ}42'19''\text{E}$)、含石榴石花岗岩($\text{Qtz} + \text{Kfs} + \text{Pl} + \text{Mus} + \text{Grt} \pm \text{Bt}$; 采样坐标: $42^{\circ}50'41''\text{N}, 94^{\circ}42'7''\text{E}$) (图 2b, 2c) 以及含电气石花岗岩($\text{Qtz} + \text{Kfs} + \text{Pl} + \text{Mus} +$

Tou + Grt ± Bt; 采样坐标: 42°50'55"N, 94°42'13"E) (图 2d, 2e). 其中含石榴石/电气石花岗岩多为花岗伟晶岩并呈脉状或枝状侵入到黑云母/二云母花岗岩中 (图 2b, 2d).

2 分析方法

本次研究涉及的所有分析测试皆在中国地质调查局西安地质调查中心实验测试中心完成. 其中 FeO 和 LOI 采用标准湿化学法分析, 其他主量元素分析在 PW4400 型 X 荧光光谱仪 (XRF) 上测定, 元素分析误差低于 5%. 微量元素和稀土元素测定在 X-SeriesII 型电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS) 上进行, 相对标准偏差优于 5%. 锆石的分选工作由河北省廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成. CL 图像分析由加载英国 Gatan 公司的 Chroma CL2 型阴极荧光探头的电子显微扫描电镜完成. LA-ICP-MS 分析在美国 Agilent 公司的 Agilent 7700x ICP-MS 和德国 Coherent 公司的 ComPex 102 Excimer 激光器 (工作物质为 ArF, 波长为 193 nm)、MicroLas 公司的 GeoLas 200M 光学系统的联机上进行. 实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气, 锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标标准物质, 元素含量采用 NIST SRM610 作为外标, ^{29}Si 作为内标.

3 岩石地球化学特征

3.1 主量元素

本次研究共采集 19 件不同类型淡色花岗岩样

品进行岩石地球化学分析, 测试结果见表 1. 黑云母花岗岩 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 含量分别为 73.22%~73.29%、14.38%~14.49%、2.96%~3.07%、4.09%~4.15%, A/CNK 值为 1.06~1.08, 属于弱过铝质钙碱性系列岩石. 二云母花岗岩 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 含量分别为 74.26%~75.06%、13.59%~13.97%、4.96%~5.62%、3.27%~4.05%, A/CNK 值为 1.03~1.13, 属于弱过铝质高钾钙碱性—钾玄质系列岩石. 含电气石花岗岩 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 含量分别为 73.69%~75.12%、14.07%~14.44%、3.19%~3.99%、4.32%~5.05%, A/CNK 值为 1.03~1.10, 属于弱过铝质钙碱性—高钾钙碱性系列岩石. 含石榴石花岗岩 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 含量分别为 74.12%~74.93%、14.08%~14.37%、3.09%~4.52%、4.21%~5.10%, A/CNK 值为 1.07~1.11, 属于弱过铝质钙碱性—高钾钙碱性系列岩石 (图 3). 19 件样品中, 除黑云母花岗岩的 TFeO、MgO、CaO、 TiO_2 含量较高外 (分别为 1.36%~1.37%、0.44%~0.46%、1.89%~1.92%、约 0.14%), 其余 3 种类型花岗岩的 TFeO、MgO、CaO、 TiO_2 含量普遍较低 ($<0.74\%$ 、 $<0.22\%$ 、 $<1.39\%$ 、 $<0.05\%$).

3.2 稀土和微量元素

不同类型淡色花岗岩稀土元素与微量元素含量变化较大, 黑云母花岗岩稀土元素总量较高, $\Sigma\text{REE} = 58.41 \times 10^{-6} \sim 67.89 \times 10^{-6}$, 轻重稀土分异明显, $\text{La}_N/\text{Sm}_N = 3.26 \sim 3.28$, $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 6.40 \sim 6.90$, $\text{Gd}_N/\text{Yb}_N = 1.39 \sim 1.48$, 具有轻稀土相对富集、重稀土平坦的稀土配分模式 (图 4a), 并显示轻微的 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.67 \sim 0.68$); 在微量元素原始地

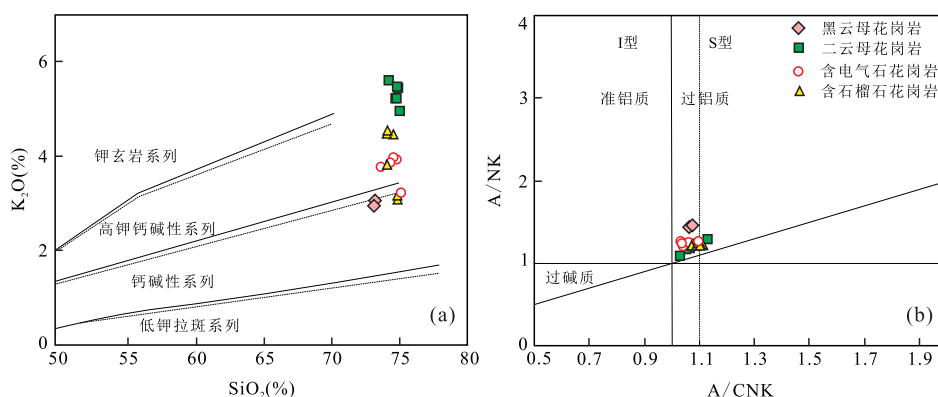


图 3 小铺地区淡色花岗岩主量元素判别图解

Fig.3 Major element diagrams for the leucogranites from Xiaopu area

图 a 据 Rickwood(1989); 图 b 据 Peccerillo and Taylor(1976)

表 1 东天山小铺地区淡色花岗岩主量元素(%)、微量元素(10^{-6})分析结果

Table 1 Major element (%) and trace element (10^{-6}) compositions of the leucogranites from Xiaopu area																			
样品	二云母花岗岩				黑云母花岗岩				含电气石花岗岩				含石榴石花岗岩						
	14XP-01	14XP-01	14XP-01	14XP-01	14XP-01	14XP-01	14XP-03	14XP-03	14XP-04	14XP-04	14XP-04	14XP-04	14XP-04	14XP-05	14XP-05	14XP-05	14XP-05	14XP-05	14XP-05
SiO ₂	74.26	74.95	74.84	75.06	74.90	74.76	73.22	73.29	74.39	73.69	74.60	75.12	74.85	74.16	74.93	74.61	74.21	74.12	74.93
Al ₂ O ₃	13.97	13.60	13.86	13.90	13.59	13.87	14.49	14.38	14.33	14.31	14.44	14.25	14.07	14.37	14.08	14.20	14.27	14.31	14.21
Fe ₂ O ₃	0.25	0.18	0.26	0.22	0.30	0.23	0.60	0.72	0.23	0.35	0.06	0.11	0.05	0.07	0.02	0.03	0.13	0.11	0.23
FeO	0.25	0.38	0.25	0.30	0.32	0.25	0.82	0.72	0.30	0.32	0.28	0.16	0.40	0.68	0.55	0.50	0.42	0.58	0.38
CaO	0.46	0.76	0.90	0.86	0.74	1.00	1.89	1.92	1.08	1.39	0.96	1.08	1.18	0.63	0.77	0.58	0.71	0.63	0.78
MgO	0.20	0.19	0.13	0.22	0.20	0.15	0.44	0.46	0.13	0.21	0.09	0.09	0.12	0.10	0.09	0.09	0.10	0.15	0.12
K ₂ O	5.62	5.46	5.23	4.96	5.49	5.23	2.96	3.07	3.88	3.77	3.99	3.19	3.93	3.83	3.09	4.45	4.52	4.48	3.15
Na ₂ O	4.05	3.43	3.39	3.27	3.32	3.45	4.15	4.09	4.47	4.42	4.32	5.05	4.37	4.62	5.10	4.26	4.21	4.23	4.94
TiO ₂	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.14	0.14	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
P ₂ O ₅	0.12	0.13	0.12	0.11	0.12	0.13	0.07	0.08	0.16	0.17	0.18	0.16	0.18	0.30	0.22	0.22	0.21	0.22	0.19
MnO	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.01	0.04	0.19	0.14	0.10	0.09	0.12	0.05
LOI	0.73	0.84	0.94	1.01	0.90	0.84	1.14	1.04	0.94	1.25	0.97	0.73	0.74	1.01	0.99	0.90	1.09	1.00	0.97
Total	99.96	99.97	99.97	99.96	99.94	99.96	99.96	99.95	99.97	99.95	99.95	99.97	99.96	99.97	99.99	99.95	99.97	99.96	99.96
Cu	1.56	1.34	1.16	1.78	1.44	1.55	1.97	2.71	1.40	2.94	1.19	0.84	1.25	0.87	1.19	1.16	1.43	2.30	0.86
Pb	30.4	37.8	36.5	31.6	36.8	37.3	24.2	22.9	30.4	30.7	18.9	22.9	28.5	16.8	16.7	19.2	20.1	20.2	17.6
Zn	9.79	12.1	13.4	10.4	15.4	15.4	35.9	34.7	18.2	22.2	7.80	6.98	14.1	34.3	12.0	12.7	11.1	15.4	46.2
Cr	1.78	1.68	1.92	2.00	1.23	1.90	2.47	4.31	1.11	6.36	1.53	1.11	0.99	1.61	1.63	1.66	2.34	0.97	1.36
Ni	2.54	2.05	2.60	2.67	2.62	2.72	10.5	8.79	2.49	3.43	2.40	2.06	2.21	2.61	2.10	2.15	2.26	1.46	1.60
Co	60.9	49.9	91.3	66.8	67.4	112	54.6	65.3	70.0	40.9	47.4	71.3	32.4	84.3	75.4	66.4	78.9	41.7	47.7
Rb	170	173	171	148	169	169	88.2	90.7	193	179	196	157	190	238	193	318	331	336	223
Cs	5.19	7.03	7.55	6.40	6.98	7.49	6.46	6.72	20.5	20.2	17.5	14.7	18.2	11.3	9.69	11.8	12.2	12.6	9.07
Mo	0.09	0.11	0.11	0.09	0.13	0.11	0.12	0.09	0.14	0.16	0.10	0.12	0.12	0.10	0.13	0.14	0.15	0.14	0.15
Sr	120	84.4	66.2	53.4	70.8	63.7	269	288	66.1	59.8	52.8	57.9	50.7	6.17	6.56	5.48	7.26	5.41	5.90
Ba	264	278	220	152	267	195	241	247	198	181	156	137	176	11.7	7.33	5.62	6.05	5.40	5.79
V	3.21	0.80	0.45	2.15	1.38	0.98	11.7	11.8	1.35	2.09	0.85	0.82	0.81	0.66	0.60	0.64	0.53	1.55	0.64
Sc	7.29	8.09	6.89	5.93	5.48	5.67	8.35	9.70	7.60	7.98	6.09	7.83	7.00	7.45	7.36	5.39	7.02	8.37	7.10
Nb	7.76	7.53	7.05	7.38	7.65	6.62	8.92	9.10	7.74	9.50	7.30	5.00	7.28	11.1	8.63	9.42	8.96	9.97	15.8
Ta	1.15	1.18	1.05	0.96	1.22	1.01	1.21	1.20	1.21	1.20	1.17	0.80	1.02	1.54	1.31	1.37	1.32	1.46	2.21
Zr	39.4	45.8	37.7	39.7	43.8	36.5	89.3	93.7	21.8	22.3	26.9	27.9	29.9	43.4	35.2	21.8	20.4	22.6	26.4
Hf	1.87	2.21	1.80	1.94	2.09	1.75	2.78	2.82	1.23	1.19	1.46	1.45	1.51	3.48	2.35	1.38	1.34	1.37	1.70
Ga	12.6	14.3	14.0	14.4	13.8	12.4	17.5	17.7	12.8	14.6	14.5	11.7	13.3	16.3	15.7	15.3	15.8	15.8	16.1
U	1.81	2.41	2.42	1.82	1.96	2.43	1.38	1.28	1.75	1.97	1.37	1.57	1.41	1.39	1.16	1.17	1.15	1.63	1.39
Th	1.64	2.52	2.36	1.74	2.08	1.88	4.16	4.86	2.22	2.71	1.78	1.89	1.66	1.12	1.15	0.75	0.87	0.96	0.88
La	3.05	3.56	3.39	2.40	3.11	2.74	10.7	12.7	3.72	4.09	2.96	2.83	2.51	1.36	1.43	1.05	1.06	1.23	1.36

续表 1

样品	二云母花岗岩						黑云母花岗岩						含电气石花岗岩						含石榴石花岗岩					
	14XP-01 (1)	14XP-01 (2)	14XP-01 (3)	14XP-01 (4)	14XP-01 (5)	14XP-01 (6)	14XP-01 (1)	14XP-01 (2)	14XP-01 (3)	14XP-01 (4)	14XP-01 (5)	14XP-01 (6)	14XP-04 (1)	14XP-04 (2)	14XP-04 (3)	14XP-04 (4)	14XP-04 (5)	14XP-04 (6)	14XP-05 (1)	14XP-05 (2)	14XP-05 (3)	14XP-05 (4)	14XP-05 (5)	14XP-05 (6)
Ce	6.45	7.88	7.16	4.86	6.64	5.86	23.8	27.1	7.74	8.22	6.00	5.94	4.60	3.21	3.36	2.46	2.47	2.86	3.02					
Pr	0.71	0.93	0.86	0.62	0.82	0.70	2.88	3.38	0.95	1.01	0.74	0.70	0.57	0.38	0.41	0.27	0.32	0.37	0.34					
Nd	2.75	3.69	3.72	2.75	3.40	2.99	10.7	12.9	3.65	4.18	2.98	2.98	2.35	1.56	1.74	1.06	1.30	1.53	1.44					
Sm	0.75	1.02	1.08	0.81	1.01	0.85	2.12	2.50	1.02	1.21	0.86	0.84	0.71	0.41	0.50	0.32	0.39	0.46	0.42					
Eu	0.24	0.34	0.33	0.24	0.34	0.26	0.46	0.53	0.26	0.25	0.20	0.20	0.15	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01					
Gd	1.08	1.56	1.67	1.2	1.52	1.29	2.02	2.36	1.21	1.55	1.10	1.07	0.99	0.61	0.65	0.38	0.44	0.52	0.66					
Tb	0.20	0.28	0.30	0.21	0.29	0.23	0.34	0.40	0.22	0.27	0.21	0.20	0.20	0.11	0.11	0.07	0.08	0.10	0.12					
Dy	1.30	1.86	2.04	1.38	1.88	1.55	2.14	2.47	1.40	1.75	1.35	1.30	1.31	0.70	0.71	0.44	0.50	0.61	0.72					
Ho	0.27	0.38	0.41	0.29	0.38	0.32	0.45	0.50	0.29	0.35	0.27	0.27	0.27	0.14	0.14	0.09	0.10	0.12	0.13					
Er	0.74	1.03	1.10	0.80	1.04	0.86	1.23	1.41	0.76	0.97	0.74	0.72	0.75	0.35	0.36	0.23	0.26	0.32	0.36					
Tm	0.11	0.14	0.16	0.12	0.15	0.13	0.19	0.21	0.11	0.14	0.11	0.10	0.12	0.049	0.053	0.03	0.04	0.05	0.05					
Yb	0.63	0.85	0.98	0.78	0.98	0.81	1.20	1.32	0.70	0.88	0.68	0.67	0.73	0.3	0.32	0.21	0.24	0.29	0.31					
Lu	0.09	0.13	0.14	0.12	0.14	0.12	0.18	0.20	0.10	0.12	0.10	0.10	0.11	0.04	0.05	0.03	0.04	0.05	0.05					
Y	7.04	9.79	12.3	8.44	11.2	9.67	12.8	14.9	8.25	10.2	7.96	8.08	8.22	3.53	3.99	2.10	2.36	3.04	3.48					

表 2 东天山小铺地区淡色花岗岩锆石 LA-ICP-MS 分析结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon dating results for the leucogranites from Xiaopu area

点号	元素含量(10^{-6})				Th/U				同位素比值				表面年龄(Ma)			
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
黑云母花岗岩																
1	11.0	87.7	173	0.51	0.052 91	0.003 10	0.357 68	0.019 47	0.049 02	0.001 30	325	128	311	15	309	8
2	15.0	115	238	0.48	0.053 19	0.001 82	0.356 46	0.011 42	0.048 59	0.000 85	337	76	310	9	306	5
3	52.9	375	898	0.42	0.056 51	0.001 84	0.366 08	0.011 10	0.046 98	0.000 84	472	71	317	8	296	5
4	50.0	237	930	0.26	0.061 67	0.001 96	0.373 88	0.010 95	0.043 96	0.000 78	663	67	323	8	277	5
5	73.5	191	1311	0.15	0.055 44	0.002 27	0.376 96	0.014 26	0.049 30	0.001 03	430	89	325	11	310	6
6	67.6	498	1084	0.46	0.054 79	0.000 93	0.373 10	0.006 20	0.049 38	0.000 62	404	37	322	5	311	4
7	130	665	2002	0.33	0.055 49	0.001 28	0.404 05	0.008 85	0.052 81	0.000 76	432	50	345	6	332	5
8	44.6	253	779	0.32	0.062 51	0.001 51	0.394 17	0.008 91	0.045 73	0.000 69	692	51	337	6	288	4
9	50.5	299	842	0.36	0.053 39	0.001 10	0.362 35	0.007 17	0.049 22	0.000 67	345	46	314	5	310	4
10	26.7	97.2	439	0.22	0.057 80	0.003 45	0.389 14	0.021 30	0.048 82	0.001 40	522	126	334	16	307	9
11	16.2	82.9	272	0.30	0.054 20	0.001 75	0.368 10	0.011 12	0.049 26	0.000 85	379	71	318	8	310	5
12	43.7	207	737	0.28	0.052 73	0.001 33	0.357 46	0.008 51	0.049 17	0.000 74	317	56	310	6	309	5
13	56.9	363	937	0.39	0.056 62	0.001 43	0.382 68	0.009 09	0.049 02	0.000 74	476	55	329	7	309	5
14	110	696	1845	0.38	0.053 04	0.000 86	0.358 21	0.005 76	0.048 98	0.000 61	331	36	311	4	308	4
15	60.6	477	919	0.52	0.113 67	0.002 67	0.679 22	0.014 26	0.043 34	0.000 72	1 859	42	526	9	274	4
16	86.1	624	1402	0.45	0.052 38	0.000 85	0.356 12	0.005 72	0.049 31	0.000 61	302	37	309	4	310	4
17	68.3	491	1127	0.44	0.051 94	0.001 01	0.350 19	0.006 60	0.048 90	0.000 65	283	44	305	5	308	4
18	48.9	264	848	0.31	0.060 70	0.001 37	0.389 06	0.008 29	0.046 49	0.000 67	629	48	334	6	293	4
19	48.6	322	753	0.43	0.053 02	0.003 85	0.385 01	0.025 73	0.052 67	0.001 76	329	156	331	19	331	11
20	77.8	517	1284	0.40	0.068 82	0.001 30	0.442 84	0.007 96	0.046 67	0.000 63	894	38	372	6	294	4
21	46.5	422	743	0.57	0.051 27	0.001 02	0.345 13	0.006 61	0.048 83	0.000 65	253	45	301	5	307	4
22	101	792	1665	0.48	0.051 60	0.000 91	0.348 14	0.006 02	0.048 94	0.000 62	268	40	303	5	308	4
23	29.9	248	496	0.50	0.051 62	0.001 21	0.343 62	0.007 68	0.048 28	0.000 69	269	53	300	6	304	4
24	71.1	315	1300	0.24	0.059 06	0.002 18	0.374 74	0.012 73	0.046 02	0.000 91	569	78	323	9	290	6
25	99.0	617	1658	0.37	0.053 43	0.000 87	0.361 57	0.005 79	0.049 08	0.000 61	347	36	313	4	309	4
含电气石花岗岩																
1	11.1	87.1	172	0.51	0.053 52	0.003 21	0.357 57	0.019 92	0.048 56	0.001 32	351	130	310	15	306	8
2	14.1	102	220	0.46	0.054 89	0.002 05	0.367 28	0.012 81	0.048 63	0.000 91	408	81	318	10	306	6
3	53.8	392	958	0.41	0.056 47	0.001 32	0.347 19	0.007 65	0.044 68	0.000 64	470	51	303	6	282	4
4	55.8	241	1003	0.24	0.063 33	0.001 58	0.391 82	0.009 12	0.044 96	0.000 69	719	52	336	7	284	4
5	80.7	183	1403	0.13	0.059 49	0.000 97	0.402 19	0.006 40	0.049 13	0.000 61	585	35	343	5	309	4
6	67.6	498	1084	0.46	0.055 04	0.000 93	0.370 66	0.006 14	0.048 93	0.000 61	414	37	320	5	308	4
7	130	664	2005	0.33	0.055 64	0.001 40	0.400 13	0.009 50	0.052 25	0.000 79	438	55	342	7	328	5
8	45.7	249	763	0.33	0.063 44	0.001 40	0.412 76	0.008 57	0.047 27	0.000 68	723	46	351	6	298	4

续表 2

点号	元素含量(10^{-6})				Th/U				同位素比值				表面年龄(Ma)			
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	δ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	δ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	δ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	δ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	δ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	δ
含电气石花岗岩																
9	50.7	297	840	0.35	0.053 30	0.001 01	0.360 14	0.006 62	0.049 09	0.000 64	342	42	312	5	309	4
10	25.4	96.4	390	0.25	0.056 90	0.003 50	0.410 57	0.023 16	0.052 41	0.001 53	487	131	349	17	329	9
11	16.2	82.9	272	0.30	0.054 30	0.001 75	0.366 91	0.01 108	0.049 08	0.000 84	383	71	317	8	309	5
12	43.1	207	724	0.29	0.053 20	0.001 30	0.359 41	0.008 32	0.049 06	0.000 72	337	54	312	6	309	4
13	53.4	307	823	0.37	0.055 38	0.002 17	0.398 36	0.014 47	0.052 24	0.001 06	427	85	341	11	328	6
14	110	698	1 840	0.38	0.053 30	0.000 88	0.360 01	0.005 82	0.049 04	0.000 61	342	37	312	4	309	4
15	53.0	399	932	0.43	0.109 42	0.001 75	0.579 73	0.008 80	0.038 47	0.000 51	1790	29	464	6	243	3
16	85.7	620	1 402	0.44	0.052 44	0.000 85	0.354 96	0.005 66	0.049 14	0.000 61	305	36	308	4	309	4
17	71.7	554	1 191	0.46	0.052 52	0.001 31	0.351 96	0.008 30	0.048 65	0.000 72	308	56	306	6	306	4
18	53.5	285	940	0.30	0.062 30	0.001 48	0.394 79	0.008 82	0.046 00	0.000 69	684	50	338	6	290	4
19	52.5	354	856	0.41	0.053 54	0.003 94	0.365 88	0.024 77	0.049 61	0.001 69	352	158	317	18	312	10
20	69.1	457	1 206	0.38	0.064 63	0.001 18	0.399 99	0.007 00	0.044 93	0.000 59	762	38	342	5	283	4
21	48.1	426	780	0.55	0.053 23	0.000 98	0.354 62	0.006 34	0.048 35	0.000 63	339	41	308	5	304	4
22	101	755	1 682	0.45	0.052 86	0.000 79	0.355 42	0.005 32	0.048 80	0.000 59	323	34	309	4	307	4
23	30.2	249	501	0.50	0.052 51	0.001 18	0.349 76	0.007 53	0.048 34	0.000 68	308	50	305	6	304	4
24	70.1	322	1 233	0.26	0.060 54	0.001 46	0.395 84	0.008 99	0.047 45	0.000 72	623	51	339	7	299	4
25	99.0	617	1 658	0.37	0.053 21	0.000 86	0.363 11	0.005 82	0.049 51	0.000 62	338	36	315	4	312	4

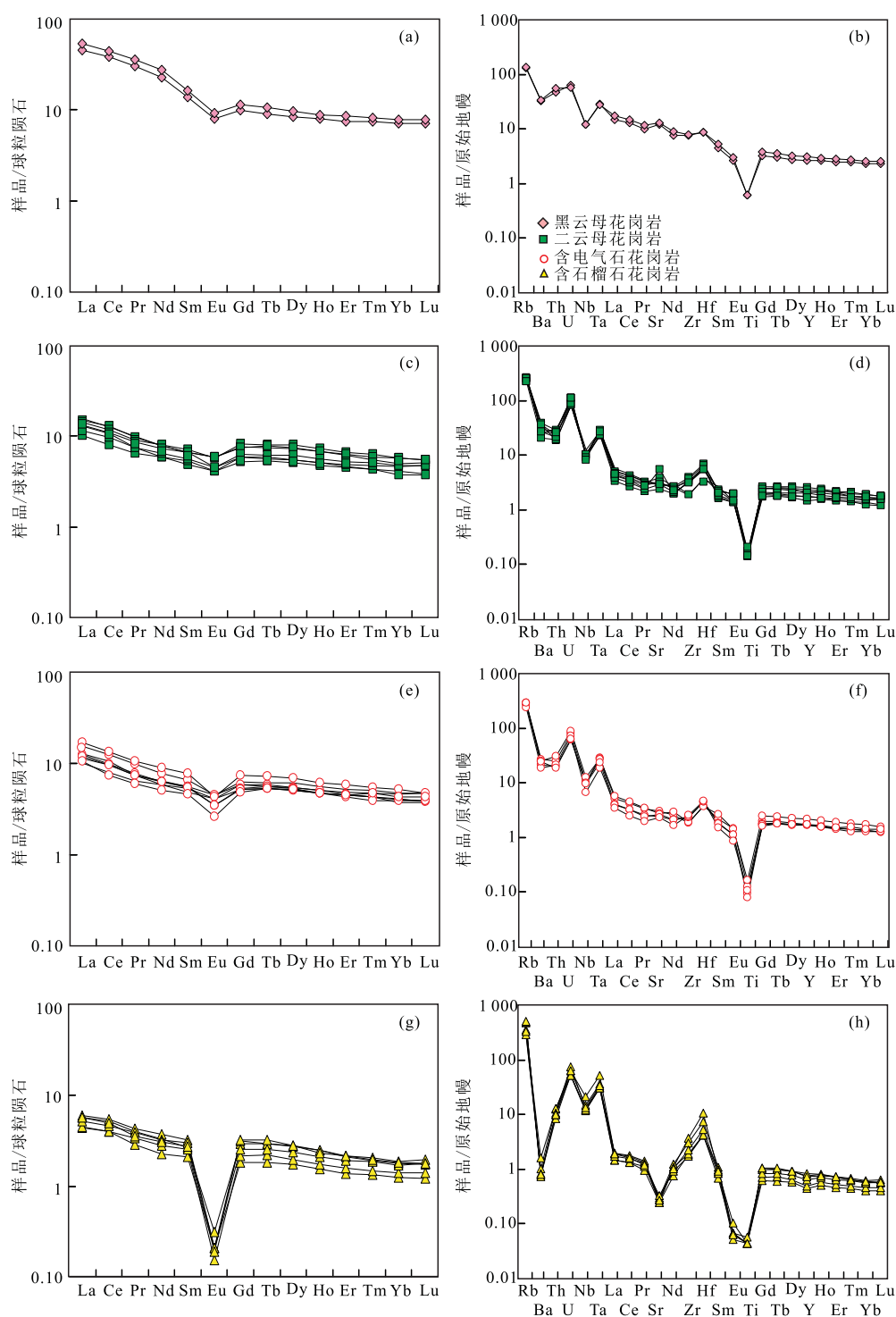


图 4 小铺地区淡色花岗岩稀土配分模式和微量元素蛛网图

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized spider diagrams for the leucogranites from Xiaopu area
球粒陨石及原始地幔标准值据 Sun and McDonough(1989)

幔标准化蛛网图中(图 4b),样品具有明显的 Ba、Nb、Ti 负异常以及 Rb、Th、U 等元素的正异常。

二云母花岗岩稀土元素总量 $\Sigma \text{REE} = 18.27 \times 10^{-6} \sim 31.73 \times 10^{-6}$, 轻重稀土分异不明显, $\text{La}_N/\text{Sm}_N = 1.91 \sim 2.63$, $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 2.21 \sim 3.47$, $\text{Gd}_N/$

$\text{Yb}_N = 1.27 \sim 1.52$, 具有轻稀土略微富集、重稀土平坦的稀土配分模式(图 4c), 具有轻微的 Eu 负异常 ($\delta \text{Eu} = 0.74 \sim 0.84$); 在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 4d), 样品具有明显的 Ba、Th、Nb、Ti 负异常以及 Rb、U、Ta、Hf 等元素的正异常。

含电气石花岗岩稀土元素及微量元素特征与二云母花岗岩类似,其稀土元素总量 $\Sigma\text{REE}=15.37 \times 10^{-6} \sim 24.99 \times 10^{-6}$, $\text{La}_\text{N}/\text{Sm}_\text{N}=2.17 \sim 2.35$, $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}=2.47 \sim 3.81$, $\text{Gd}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}=1.12 \sim 1.46$,轻重稀土分异不明显,具有轻稀土略富集、重稀土平坦的稀土配分模式(图 4e),并具有轻微的 Eu 负异常($\delta\text{Eu}=0.55 \sim 0.72$);在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 4f),样品具有明显的 Ba、Th、Nb、Ti 负异常以及 Rb、U、Ta、Hf 等元素的正异常。

含石榴石花岗岩稀土元素总量较低, $\Sigma\text{REE}=6.65 \times 10^{-6} \sim 9.85 \times 10^{-6}$,轻重稀土分异不明显, $\text{La}_\text{N}/\text{Sm}_\text{N}=1.73 \sim 2.14$, $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}=3.04 \sim 3.59$, $\text{Gd}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}=1.48 \sim 1.76$,呈现出“海鸥”型稀土分配模式(图 4g),同时显示强烈的 Eu 负异常($\delta\text{Eu}=0.06 \sim 0.11$);在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 4h),样品具有明显的 Ba、Nb、Sr、Eu、Ti 负异常以及 Rb、U、Ta、Hf 等元素的正异常。

4 锆石 U-Pb 年代学

本文对黑云母花岗岩以及含电气石花岗岩进行了锆石 U-Pb 年代学研究。其中黑云母花岗岩中的锆石多呈短柱状,长宽比介于 1:1.5~1:2,边界清晰、平直,柱面发育,内部可见清晰的岩浆震荡环带结构。利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年方法,本文选取了 25 个测点对黑云母花岗岩中的锆石进行了分析(结果见表 2),不同测点的 Th/U 值介于 0.15~0.57,平均值为 0.40, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于 274~332 Ma,去除由于不同程度 Pb 丢失造成的年龄谐和度较差的测点后,有 16 个测点在谐和线上构成了一个年龄集中区(图 5a),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权

平均年龄为 308.5 ± 2.2 Ma,代表了该岩石的形成时代。

含电气石花岗岩中的锆石多呈长柱状,长宽比介于 1:2~1:3,边界清晰、平直,柱面发育,部分锆石内部比较复杂,可见核一边结构,其中核部多为继承性锆石,部分具有港湾状外貌,边部则见明显的岩浆震荡环带结构。利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年方法,本文选取了 25 个测点对含电气石花岗岩中的锆石进行了分析(结果见表 2),不同测点的 Th/U 值介于 0.29~0.55,平均值为 0.42, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于 243~329 Ma,去除由于不同程度 Pb 丢失造成的年龄谐和度较差的测点后,有 12 个测点在谐和线上构成了一个年龄集中区(图 5a),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 307.8 ± 2.3 Ma,代表了该岩石的形成时代。

5 讨论

5.1 岩浆源区性质

小铺地区不同类型浅色花岗岩主要由碱性长石、斜长石、石英和黑云母、白云母组成,具有高硅、高碱,低钛、铁、镁、钙的特点,为弱过铝质钙碱性—钾玄岩系列岩石,与典型浅色花岗岩的矿物组合及岩石地球化学特征相似(郭素淑和李曙光,2007)。其中含电气石/石榴石花岗岩多呈脉状或岩枝状产于黑云母/二云母花岗岩中,黑云母含量较低,发育石榴石、电气石等岩浆演化晚期才出现的矿物;岩浆温度方面,利用 Miller *et al.* (2003)修正后的全岩锆饱和和温度计计算发现从黑云母花岗岩→二云母花岗岩→含电气石花岗岩→含石榴石花岗岩,初始岩浆温度总体有降低的趋势(分别为 $>741^\circ\text{C}$ 、 $>674^\circ\text{C}$ 、

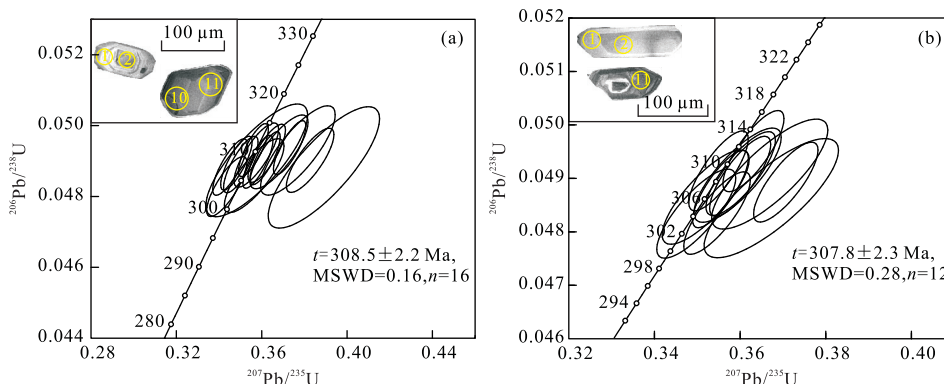


图 5 小铺地区黑云母浅色花岗岩(a)及电气石浅色花岗岩(b)锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.5 Zircon U-Pb concordia diagrams for the biotite (a) and tourmaline (b) leucogranites from Xiaopu area

$>640\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以及 $>637\text{ }^{\circ}\text{C}$);地球化学方面,从黑云母花岗岩 $\rightarrow$ 二云母花岗岩 $\rightarrow$ 含电气石花岗岩 $\rightarrow$ 含石榴石花岗岩, ΣREE 、 $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ 值、 Sr 、 Ba 含量以及 Zr/Hf 值逐渐降低, Rb 含量逐渐升高,指示岩浆演化程度逐渐增高。其中黑云母花岗岩、二云母花岗岩以及含电气石花岗岩的演化程度相对较低,含石榴石花岗岩具有强烈的 Eu 负异常以及“海鸥状”稀土分配模式,与高分异花岗岩地球化学特征相似 (Wu *et al.*, 2017)。

已有研究显示淡色花岗岩的源区具有多样性,其中砂泥质沉积岩部分熔融是淡色花岗岩的主要成因 (Braun *et al.*, 1996; Nabelek and Bartlett, 1998; Zhang *et al.*, 2004; King *et al.*, 2010; Gao and Zeng, 2014; 王晓先等, 2016)。另外基性下地壳在加厚背景下也可以发生部分熔融从而形成具有高 Sr/Y 和 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 特征的淡色花岗岩 (高利娥等, 2009, 2010; 谢克家等, 2010; Hou *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2014)。小铺淡色花岗岩的 Sr/Y 和 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值较低 (分别为 $1.64\sim 21.02$ 、 $0.60\sim 1.65$) ,与变基性岩在增厚地壳背景下部分熔融形成的淡色花岗岩不同,指示其源岩为沉积岩类。

Sylvester (1998) 研究认为 S 型花岗岩的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值可以示踪其源区成分,主导因素是源区长石/粘土的比率,通常情况下贫长石富粘土的泥质源岩部分熔融所产生的熔体 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 较低 (<0.30) ,而富长石贫粘土的砂质源岩部分熔融所产生的熔体 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 较高 (>0.30)。小铺各类淡色花岗岩中,黑云母花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值较高 ($0.46\sim 0.47$) ,在 $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Rb}/\text{Ba}$ 图解中 (图 6) ,样品点落在贫粘土区的杂砂岩附近,二云母花岗岩和含电气石花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值较低 ($0.11\sim 0.31$) ,在 $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Rb}/\text{Ba}$ 图解中 (图 6) ,样品点主要落在富粘土区的泥质岩附近,并有向砂质岩过渡的趋势,因此其源岩应该是含砂质的泥质沉积岩,二者近乎一致的稀土元素及微量元素配分模式 (图 4) 也暗示两类岩石可能具有相同的源区。

5.2 部分熔融机制

变沉积岩的熔融作用主要包括饱和和水固相线熔融、白云母脱水熔融以及黑云母脱水熔融 3 种机制 (Brown, 2002) ,不同的熔融机制会产生性质不同的熔体。其中饱和和水固相线熔融产生的熔体具有较低的 TFeO 、 MgO 、 TiO_2 、 Rb 以及较高的 K_2O 、 CaO 、 Sr 含量, Rb/Sr 值较低,该反应形成的熔体较少,摩尔百分数一般不超过 3%,同时地壳深部自由水的

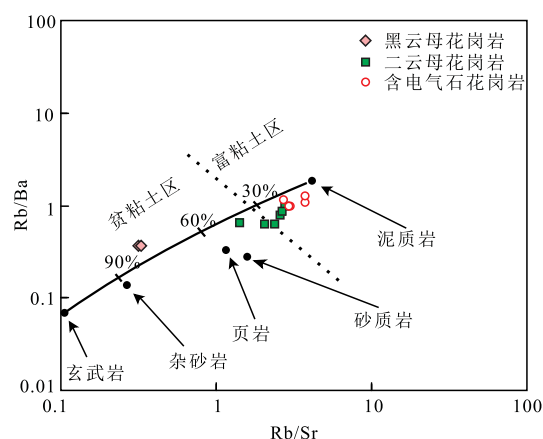


图 6 小铺淡色花岗岩类 $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Rb}/\text{Ba}$ 图解

Fig.6 $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Rb}/\text{Ba}$ diagram for the leucogranites from Xiaopu area

据 Sylvester (1998)

分布非常有限,因此变沉积岩的深熔作用主要是由在缺流体条件下白云母/黑云母的脱水熔融反应所控制的。相比而言,白云母脱水熔融产生的熔体同样具有较低的 TFeO 、 MgO 、 TiO_2 以及较高的 K_2O 含量,但其 CaO 、 Sr 含量较低, Rb 含量较高,该反应可以形成摩尔百分数约为 10% 的熔体,很多条带状混合岩和白云母花岗岩的形成都与该反应有关 (Inger and Harris, 1993; McDermott *et al.*, 1996; Harrison *et al.*, 1999; Brown, 2002; Gao and Zeng, 2014; Gao *et al.*, 2016)。而黑云母脱水熔融产生的熔体通常具有较高的 TFeO 、 MgO 以及 TiO_2 含量, Rb/Sr 值普遍较低,其初始熔融温度相对较高,可以形成摩尔含量百分数为 30%~40% 的熔体,可形成较大规模的二云母或黑云母花岗岩侵入体 (Stevens *et al.*, 1997)。

小铺地区黑云母花岗岩 $\text{TFeO}+\text{MgO}+\text{TiO}_2$ 含量与 CaO 含量较高 (分别为 $1.94\%\sim 1.97\%$ 、 $1.89\%\sim 1.92\%$) , Rb/Sr 值 ($0.31\sim 0.33$) 与 K_2O 含量 ($2.96\%\sim 3.07\%$) 较低,初始岩浆温度 $>741\text{ }^{\circ}\text{C}$;而二云母花岗岩与含电气石花岗岩具有较低的 $\text{TFeO}+\text{MgO}+\text{TiO}_2$ 含量与 CaO 含量 (分别为 $0.37\%\sim 0.88\%$ 、 $0.46\%\sim 1.39\%$) , Rb/Sr 值 ($1.41\sim 3.75$) 与 K_2O 含量 ($3.19\%\sim 5.62\%$) 较高,二者的初始岩浆温度分别 $>674\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $>640\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在 $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Ba}$ 图解中 (图 7) ,二云母花岗岩与含电气石花岗岩的 Rb/Sr 比值与 Ba 含量存在明显负相关关系。这说明小铺地区淡色花岗岩源岩的部分熔融机制也存在差异,其中黑云母花岗岩可能主要经黑云母脱水熔融形成,而二云母花岗岩与含电气石花岗岩的形成可

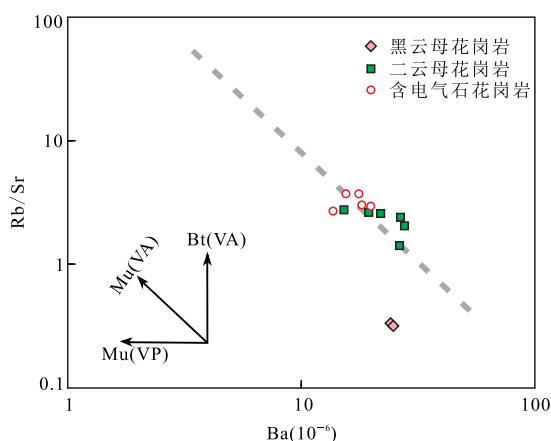


图 7 小铺淡色花岗岩类 Rb/Sr—Ba 图解

Fig. 7 Rb/Sr—Ba diagram for the leucogranites from Xiaopu area

据张宏飞等(2005); Mu(VA), 缺乏蒸汽相的白云母熔融反应; Bt(VA), 缺乏蒸汽相的黑云母熔融反应; Mu(VP), 饱和蒸汽相的白云母熔融反应

能以白云母脱水熔融为主, 对比变沉积岩相平衡模拟计算结果(魏春景和王伟, 2007), 黑云母花岗岩的初始岩浆温度略高于黑云母最低脱水熔融温度, 而二云母花岗岩与含电气石花岗岩初始岩浆温度与白云母最低脱水熔融温度接近, 均属于低温部分熔融。

5.3 构造意义

前人已在哈尔里克地区识别出大量中奥陶世—中志留世基性以及中酸性侵入岩, 侵位时代介于 462~430 Ma(曹福根等, 2006; 郭华春等, 2006; 马星华等, 2015; 刘亮等, 2017)。另外李江涛等(2017)的研究结果显示, 哈尔里克山主脊南北两侧的奥陶纪乌列盖组和大柳沟组中的火山岩组合为基性—中性—酸性火山岩/火山碎屑岩, 具有岛弧钙碱性火山岩地球化学特征, 形成时代为 469 ± 9 Ma。以上共同指示哈尔里克地区早在奥陶纪时期便已存在板块的俯冲消减作用, 但对于哈尔里克地区晚古生代构造背景, 目前仍存在争议: (1) 哈尔里克山泥盆纪—石炭纪时期主体为岛弧(Gu *et al.*, 1999; Chen *et al.*, 2011; 赵同阳等, 2014); (2) 本地区泥盆纪—石炭纪时期为弧后盆地, 该盆地可能在晚石炭世末闭合(赵明等, 2002; 李锦轶, 2004; 孙桂华等, 2005, 2007a; 罗婷等, 2018); (3) 哈尔里克地区在晚石炭世之前已完成了从大洋向大陆的转换, 到晚石炭世时已进入陆内演化阶段(王良玉等, 2016; 王超等, 2017); (4) 东天山哈尔里克地区碰撞时限介于晚石炭世—早二叠世(310~289 Ma), 之后转为伸展构造背景(顾连兴, 2006; 汪传胜等, 2009a, 2009b; 陈希节和舒良树,

2010; 陈希节等, 2016)。

赵明等(1997, 2002)的研究显示哈尔里克山南麓递进变质带经历了两期变质作用的叠加, 早期的高温—低压型热变质作用与弧后盆地拉伸时的幔源岩浆底侵有关; 晚期的中温—中压型区域变质作用与弧—陆碰撞有关。小铺淡色花岗岩呈岩脉状侵入到混合岩带中, 边界截然, 且未发生明显的变质、变形(图 2a)。在挤压应力背景下, 熔体通常汇聚于应力薄弱地带, 形状不规则, 而在伸展应力背景下, 熔体通常沿裂隙上升, 可呈岩墙/岩脉产出, 因此小铺淡色花岗岩的形成可能与弧—陆碰撞后深部物质的折返、造山带的伸展垮塌有关。年代学研究表明黑云母花岗岩的形成时代为 308.5 ± 2 Ma, 含电气石花岗岩的形成时代为 307.8 ± 2 Ma, 以上共同指示哈尔里克地区约在 308 Ma 前已经完成碰撞, 哈尔里克地区在晚石炭世末期已经进入陆内伸展演化阶段。

6 结论

(1) 岩石学和地球化学研究表明, 小铺地区黑云母花岗岩为砂质源岩经黑云母脱水熔融形成, 初始岩浆温度 > 741 °C; 二云母花岗岩和含电气石花岗岩为泥质源岩经白云母脱水熔融形成, 初始岩浆温度分别 > 674 °C 和 > 640 °C; 含石榴石花岗岩则为高分异型花岗岩, 初始岩浆温度 > 637 °C。

(2) 利用 LA-ICP-MS 微区原位锆石 U-Pb 定年获得黑云母花岗岩的形成时代为 308.5 ± 2.2 Ma, 含电气石花岗岩的形成时代为 307.8 ± 2.3 Ma, 二者在误差范围内近乎一致。

(3) 小铺地区的淡色花岗岩的形成与造山带的伸展垮塌有关, 标志着哈尔里克地区在晚石炭世末期已进入陆内演化阶段。

致谢: 野外工作和实验工作得到汪晓伟、崔方磊同志的帮助, 审稿专家细心审阅了全文并提出宝贵修改意见, 在此一并表示衷心感谢!

References

- Braun, I., Raith, M., Kumar, G.R.R., 1996. Dehydration-Melting Phenomena in Leptynitic Gneisses and the Generation of Leucogranites: A Case Study from the Kerala Khondalite Belt, Southern India. *Journal of Petrology*, 37(6): 1285—1305. <https://doi.org/10.1093/petrology/37.6.1285>
- Brown, M., 2002. Retrograde Processes in Migmatites and

- Granulites Revisited. *Journal of Metamorphic Geology*, 20 (1): 25 — 40. <https://doi.org/10.1046/j.0263-4929.2001.00362.x>
- Cao, F. G., Tu, Q. J., Zhang, X. M., et al., 2006. Preliminary Determination of the Early Paleozoic Magmatic Arc in the Karlik Mountains, East Tianshan, Xinjiang, China—Evidence from Zircon SHRIMP U-Pb Dating of Granite Bodies in the Tashuihe Area. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 923—927 (in Chinese with English abstract).
- Cao, F. G., Zhang, Y. P., Li, Y., et al., 2009. The Geological Character of Nanhuan System Qingshixia Formation Qincheng Hami, Xijiang. *Xinjiang Geology*, 27 (4): 303—307 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X. J., Shu, L. S., 2010. Features of the Post-Collisional Tectono-Magmatism and Geochronological Evidence in the Harlik Mt., Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (10): 3057—3064 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X. J., Shu, L. S., Santosh, M., 2011. Late Paleozoic Post-Collisional Magmatism in the Eastern Tianshan Belt, Northwest China: New Insights from Geochemistry, Geochronology and Petrology of Bimodal Volcanic Rocks. *Lithos*, 127 (3—4): 581—598. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.06.008>
- Chen, X. J., Zhang, K. H., Zhang, G. L., et al., 2016. Characteristics, Petrogenesis and Tectonic Implications of the Permian Omoertage Alkaline Granites in Harlik Area, Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35 (6): 929—946 (in Chinese with English abstract).
- Chung, S. L., Chu, M. F., Zhang, Y. Q., et al., 2005. Tibetan Tectonic Evolution Inferred from Spatial and Temporal Variations in Post-Collisional Magmatism. *Earth-Science Reviews*, 68(3—4): 173—196. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.05.001>
- Gao, L. E., Zeng, L. S., 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. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.01.003>
- Gao, L. E., Zeng, L. S., Hu, G. Y., 2010. High Sr/Y Two-Mica Granite from Quedang Area, Southern Tibet, China: Formation Mechanism and Tectonic Implications. *Geological Bulletin of China*, 29(2): 214—226 (in Chinese with English abstract).
- Gao, L. E., Zeng, L. S., Liu, J., et al., 2009. Early Oligocene Na-Rich Peraluminous Leucogranites in the Yardoi Gneiss Dome, Southern Tibet: Formation Mechanism and Tectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (9): 2289—2302 (in Chinese with English abstract).
- Gao, L. E., Zeng, L. S., Asimow, P. D., 2016. Contrasting Geochemical Signatures of Fluid-Absent versus Fluid-Fluxed Melting of Muscovite in Metasedimentary Sources: The Himalayan Leucogranites. *Geology*, 45 (1): 39—42. <https://doi.org/10.1130/g38336.1>
- Gu, L. X., Hu, S. X., Chu, Q., et al., 1999. Pre-Collision Granites and Post-Collision Intrusive Assemblage of the Kelameili-Harlik Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 73(3): 316—329. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.1999.tb00840.x>
- Gu, L. X., Zhang, Z. Z., Wu, C. Z., et al., 2006. Some Problems on Granites and Vertical Growth of the Continental Crust in the Eastern Tianshan Mountains, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1103—1120 (in Chinese with English abstract).
- Guo, H. C., Zhong, L., Li, L. Q., 2006. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of Quartz Diorite in the Koumenzi Area, Karlik Mountains, East Tianshan, Xinjiang, China, and Its Geological Significance. *Geological Bulletin of China*, 25 (8): 928—931 (in Chinese with English abstract).
- Guo, S. S., Li, S. G., 2007. Petrological and Geochemical Constraints on the Origin of Leucogranites. *Earth Science Frontiers*, 14(6): 290—298 (in Chinese with English abstract).
- Harrison, M. T., Grove, M., McKeegan, K. D., et al., 1999. Origin and Episodic Emplacement of the Manaslu Intrusive Complex, Central Himalaya. *Journal of Petrology*, 40 (1): 3—19. <https://doi.org/10.1093/petroj/40.1.3>
- Hou, Z. Q., Zheng, Y. C., Zeng, L. S., et al., 2012. Eocene-Oligocene Granitoids in Southern Tibet: Constraints on Crustal Anatexis and Tectonic Evolution of the Himalayan Orogen. *Earth and Planetary Science Letters*, 349—350: 38—52. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.06.030>
- Inger, S., Harris, N., 1993. Geochemical Constraints on Leucogranite Magmatism in the Langtang Valley, Nepal Himalaya. *Journal of Petrology*, 34(2): 345—368. <https://doi.org/10.1093/petrology/34.2.345>
- King, J., Harris, N., Argles, T., et al., 2010. Contribution of Crustal Anatexis to the Tectonic Evolution of Indian Crust beneath Southern Tibet. *Geological Society of America Bulletin*, 123(1—2): 218—239. <https://doi.org/10.1130/b30085.1>
- Li, J. T., He, X. F., Liu, L., et al., 2017. Ordovician Tectonic Evolution of Harlik in Eastern Tianshan of Xinjiang: Constraints from LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of Volcanic Rocks. *Geoscience*, 31 (3): 460—473 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., 2004. Late Neoproterozoic and Paleozoic Tectonic

- Framework and Evolution of Eastern Xinjiang, NW China, *Geological Review*, 50(3): 304—322 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., He, G. Q., Xu, X., et al., 2006. Crustal Tectonic Framework of Northern Xinjiang and Adjacent Regions and Its Formation, *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 148—168 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L., He, X. F., Li, J. T., et al., 2017. Petrogenesis and Tectonic Significances of the Qincheng Tianshengquan Pluton in the Harlik Orogen of Eastern Xinjiang, *Geological Science and Technology Information*, 36(2): 86—96 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. C., Wu, F. Y., Ji, W. Q., et al., 2014. Petrogenesis of the Ramba Leucogranite in the Tethyan Himalaya and Constraints on the Channel Flow Model, *Lithos*, 208—209: 118—136. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.08.022>
- Luo, T., Chen, J. P., Liao, Q. A., et al., 2018. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of the Late Carboniferous Bimodal Volcanic Rocks in the Balikun Area, Eastern Tianshan, *Earth Science*, 43(9): 3018—3035 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.603>
- Ma, X. H., Chen, B., Wang, C., et al., 2015. Early Paleozoic Subduction of the Paleo-Asian Ocean: Zircon U-Pb Geochronological, Geochemical and Sr-Nd Isotopic Evidence from the Harlik Pluton, Xinjiang, *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 89—104 (in Chinese with English abstract).
- McDermott, F., Harris, N. B. W., Hawkesworth, C. J., 1996. Geochemical Constraints on Crustal Anatexis: A Case Study from the Pan-African Damara Granitoids of Namibia, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(4): 406—423. <https://doi.org/10.1007/s004100050165>
- Miller, C. F., McDowell, S. M., Mapes, R. W., 2003. Hot and Cold Granites? Implications of Zircon Saturation Temperatures and Preservation of Inheritance, *Geology*, 31(6): 529. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0529:hacgio>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0529:hacgio>2.0.co;2)
- Nabelek, P. I., Bartlett, C. D., 1998. Petrologic and Geochemical Links between the Post-Collisional Proterozoic Harney Peak Leucogranite, South Dakota, USA, and Its Source Rocks, *Lithos*, 45(1—4): 71—85. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00026-7](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00026-7)
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63—81. <https://doi.org/10.1007/bf00384745>
- Rickwood, P. C., 1989. Boundary Lines within Petrologic Diagrams which Use Oxides of Major and Minor Elements, *Lithos*, 22(4): 247—263. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(89\)90028-5](https://doi.org/10.1016/0024-4937(89)90028-5)
- Şengör, A. M. C., Natal'in, B. A., Burtman, V. S., 1993. Evolution of the Altaid Tectonic Collage and Palaeozoic Crustal Growth in Eurasia, *Nature*, 364(6435): 299—307. <https://doi.org/10.1038/364299a0>
- Song, P., Tong, Y., Wang, T., et al., 2018. Zircon U-Pb Ages, Genetic Evolution and Geological Significance of Carboniferous Granites in the Harlik Mountain, East Tianshan, Xinjiang, *Geological Bulletin of China*, 37(5): 790—804 (in Chinese with English abstract).
- Stevens, G., Clemens, J. D., Droop, G. T. R., 1997. Melt Production during Granulite-Facies Anatexis: Experimental Data from “Primitive” Metasedimentary Protoliths, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 128(4): 352—370. <https://doi.org/10.1007/s004100050314>
- Sun, G. H., 2007. Structural Deformation and Tectonic Evolution of Harlik Mountain, in Xinjiang since the Paleozoic (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 1—226 (in Chinese with English abstract).
- Sun, G. H., Li, J. Y., Gao, L. M., et al., 2005. Zircon SHRIMP U-Pb Age of a Dioritic Pluton in the Harlik Mountain, Eastern Xinjiang, and Its Tectonic Implication, *Geological Review*, 51(4): 463—469 (in Chinese with English abstract).
- Sun, G. H., Li, J. Y., Zhu, Z. X., et al., 2007a. Detrital Zircon SHRIMP U-Pb Dating of Carboniferous Sandstone from the Southern Foot of the Harlik Mountains, Eastern Xinjiang, and Its Geological Implications, *Geology in China*, 34(5): 778—789 (in Chinese with English abstract).
- Sun, G. H., Li, J. Y., Zhu, Z. X., et al., 2007b. Zircons SHRIMP U-Pb Dating of Gneissoid-Biotitic Granite in Harlik Mountains, Eastern of Xinjiang and Its Geological Implications, *Xinjiang Geology*, 25(1): 4—10 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes, *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Sylvester, P. J., 1998. Post-Collisional Strongly Peraluminous Granites, *Lithos*, 45(1—4): 29—44. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00024-3](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00024-3)
- Wang, C., Ma, X. H., Chen, B., et al., 2017. Late Carboniferous Volcanism of the Harlik Orogenic Belt, Xinjiang: Zircon U-Pb Geochronological, Geochemical and Sr-Nd Isotopic Evidence, *Acta Petrologica Sinica*, 33(2):

- 440—454 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. S., Gu, L. X., Zhang, Z. Z., et al., 2009a. Petrogenesis and Geological Implications of the Permian High-K Calc-Alkaline Granites in Harlik Mountains of Eastern Tianshan, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1499—1511 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. S., Gu, L. X., Zhang, Z. Z., et al., 2009b. Petrogenesis and Tectonic Implications of the Permian Alkaline Granite and Quartz-Syenite Assemblage in Harlik Mountains, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3182—3196 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. Y., Liao, Q. A., Xiao, D., et al., 2016. Petrogenesis and Tectonic Significance of Early Carboniferous A-Type Granite in Harlik, Xinjiang. *Journal of Geomechanics*, 22(4): 1032—1048 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. X., Zhang, J. J., Wang, J. M., 2016. Geochronology and Formation Mechanism of the Paiku Granite in the Northern Himalaya, and Its Tectonic Implications. *Earth Science*, 41(6): 982—998 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.082>
- Wei, C. J., Wang, W., 2007. Phase Equilibria of Anatexis in High-Grade Metapelites. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 125—134 (in Chinese with English abstract).
- Windley, B. F., Alexeev, D., Xiao, W., et al., 2007. Tectonic Models for Accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31—47. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-022>
- Wu, F. Y., Liu, X. C., Ji, W. Q., et al., 2017. Highly Fractionated Granites: Recognition and Research. *Science China Earth Sciences*, 60(7): 1201—1219. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-5139-1>
- Xiao, W., Windley, B. F., Badarch, G., et al., 2004. Palaeozoic Accretionary and Convergent Tectonics of the Southern Altaids: Implications for the Growth of Central Asia. *Journal of the Geological Society*, 161(3): 339—342. <https://doi.org/10.1144/0016-764903-165>
- Xie, K. J., Zeng, L. S., Liu, J., et al., 2010. Late-Eocene Dala Adakitic Granite, Southern Tibet and Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1016—1026 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, L. S., Gao, L. E., 2017. Cenozoic Crustal Anatexis and the Leucogranites in the Himalayan Collisional Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1420—1444 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., Harris, N., Parrish, R., et al., 2004. Causes and Consequences of Protracted Melting of the Mid-Crust Exposed in the North Himalayan Antiform. *Earth and Planetary Science Letters*, 228(1—2): 195—212. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.09.031>
- Zhang, H. F., Nigel, H., Randall, P., et al., 2005. Geochemistry of North Himalayan Leucogranites: Regional Comparison, Petrogenesis and Tectonic Implications. *Earth Science*, 30(3): 275—288 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M., Shu, L. S., Wang, C. Y., 1997. Characteristics of Metamorphism in the Harlik Metamorphic Belt, East Xinjiang, and Its Tectonic Environment. *Geological Journal of China Universities*, 3(1): 40—50 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M., Shu, L. S., Zhu, W. B., et al., 2002. Zircon U-Pb Dating of the Rocks from the Harlik Metamorphic Belt in Eastern Xinjiang and Its Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 76(3): 379—383 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, T. Y., Xu, S. Q., Zhu, Z. X., et al., 2014. Geological and Geochemical Features of Carboniferous Volcanic Rocks in Bogda-Harlik Mountains, Xinjiang and Their Tectonic Significances. *Geological Review*, 60(1): 115—124 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹福根, 涂其军, 张晓梅, 等, 2006. 哈尔里克山早古生代岩浆弧的初步确定——来自塔水河一带花岗质岩体锆石 SHRIMP U-Pb 测年的证据. *地质通报*, 25(8): 923—927.
- 曹福根, 张玉萍, 李艳, 等, 2009. 新疆哈密沁城一带南华系青石峡组地质特征及意义. *新疆地质*, 27(4): 303—307.
- 陈希节, 舒良树, 2010. 新疆哈尔里克山后碰撞期构造—岩浆活动特征及年代学证据. *岩石学报*, 26(10): 3057—3064.
- 陈希节, 张奎华, 张关龙, 等, 2016. 新疆东天山哈尔里克二叠纪奥莫尔塔格碱性花岗岩特征、成因及构造意义. *岩石矿物学杂志*, 35(6): 929—946.
- 高利娥, 曾令森, 胡古月, 2010. 藏南确当地区高 Sr/Y 比值二云母花岗岩的形成机制及其构造动力学意义. *地质通报*, 29(2): 214—226.
- 高利娥, 曾令森, 刘静, 等, 2009. 藏南也拉香波早渐新世富钠过铝质淡色花岗岩的成因机制及其构造动力学意义. *岩石学报*, 25(9): 2289—2302.
- 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 等, 2006. 关于东天山花岗岩与陆壳垂向增生的若干认识. *岩石学报*, 22(5): 1103—1120.
- 郭华春, 钟莉, 李丽群, 2006. 哈尔里克山口门子地区石英闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义. *地质通报*, 25(8): 928—931.
- 郭素淑, 李曙光, 2007. 淡色花岗岩的岩石学和地球化学特征及其成因. *地学前缘*, 14(6): 290—298.
- 李江涛, 何学锋, 刘亮, 等, 2017. 新疆东天山哈尔里克奥陶纪的构造属性: 来自火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代

- 学与地球化学的制约.现代地质,31(3):460—473.
- 李锦轶,2004.新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变.地质论评,50(3):304—322.
- 李锦轶,何国琦,徐新,等,2006.新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨.地质学报,80(1):148—168.
- 刘亮,何学锋,李江涛,等,2017.新疆东部哈尔里克造山带沁城天生圈岩体岩石成因及其构造意义.地质科技情报,36(2):86—96.
- 罗婷,陈继平,廖群安,等,2018.东天山巴里坤地区晚石炭世双峰式火山岩年代学、地球化学及其构造意义.地球科学,43(9):3018—3035.
- 马星华,陈斌,王超,等,2015.早古生代古亚洲洋俯冲作用:来自新疆哈尔里克侵入岩的锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd 同位素证据.岩石学报,31(1):89—104.
- 宋鹏,童英,王涛,等,2018.新疆东天山哈尔里克山石炭纪花岗岩锆石 U-Pb 年龄、成因演化及地质意义.地质通报,37(5):790—804.
- 孙桂华,2007.新疆哈尔里克山古生代以来构造变形及构造演化(博士学位论文).北京:中国地质科学院,1—226.
- 孙桂华,李锦轶,高立明,等,2005.新疆东部哈尔里克山闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义.地质论评,51(4):463—469.
- 孙桂华,李锦轶,朱志新,等,2007a.新疆东部哈尔里克山南麓石炭纪砂岩碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义.中国地质,34(5):778—789.
- 孙桂华,李锦轶,朱志新,等,2007b.新疆东部哈尔里克山片麻状黑云母花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义.新疆地质,25(1):4—10.
- 王超,马星华,陈斌,等,2017.新疆哈尔里克山地区晚石炭世火山作用:锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学及 Sr-Nd 同位素研究.岩石学报,33(2):440—454.
- 汪传胜,顾连兴,张遵忠,等,2009a.东天山哈尔里克山区二叠纪高钾钙碱性花岗岩成因及地质意义.岩石学报,25(6):1499—1511.
- 汪传胜,顾连兴,张遵忠,等,2009b.新疆哈尔里克山二叠纪碱性花岗岩—石英正长岩组合的成因及其构造意义.岩石学报,25(12):3182—3196.
- 王良玉,廖群安,肖典,等,2016.新疆哈尔里克早石炭世 A 型花岗岩的岩石成因及构造意义.地质力学学报,22(4):1032—1048.
- 王晓先,张进江,王佳敏,2016.北喜马拉雅佩枯花岗岩年代学、成因机制及其构造意义.地球科学,41(6):982—998.
- 魏春景,王伟,2007.高级变质岩中深熔作用的相平衡研究.地学前缘,14(1):125—134.
- 谢克家,曾令森,刘静,等,2010.西藏南部晚始新世打拉埃达克质花岗岩及其构造动力学意义.岩石学报,26(4):1016—1026.
- 曾令森,高利娥,2017.喜马拉雅碰撞造山带新生代地壳深熔作用与淡色花岗岩.岩石学报,33(5):1420—1444.
- 张宏飞, Nigel, H., Randall, P., 等, 2005. 北喜马拉雅淡色花岗岩地球化学:区域对比、岩石成因及其构造意义.地球科学,30(3):275—288.
- 赵明,舒良树,王赐银,1997.东疆哈尔里克变质地带变质作用特征及形成构造环境研究.高校地质学报,3(1):40—50.
- 赵明,舒良树,朱文斌,等,2002.东疆哈尔里克变质带的 U-Pb 年龄及其地质意义.地质学报,76(3):379—383.
- 赵同阳,徐仕琪,朱志新,等,2014.新疆博格达—哈尔里克山地区石炭纪火山岩地质地球化学特征及其构造意义.地质论评,60(1):115—124.