

新疆西准噶尔库尔尕克希岩体年代学、地球化学特征及岩石成因

段丰浩¹, 李永军^{1,2}, 陈荣光³, 王冉^{1,2}, 支倩¹, 马勇林¹, 石歌⁴

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第一地质大队, 新疆 昌吉 831100; 4. 中国科学院大学 地球科学学院, 北京 100049)

摘要: 新疆西准噶尔构造带发育大量晚古生代中酸性侵入体, 其岩石成因和侵位期次对于认识该构造带的岩浆演化具有十分重要的意义。本文对库尔尕克希岩体进行了详细的野外地质调查、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年及岩石地球化学分析, 旨在查明其成岩时代和成因类型。结果表明, 该岩体出露面积仅约 0.55 km², 岩性主要为花岗闪长岩, 锆石 U-Pb 年龄为 312.9 ± 2.9 Ma ($n=20$, MSWD=0.072), 形成于晚石炭世早期。地球化学特征显示其为钙碱性弱过铝质 I 型花岗岩。岩体具有较高硅、中等铝, 富碱、贫镁, 富集 Rb、Ba、K 等大离子亲石元素, 强烈亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素和重稀土元素, 负 Eu 异常较微弱, $A/CNK=0.99 \sim 1.20$, 与区内别鲁阿嘎希、包古图等小岩体在成岩时代、地球化学特征等方面有着显著的相似性, 形成于晚石炭世早期与俯冲作用相关的岛弧环境, 其源岩更可能是受俯冲流体交代的亏损地幔衍生出来的年轻地壳物质。

关键词: 年代学; 地球化学; I 型花岗岩; 岛弧; 库尔尕克希; 西准噶尔

中图分类号: P588.12⁺1; P581; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)03-0295-17

Chronology, geochemical characteristics and petrogenesis of Kuergakexi granite in western Junggar Basin, Xinjiang

DUAN Feng-hao¹, LI Yong-jun^{1,2}, CHEN Rong-guang³, WANG Ran^{1,2}, ZHI Qian¹, MA Yong-lin¹ and SHI Ge⁴

(1. Earth Science and Resources College, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MLR, Xi'an 710054, China; 3. No. 1 Geological Survey Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resource Exploration, Changji 831100, China; 4. College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: There are a large number of late Paleozoic intermediate to acid intrusions exposed along the tectonic-magmatism belt of western Junggar Basin, Xinjiang. It is of great significance to know the magmatic evolution of this tectonic-magmatism belt through the petrogenesis and emplacement periods. However, there are still no accurate isotopic chronologic and geochemical data of partial small rock bodies, such as Kuergakexi granite, which has restricted the understanding of their genetic types and emplacement ages. In this paper, the petrogenetic age and genetic type of Kuergakexi granite were investigated through field geological survey, LA-ICP-MS

收稿日期: 2016-12-07; 接受日期: 2017-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41402044, 41273033, 41303027)

作者简介: 段丰浩(1991-), 男, 博士研究生, 构造地质学专业, E-mail: chddfh@163.com; 通讯作者: 李永军(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 从事构造地质学、区域地质调查研究, E-mail: yongjunl@chd.edu.cn。

zircon U-Pb isotopic dating and geochemical analysis. The results show that Kuergakexi granite is mainly composed of granodiorite with an outcrop area of 0.55 km², and prove that the zircons yielded a LA-ICP-MS U-Pb age of 312.9 ± 2.9 Ma ($n = 20$, MSWD = 0.072), indicating that intrusive time of the granodiorite is the early Late Carboniferous. The values of major elements indicate that these granodiorites are characterized by high Si, intermediate Al and rich alkali, and low Mg, with A/CNK ratios ranging from 0.99 to 1.20. The trace elements are enriched in large ion lithophile elements such as Rb, Ba, K, but strongly depleted in high field strength elements such as Nb, Ta, Ti, P and heavy rare earth elements, with slightly negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.68 \sim 0.82$). These features suggest that the Kuergakexi granite belongs to calc-alkaline series, weakly peraluminous I-type granite. A comparison between Kuergakexi granite and other small intrusions such as Bieluagaxi granite and Baogutu granite shows that they have significant similarities in petrogenic age and geochemical characteristics. It is thus held that the Junggar Ocean continued its deep subduction from the south to the north during the early Late Carboniferous. The source of the granodiorite might have been the lower juvenile crust derived from the depleted mantle that had been metasomatized by fluids released from subduction slabs.

Key words: chronology; geochemistry; I-type granite; island arc; Kuergakexi; western Junggar

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41402044, 41273033, 41303027)

西准噶尔构造带分布着大量晚古生代中酸性侵入体, 它们的侵位期次和成因类型对于揭露区域构造演化具有十分重要的意义(韩宝福等, 2006; Xiao *et al.*, 2008; 童英等, 2010; 高睿等, 2013)。前人对区域内大多数岩体进行了大量的地球化学和同位素年代学研究。从成岩时代上看, 以庙尔沟、铁厂沟等为主的碱性系列大岩基时代主要集中在 308 ~ 296 Ma, 但也不排除有多期次侵入的可能, 如韩宝福等(2006)利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法获得庙尔沟中粗粒花岗岩年龄为 327 ± 7 Ma; Gao 等(2014)对铁厂沟岩体花岗岩和红山岩体钾长花岗岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究, 分别得出了 331.9 ± 5.5 Ma 和 317.8 ± 2.2 Ma 的成岩年龄; 姜芸等(2015)对红山岩体花岗岩分别用 SIMS 和 LA-ICP-MS 法进行年代学研究, 同样得出了 315.7 ± 2.4 Ma 和 317.8 ± 3.8 Ma 的成岩年龄。地球化学特征揭示其多为 A2 型花岗岩(苏玉平等, 2006; Geng *et al.*, 2009; 庞振甲等, 2010; 王晓伟等, 2011; 冯乾文等, 2012; Gao *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2014; 姜芸等, 2015; 胡洋等, 2015)。而对于钙碱性系列以岩株或岩脉形式产出的中酸性小岩体(如包古图、别鲁阿嘎希、玉依塔勒盆克提等)而言, 侵位时代多集中在 319 ~ 310 Ma, 地球化学特征显示其多为 I 型花岗岩(高山林等, 2006; 贺敬博等, 2011; Shen *et al.*, 2012; 魏少妮等, 2015; 杨钢等, 2015; Cao *et al.*, 2016; 黄鹏辉等, 2016), 部分小岩体在上升侵位过程中发生过强烈的壳幔岩浆混合作用(康磊

等, 2009; 邹涛等, 2011; 晁文迪等, 2015; 徐倩等, 2016), 个别具有埃达克质岩石地球化学特征(张连昌等, 2006; Tang *et al.*, 2010; Shen *et al.*, 2012; 段丰浩等, 2015), 且大多数小岩体与铜、金等成矿关系密切, 它们是达尔布特构造-岩浆带和具有极大找矿潜力的西准噶尔岩浆成矿带的重要组成部分。

位于铁厂沟岩体东侧约 15 km 处的库尔尕克希岩体出露面积仅约 0.55 km², 然而该岩体尚缺乏系统的地球化学研究, 其侵位时代、岩石成因、类型如何如何? 与区域岩浆活动又有何关系? 要探讨这些问题, 年代学和地球化学工作十分必要。鉴于此, 本文拟通过详细的野外地质调查并结合 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年及岩石地球化学分析, 探讨其形成时代、成因类型及可能的地球动力学背景, 以期对区域晚古生代岩浆活动和构造演化的进一步研究提供基础资料。

1 区域地质概况

中亚造山带是世界上最大的增生型造山带之一(şengör *et al.*, 1993; Windley *et al.*, 2007), 也是全球显生宙大陆地壳生长最显著的地区(Jahn *et al.*, 2004; Xiao and Santosh, 2014)。西准噶尔位于中亚造山带西南缘, 是中亚古生代俯冲-增生复合造山带的重要组成部分(şengör *et al.*, 1993; Jahn *et al.*, 2004; 李锦轶等, 2006), 也是构造背景极为复杂、岩浆活动极其频繁、强烈的地区(韩宝福等,

2006; Xiao *et al.*, 2008; 高睿等, 2013)。依据物质组成及其构造属性差异, 以谢米斯台断裂为界可将西准噶尔增生造山带划分为南北两部分。北带主要以近 EW 向展布的古生代沉积-火山碎屑岩系及火山弧拼贴、碰撞为特征, 主要构造单元有早古生代博什库尔-成吉斯岩浆弧和晚古生代扎尔玛-萨吾尔岩浆弧, 两者以库吉拜-和布克赛尔-洪古勒楞蛇绿岩带为界(Xiao *et al.*, 2008); 南带 NE-NNE 向断裂十分发育, 如达尔布特、安齐、哈图以及巴尔鲁克等左行走滑断裂及其次级断裂, 该断裂构造体系对区内地层、岩浆岩、构造形态及矿化类型等起着重要的控制作用(陈宣华等, 2015; 魏永明等, 2015)。沿南带主要断裂发育多条蛇绿(混杂)岩带(何国琦等, 2007; 辜平等, 2009; 杨高等, 2012; Yang *et al.*, 2015; 杨高学, 2016)和大量中酸性侵入体, 岩体侵位时代多集中在晚石炭世—早二叠世(图 1)。已有地球化学资料显示该区花岗岩为 I-A 型花岗岩, 具有较高的正 ϵ_{Nd} 值和极其年轻的 Nd、Hf 模式年龄(Chen and Arakawa, 2005; 苏玉平等, 2006; Tang *et al.*, 2012a; Xu *et al.*, 2012), 与整个中亚

造山带出露的花岗岩基本一致, 且西准噶尔地区尚未有确凿古老变质基底存在的报道, 说明其可能主要由幔源的新生物质组成(Wu *et al.*, 2000; Chen and Jahn, 2004; Jahn *et al.*, 2004)。

区域内出露的地层主要为志留系—二叠系, 以石炭系分布面积最广(图 1)。其中志留系为一套深海相中基性火山熔岩、火山碎屑岩及细碎屑岩, 并夹有硅质岩。泥盆系以库鲁木迪组和巴尔雷克组为主, 主要由凝灰质粉砂岩、凝灰质砂岩、凝灰质砂砾岩组成。石炭系为一套火山-沉积建造, 主要出露包古图组和希贝库拉斯组。包古图组以细碎屑岩为主, 主要岩性为凝灰质粉砂岩、砂岩和沉凝灰岩, 夹有少量中酸性火山岩和灰岩条带, 为深水还原条件下的沉积。希贝库拉斯组主要为砾岩、含砾砂岩和粗砂岩, 整体为一套粗碎屑岩, 代表了浅水高能环境下的产物。该组与下伏包古图组呈角度不整合接触(李永军等, 2010), 两个组形成时代均为早石炭世(安芳等, 2009; 佟丽莉等, 2009; 孙羽等, 2014)。二叠系主要出露哈尔加乌组和卡拉岗组, 其中哈尔加乌组为一套杏仁状安山岩、玄武岩夹中

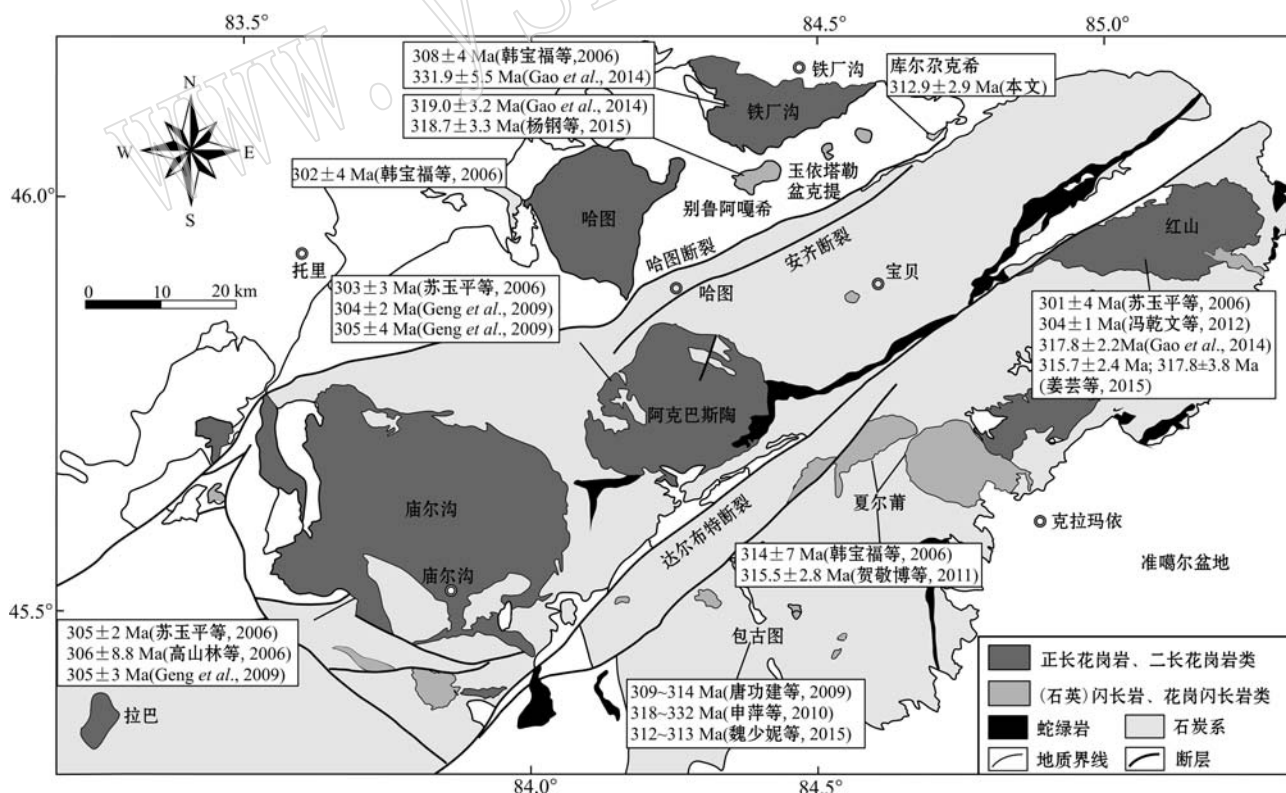


图 1 西准噶尔达尔布特构造-岩浆带地质简图(改自新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993; Yang *et al.*, 2014)

Fig. 1 Regional geological map of Darbut tectono-magmatic belt, Western Junggar(modified after BGMRX, 1993; Yang *et al.*, 2014)

性凝灰岩、火山碎屑岩, 卡拉岗组主要为英安斑岩、流纹岩、酸性凝灰岩及凝灰质角砾岩。

2 岩体地质和岩石学特征

库尔尕克希岩体位于哈图断裂以北, 铁厂沟岩体东侧约 15 km 处(图 1), 岩体地表出露面积有限, 显示为长轴近 NE 向展布的长条形小岩株, 出露面积仅约 0.55 km², 整体呈外倾侵入于中泥盆世巴尔雷克组(D₂b)凝灰质粉砂岩中。岩体外接触带角岩化发育, 内接触带具轻微绿泥石化、绿帘石化。新疆西准噶尔科克塔勒地区进行 1:5 万化探异常查证时发现了库尔尕克希金矿点, 金矿化蚀变带宽约 20 m, 北西向延伸约 200 m, 蚀变矿物主要为褐铁矿及毒砂, 刻槽样 Au 品位变化为 0.20~0.50 g/t, 捡块样 Au 品位最高达 0.84 g/t(新疆地矿局第一地质大队, 2015)^①, 显示其良好的找矿前景。岩体岩性主要为花岗闪长岩, 中细粒结构, 块状构造, 由斜长石、石英、钾长石和角闪石及少量黑云母组成(图 2), 并有副矿物石榴子石产出。其中斜长石呈自形-半自形板状, 粒径 0.2 mm×0.3 mm~0.5 mm×1.5 mm, 普遍发育聚片双晶, 部分发育环带结构, 可见绿泥石化、绢云母化, 含量 50%~55%; 石英多呈他形粒状, 粒径 0.2~1.5 mm, 具波状消光, 分布极不均匀, 含量约 20%; 钾长石自形程度较好, 粒径 0.5~1.0 mm, 具条纹结构, 为条纹长石, 含量约 10%; 角闪石呈柱状, 粒径 0.2~2 mm, 具闪石式解理, 可见聚片双晶, 含量约 5%~8%; 黑云母呈片状, 粒径 0.1~0.5 mm, 可见绿泥石化, 含量约 3%~5%(图 2c~2e); 石榴子石(<2%)截面为六边形自形晶, 多发生绿泥石化, 含有自形的短柱状磷灰石矿物包体(图 2f)。

3 样品采集与分析方法

本次研究于库尔尕克希岩体花岗闪长岩中采集 1 件新鲜样品用于 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年研究, 样品编号为 KEGRZ-1(采样点坐标: 46°05.746' N, 84°44.439'E); 共采集 7 件有代表性的新鲜样品进行岩石地球化学分析, 所有样品均采自基岩露

头。

锆石分选在西安瑞石地质科技有限公司完成。锆石的激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)原位 U-Pb 定年在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。实验采用的 ICP-MS 为美国 Agilent 公司生产的 Agilent 7500a, 激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas 200M, 激光剥蚀束斑直径约为 30 μm, 激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm。锆石年龄采用标准锆石 91500 作为外部标准物质。本文选择²⁹Si 作为内标, 采用 Glitter(ver4.0, Macquarie University)对锆石的同位素比值及元素含量进行计算, 最终的年龄计算及谐和图是采用 Iso-plot(ver3.0)完成, 详细的实验原理和流程及仪器参数参见柳小明等(2002)。

主量元素分析在长安大学国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室采用 X 射线荧光光谱法(XRF)完成, 仪器为日本岛津顺序扫描 LAB CENTER XRF-1800 型波长色散 X 射线荧光光谱仪, 分析精度优于 1%。烧失量(LOI)在烘箱中经 1000℃ 高温烘烤 90 min 后称重获得。微量元素分析在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室采用 perkin-Elmer Sciex Elan 6000 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)完成。ICP-MS 分析的相关仪器工作条件和方法参见相关文献(刘颖等, 1996)。微量元素中含量>10×10⁻⁶的样品分析精度优于 5%(2σ), 含量<10×10⁻⁶的样品的分析精度优于 10%(2σ), 所有稀土元素的分析精度优于 5%(2σ)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

本次处理所获得的花岗闪长岩锆石大多为无色透明或浅黄色, 晶形发育较好, 多呈正方双锥状、长柱状自形-半自形晶体, 长约 80~240 μm, 宽约 50~120 μm, 长宽比 5:1~1:1; 阴极发光图像(图 3a)显示大部分锆石均具有清晰的内部结构和典型的岩浆震荡环带, 属于岩浆结晶锆石, 可以反映岩浆冷却结晶及岩体侵位的时代。

锆石 U-Pb 测试分析结果列于表 1。从表中看

① 新疆地矿局第一地质大队. 2015. 新疆西准噶尔科克塔勒地区四幅 1:5 万(L45E012002 L45E012003 L45E012004 L45E012005)地球物理、地球化学普查报告.

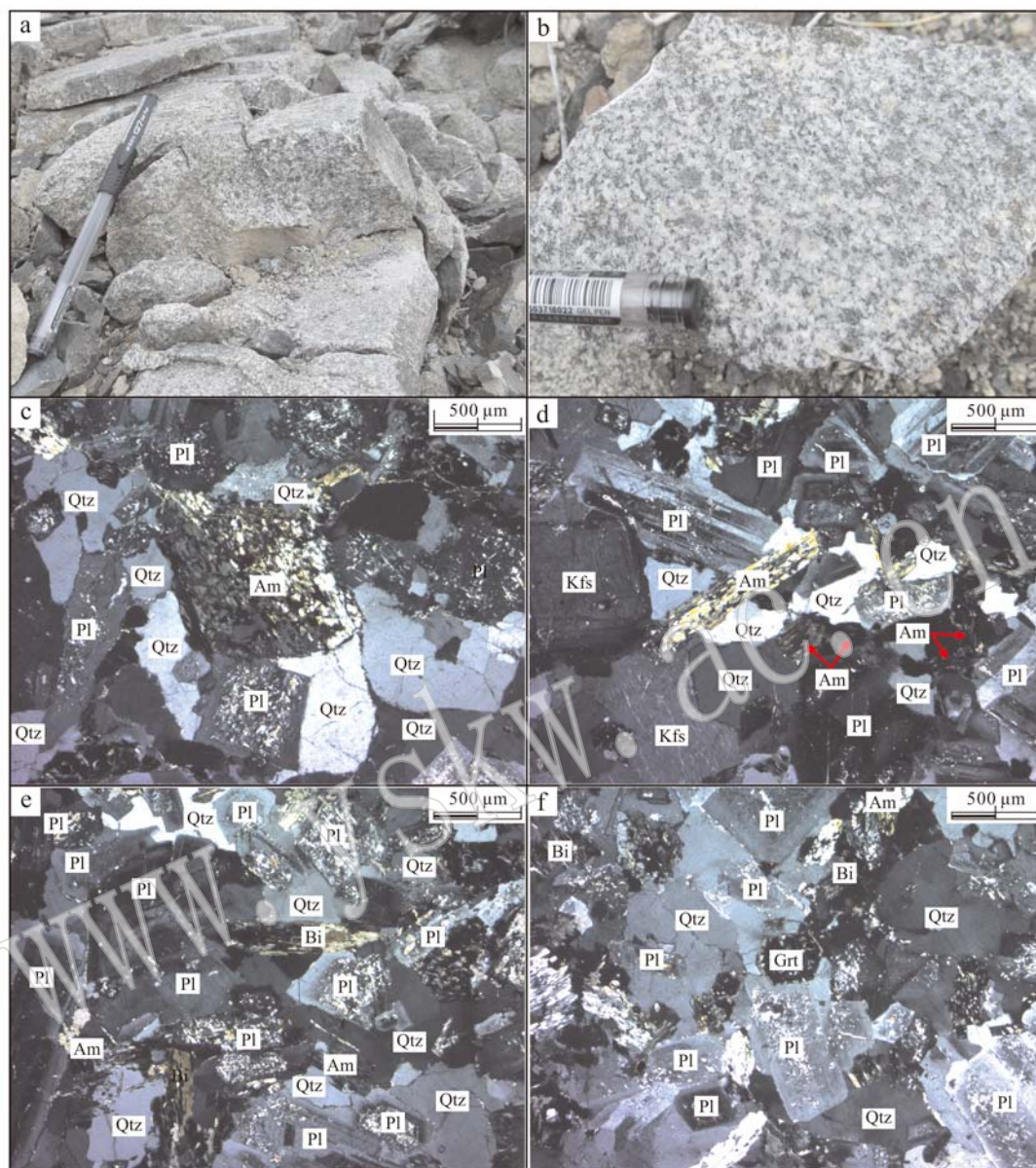


图2 库尔尕克希岩体野外及岩相学显微照片(正交偏光)

Fig. 2 Outcrop and microphotographs for Kuergakexi granite (crossed nicols)

Qtz—石英; Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Am—角闪石; Bi—黑云母; Grt—石榴子石

Qtz—quartz; Pl—plagioclase; Kfs—K-feldspar; Am—amphibole; Bi—biotite; Grt—garnet

出, 锆石颗粒的 Th 含量为 $34.15 \times 10^{-6} \sim 109.09 \times 10^{-6}$, U 含量为 $72.57 \times 10^{-6} \sim 272.25 \times 10^{-6}$, Th/U 值较高(0.39~0.55, 平均 0.43), 并呈现出良好的正相关, 指示锆石属典型岩浆成因。20 个测试点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值非常接近(0.051 23~0.055 96), 表明该批锆石为同期岩浆成因锆石。本次获得的所有测试点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值较集中(306~319 Ma), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权年龄为 $312.9 \pm 2.9 \text{ Ma}$ ($n = 20$, MSWD=0.072, 95% 置信度, 图 3b~3c), 时代为

晚石炭世早期, 这与其侵入于中泥盆世巴尔雷克组 (D_2b) 的地质产状关系是一致的, 可以代表该岩体的侵位年龄。

4.2 主量元素特征

库尔尕克希岩体岩石地球化学分析结果及有关参数列于表 2。从表中可以看出, 该岩体岩石样品主量元素具有中等的 SiO_2 (63.35%~64.65%)、 Al_2O_3 (17.15%~18.12%) 含量及较低的 MgO (2.70%~3.05%)、 CaO (1.67%~4.30%) 含量, 富

表 1 库尔奈克希岩体花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果
Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic analyses of the granodiorite for Kuergakexi granite

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						同位素年龄/Ma					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
KEG01	49.03	118.13	0.42	0.05380	0.00397	0.36210	0.02641	0.04888	0.00134	0.01508	0.00092	363	115	314	20
KEG02	86.47	157.46	0.50	0.05401	0.00458	0.36127	0.03015	0.04857	0.00142	0.01570	0.00088	371	136	313	22
KEG03	62.72	126.46	0.55	0.05230	0.00325	0.35983	0.02214	0.04995	0.00129	0.01596	0.00077	299	93	312	17
KEG04	35.82	72.57	0.49	0.05303	0.00581	0.36484	0.03930	0.04995	0.00163	0.01542	0.00131	330	183	316	29
KEG05	34.15	83.96	0.41	0.05202	0.00536	0.36069	0.03658	0.05033	0.00156	0.01516	0.00134	286	172	313	27
KEG06	49.74	116.20	0.43	0.05596	0.00525	0.38131	0.03509	0.04945	0.00152	0.01638	0.00118	451	150	328	26
KEG07	77.92	193.47	0.40	0.05166	0.00342	0.36045	0.02360	0.05062	0.00130	0.01627	0.00071	270	103	313	18
KEG08	109.09	272.25	0.40	0.05432	0.00317	0.36886	0.02127	0.04927	0.00123	0.01525	0.00061	384	85	319	16
KEG09	53.75	117.55	0.46	0.05375	0.00469	0.36641	0.03146	0.04944	0.00142	0.01843	0.00108	361	142	317	23
KEG10	46.09	116.83	0.39	0.05297	0.00463	0.36466	0.03139	0.04993	0.00142	0.01625	0.00107	328	144	316	23
KEG11	85.76	211.32	0.41	0.05215	0.00329	0.35949	0.02239	0.04999	0.00126	0.01438	0.00064	292	96	312	17
KEG12	41.22	106.84	0.39	0.05399	0.00469	0.36743	0.03135	0.04934	0.00141	0.01472	0.00098	371	141	318	23
KEG13	47.42	108.37	0.44	0.05273	0.00573	0.35613	0.03797	0.04895	0.00157	0.01633	0.00121	317	182	309	28
KEG14	63.63	160.37	0.40	0.05123	0.00444	0.35235	0.03000	0.04885	0.00141	0.01724	0.00109	251	141	306	23
KEG15	57.62	136.13	0.42	0.05311	0.00479	0.36330	0.03217	0.04957	0.00143	0.01548	0.00107	333	148	315	24
KEG16	58.28	140.49	0.41	0.05264	0.00393	0.36374	0.02670	0.05008	0.00132	0.01479	0.00089	313	119	315	20
KEG17	71.61	175.93	0.41	0.05192	0.00434	0.36372	0.02985	0.05076	0.00141	0.01839	0.00096	282	136	315	22
KEG18	61.21	155.69	0.39	0.05317	0.00384	0.36207	0.02570	0.04933	0.00130	0.01668	0.00092	336	113	314	19
KEG19	34.78	80.21	0.43	0.05352	0.00560	0.37289	0.03832	0.05047	0.00154	0.01676	0.00114	351	176	322	28
KEG20	53.51	125.94	0.42	0.05516	0.00407	0.38348	0.02779	0.05036	0.00132	0.01673	0.00087	419	115	330	20

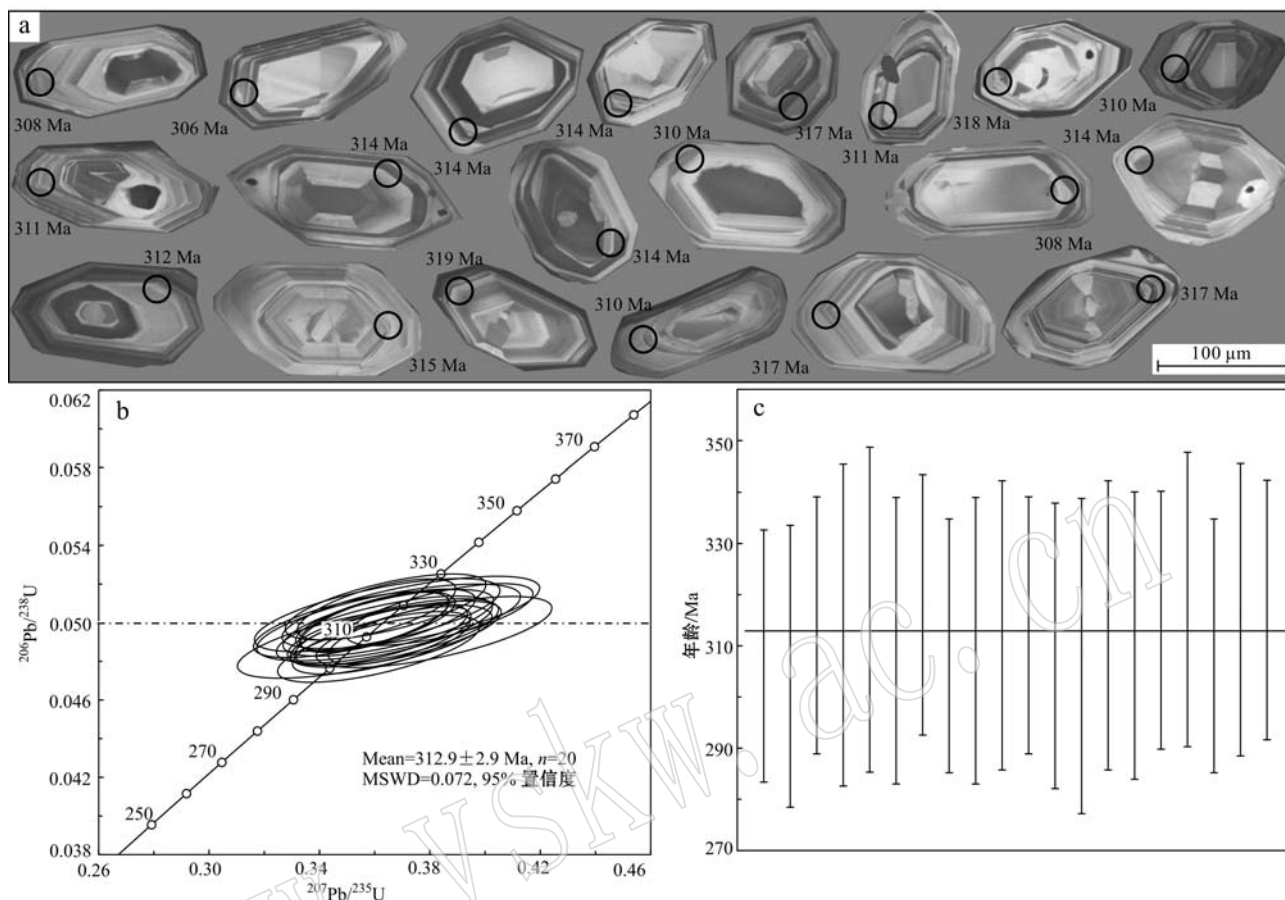


图3 库尔尕克希岩体花岗闪长岩锆石阴极发光(CL)图像及锆石 U-Pb 谐和图和年龄直方图

Fig. 3 Cathodoluminescence images of zircon grains from the granodiorite and the zircon U-Pb dating results and age histogram for Kuergakexi granite

碱且相对富钠 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 6.14\% \sim 7.40\%$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.16 \sim 1.55$), TiO_2 、 P_2O_5 、 MnO 含量均低于 1% 且变化范围较小 (分别为 $0.52\% \sim 0.63\%$ 、 $0.11\% \sim 0.14\%$ 、 $0.07\% \sim 0.08\%$)。所有样品 $\sigma < 4$ ($1.78 \sim 2.55$, 平均为 2.11), 属于钙碱性系列。

在 TAS 图解 (图 4a) 中, 绝大多数样品投影点落入亚碱性的花岗闪长岩区域; 铝饱和度指数 $A/\text{CNK} = 1.05 \sim 1.33$ (平均 1.11, 仅 2 样 > 1.10), $A/\text{NK} = 1.72 \sim 1.98$ (平均 1.88), 属于弱过铝质系列 (图 4b)。部分样品较高的 A/CNK 值可能与矿物中含少量石榴子石有关, 这也与样品 CIPW 标准矿物计算出现少量刚玉分子 ($0.98\% \sim 2.44\%$, 仅 1 样 4.8%, 平均 1.95%) 相一致, 而有别于 S 型花岗岩强烈富铝 ($A/\text{CNK} > 1.10$) 的特征 (Chappell and White, 1974)。

4.3 稀土和微量元素特征

库尔尕克希岩体岩石样品具有中等的稀土元素总量 ($\sum \text{REE} = 78.13 \times 10^{-6} \sim 85.08 \times 10^{-6}$, 平均为 80.38×10^{-6}), 且轻重稀土元素分异较明显, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 5.23 \sim 6.68$ 。 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值均大于 1 ($2.55 \sim 3.26$), 反映轻稀土元素之间分馏程度较好, 而未发生明显的重稀土分馏 [$(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.39 \sim 1.43$]; 负 Eu 异常较微弱 ($\delta \text{Eu} = 0.68 \sim 0.82$)。球粒陨石标准化的稀土元素配分曲线显示所有样品均具有轻稀土元素富集而重稀土元素相对亏损的右倾型特征, 与位于西准噶尔南部哈图断裂以西的别鲁阿嘎希 I 型花岗岩体稀土元素配分模式极为相似 (图 5a, 杨钢等, 2015)。

如表 2 所示, 岩石样品大离子亲石元素 (LILE) 含量较高 (如 $\text{Ba} = 586.80 \times 10^{-6} \sim 721.50 \times 10^{-6}$, 平均 674.49×10^{-6} ; $\text{Sr} = 243.70 \times 10^{-6} \sim 325.70 \times 10^{-6}$, 平均 295.46×10^{-6}), 高场强元素 (HFSE) 含

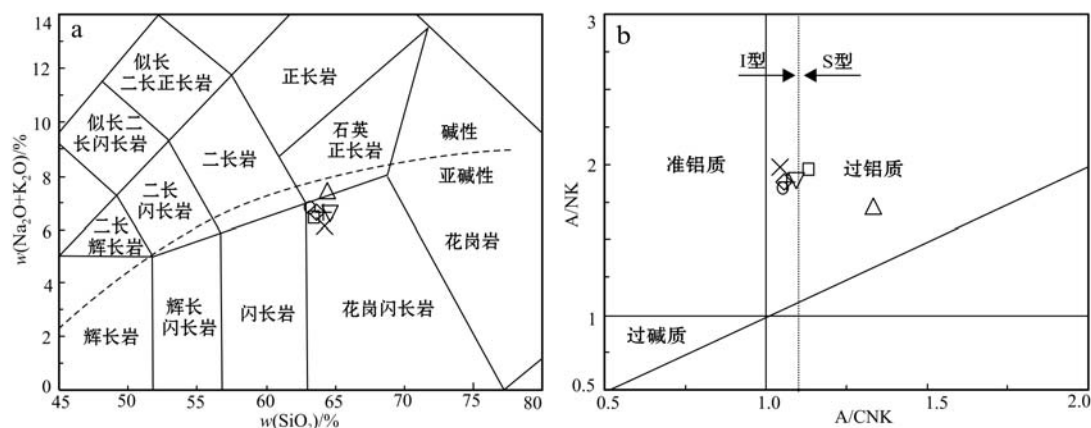


图 4 库尔尕克希岩体主量元素相关图解

Fig. 4 Major elements relationship for Kuergakexi granite

量较低(如 $\text{Nb} = 4.91 \times 10^{-6} \sim 5.71 \times 10^{-6}$, 平均 5.34×10^{-6} ; $\text{Ta} = 0.40 \times 10^{-6} \sim 0.43 \times 10^{-6}$, 平均 0.41×10^{-6})。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 5b)中,所有样品均表现为富集大离子亲石元素(如 Rb、Ba、K、Th 和 U)和 LREE, 亏损高强度场元素 Nb、Ta、Ti、P 和 HREE, 呈现明显的“TNT”负异常, 总体表现出与俯冲带相关的弧岩浆相似的地球化学特征(Hole *et al.*, 1984)。库尔尕克希岩体与别鲁阿嘎希岩体极为相似的稀土、微量元素分布模式(图 5), 表明两者可能成因相似。

5 讨论

5.1 岩石类型

岩相学观察显示库尔尕克希岩体花岗闪长岩中有较多角闪石及少量石榴子石产出(图 2c~2f), 岩石地球化学研究表明其具有中等硅、铝, 富碱, 贫钾、钙和镁, 负 Eu 异常较微弱($\delta\text{Eu} = 0.68 \sim 0.82$), FeO^T/MgO 值(1.42~1.51)和 $10^4 \text{ Ga}/\text{Al}$ 值(1.87~1.99)较低的特征。岩体 P_2O_5 随 SiO_2 含量增加而降低, 呈现良好的负线性相关, Pb 随 SiO_2 含量的增加而增加, 表现良好的正相关, 显示出明显的 I 型演化趋势(图 6, Chappell and White, 1992)。此外, 岩石样品锆石饱和温度变化于 $762 \sim 785^\circ\text{C}$ (表 2), 平均 777°C , 与 King 等(1997)报道的澳大利亚 Lachlan 褶皱带未分异的 I 型花岗岩平均值 781°C 非常接近, 而远低于 Lachlan 褶皱带未分异的铝质 A 型花岗岩锆石饱和温度(平均 839°C)(King *et al.*, 1997)。岩石中虽有少量石榴子石产出, 但前人研

究表明, 石榴子石的出现并不能作为鉴定 S 型花岗岩的有效标志(Miller, 1985), 如于津海等(2004)在闽东南识别并报道了含石榴子石 I 型花岗岩; 王冉等(2015)同样报道了在距本岩体直线距离约 15 km 处的玉依塔勒盆克提 I 型花岗岩体(位置见图 1)中岩浆结晶成因石榴子石的存在。岩石中未出现堇青石等富铝特征矿物, 不同于典型的强过铝质 S 型花岗岩。因此, 库尔尕克希岩体应属钙碱性弱过铝质 I 型花岗岩。

5.2 岩石成因及源区

库尔尕克希岩体富集 Rb、Ba 等大离子亲石元素和轻稀土, 强烈亏损 Nb、Ta、Ti 等高强度场元素和重稀土(图 5), 呈现消减带岩浆岩特征(Hole *et al.*, 1984)。在弧岩浆中, Th/Yb 值可以指示沉积物或其熔体参与程度, 而 Ba/La 值则可以衡量流体参与程度(Woodhead *et al.*, 2001)。样品 Th/Yb 值(2.22~3.43, 平均 2.86)较低且变化范围较小, 表明其地球化学组成受消减沉积物的加入程度较低, 而 Ba/La 值(40.39~51.07, 平均 45.18)较高且变化范围较大, 则反映俯冲板片流体加入程度较高, 指示俯冲带流体在成岩过程中具有重要贡献(图 7a), Rb/Y-Nb/Y 图解中样品投影点同样体现了流体交代富集的变化趋势(图 7b)。

本文所有样品的 $\text{Mg}^\#$ 值较高(51.39~55.62, 平均 54.90), 表明岩浆上升过程中经历了与地幔楔的相互作用, 受到地幔楔的混染(Kay, 1978)。Zr、Nb 属于不活动元素, 能有效地区别岩浆源区属性(Pearce and Cann, 1973)。库尔尕克希岩体花岗闪长岩样品具有低的 Zr、Nb 含量, 显示亏损地幔性质

表 2 库尔尕克希岩体主量元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果Table 2 The concentrations of major elements ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) for Kuergakexi granite

岩性	W1-1	W2-1	W3-1	W4-1	W5-1	W6-1	W7-1
SiO ₂	63.35	63.64	64.13	64.22	64.47	63.66	64.65
TiO ₂	0.62	0.63	0.52	0.54	0.57	0.58	0.55
Al ₂ O ₃	17.46	17.61	17.41	17.33	18.12	17.36	17.15
TF ₂ O ₃	4.81	4.94	4.46	4.51	4.72	4.66	4.54
MnO	0.08	0.07	0.07	0.08	0.07	0.08	0.08
MgO	2.99	3.05	2.77	2.77	2.85	2.95	2.70
CaO	3.81	3.53	3.89	4.30	1.67	3.96	3.63
Na ₂ O	4.01	3.75	3.67	3.74	4.50	3.65	3.53
K ₂ O	2.74	2.63	2.97	2.40	2.90	2.98	3.03
P ₂ O ₅	0.14	0.14	0.12	0.11	0.12	0.13	0.12
LOI	2.62	3.12	3.78	2.51	2.70	2.77	2.81
TOTAL	98.72	99.38	99.17	99.40	99.27	98.08	99.11
A/NK	1.83	1.95	1.88	1.98	1.72	1.88	1.89
A/CNK	1.06	1.14	1.07	1.05	1.33	1.06	1.09
Na ₂ O + K ₂ O	6.74	6.38	6.64	6.14	7.40	6.63	6.56
Na ₂ O/K ₂ O	1.46	1.43	1.24	1.55	1.55	1.23	1.16
FeO ^T /MgO	1.45	1.46	1.45	1.47	1.49	1.42	1.51
δ	2.23	1.97	2.08	1.78	2.55	2.13	1.99
Mg [#]	55.16	55.02	55.16	54.84	54.42	55.62	54.09
t _{Zr} /°C	784	785	770	762	780	779	778
Rb	53.55	56.34	63.52	47.49	71.32	66.58	65.87
Sr	325.70	320.10	283.40	305.80	243.70	299.30	290.20
Y	17.31	18.70	16.47	17.41	15.37	17.07	16.83
Zr	142.60	151.90	130.60	133.00	131.90	147.30	138.00
Nb	5.34	5.71	4.91	5.33	5.20	5.55	5.31
Ba	711.90	703.60	663.30	586.80	721.50	655.60	678.70
La	13.94	14.28	15.14	14.53	15.25	15.11	16.55
Ce	29.31	30.18	30.87	30.11	30.59	31.03	33.26
Pr	3.76	3.92	3.77	3.77	3.73	3.89	4.07
Nd	15.18	16.13	14.82	15.04	14.52	15.47	15.83
Sm	3.38	3.62	3.18	3.25	3.04	3.31	3.28
Eu	0.88	0.88	0.85	0.86	0.67	0.87	0.85
Gd	3.15	3.32	2.99	3.06	2.85	3.09	3.07
Tb	0.51	0.55	0.47	0.50	0.45	0.50	0.48
Dy	3.08	3.27	2.88	3.05	2.75	3.01	2.96
Ho	0.67	0.70	0.62	0.65	0.58	0.65	0.63
Er	1.84	1.97	1.72	1.81	1.66	1.81	1.77
Tm	0.28	0.30	0.27	0.28	0.26	0.28	0.27
Yb	1.84	1.96	1.79	1.82	1.67	1.82	1.78
Lu	0.30	0.31	0.28	0.29	0.27	0.29	0.28
Hf	4.11	4.35	3.83	3.84	3.88	4.20	4.06
Ta	0.40	0.43	0.41	0.42	0.41	0.41	0.42
Pb	8.33	8.36	9.42	9.73	8.37	9.41	10.32
Th	4.33	4.35	5.37	5.16	5.32	5.44	6.09
U	1.16	1.18	1.29	0.92	1.27	1.27	1.04
Ga	18.16	18.57	17.20	18.08	18.22	18.33	17.96
ΣREE	78.13	81.40	79.64	79.01	78.29	81.13	85.08
LREE/HREE	5.69	5.57	6.23	5.90	6.47	6.09	6.57
δEu	0.81	0.76	0.82	0.82	0.68	0.82	0.80
(La/Yb) _N	5.44	5.23	6.08	5.74	6.54	5.95	6.68
(La/Sm) _N	2.66	2.55	3.08	2.89	3.24	2.95	3.26
(Gd/Yb) _N	1.42	1.40	1.39	1.39	1.41	1.40	1.43

注: TF₂O₃ 表示全铁; Mg[#] = $100 \times \text{Mg}^{2+} / (\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$; δ = $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})^2 / (\text{SiO}_2 - 43)$; FeO^T 是在去过烧失量后, 按照侵入岩相关标准铁调整计算所得; δEu = $2 \times \text{Eu}_N / (\text{Sm}_N + \text{Gd}_N)$; 比值中的下标 N 为球粒陨石标准化值, 标准化值引自 Sun and McDonough, 1989。

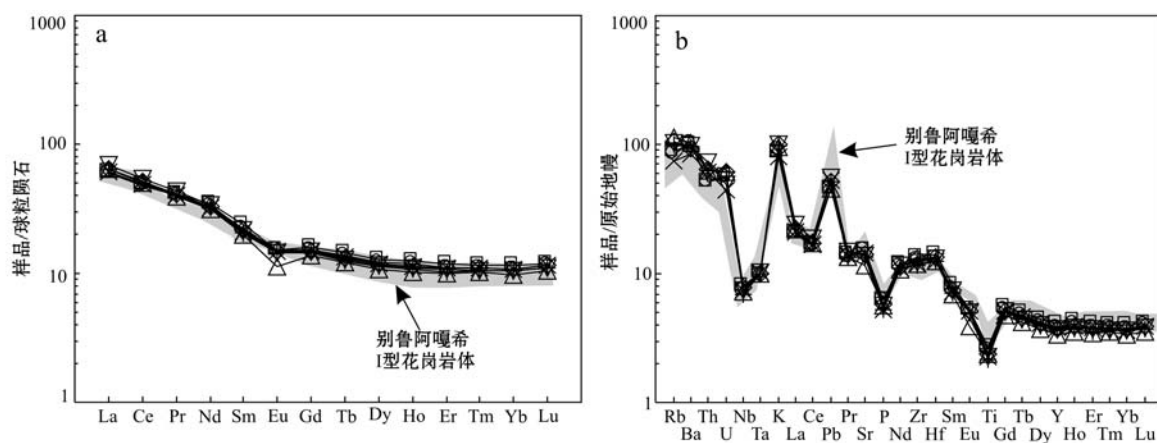


图 5 库尔尕克希岩体稀土元素配分曲线图(a)和微量元素蛛网图(b)(标准化值据 Sun and McDonough, 1989; 阴影区据杨钢等, 2015)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace elements spider diagrams (b) for Kuergakexi granite (normalized values after Sun and McDonough, 1989; shaded areas after Yang Gang *et al.*, 2015)

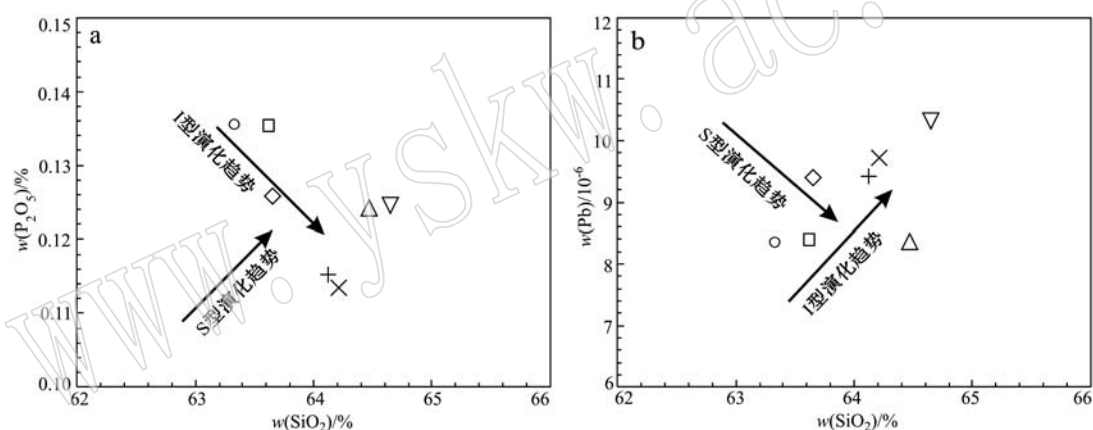


图 6 库尔尕克希岩体 $P_2O_5 - SiO_2$ 、 $Pb - SiO_2$ 变化趋势图(底图据 Chappell and White, 1992)

Fig. 6 $P_2O_5 - SiO_2$ and $Pb - SiO_2$ variation diagrams for Kuergakexi granite (after Chappell and White, 1992)

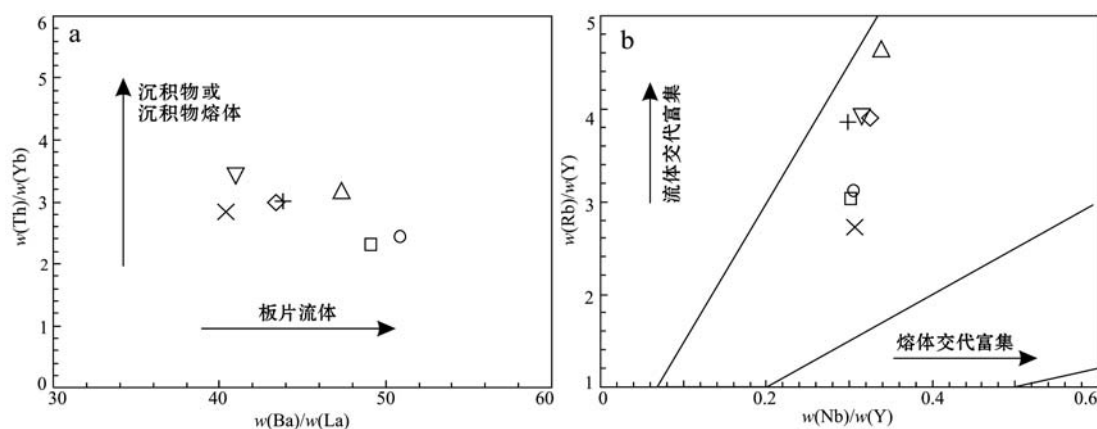


图 7 库尔尕克希岩体 $Th/Yb - Ba/La$ (a)和 $Rb/Y - Nb/Y$ (b)图解(据 Woodhead 等, 2001)

Fig. 7 $Th/Yb - Ba/La$ (a) and $Rb/Y - Nb/Y$ (b) discrimination diagrams for Kuergakexi granite (after Woodhead *et al.*, 2001)

(图 8), 但岩石样品 SiO_2 含量变化于 63.35% ~ 64.65%, 而上地幔岩浆不可能直接分异出高硅的花岗质岩浆。如果库尔尕克希岩体花岗闪长岩是由幔源基性岩浆直接分异的产物, 其周围应该有大量同时期的基性岩出露, 然而西准噶尔地区并未出现与花岗岩类时空关系密切且大面积分布的基性-超基性岩, 表明其源区不大可能是直接来自亏损地幔的基性岩浆。结合西准噶尔地区发育大量晚古生代花岗岩类, 加之其普遍具有高的正 ϵNd 值和极其年轻的 Nd、Hf 同位素模式年龄等特点 (Wu *et al.*, 2000; Chen and Jahn, 2004; Jahn *et al.*, 2004; 苏玉平等, 2006) 以及该区尚未有确凿有关古老变质基底发现和报道的事实 (李锦轶等, 2006), 我们认为库尔尕克希花岗闪长岩的源岩更可能是受俯冲流体交代的亏损地幔衍生出来的年轻地壳物质。

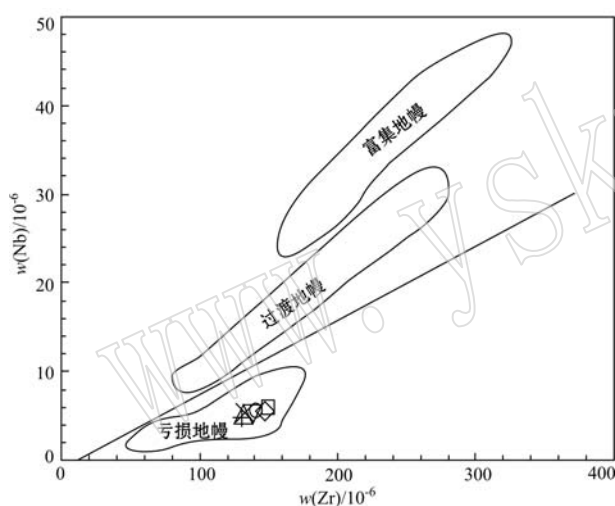


图 8 库尔尕克希岩体 Nb-Zr 图解

Fig. 8 Nb-Zr discrimination diagram for Kuergakexi granite

5.3 地球动力学背景

西准噶尔南部地区晚古生代岩浆活动强烈, 火山岩和侵入岩分布广泛, 峰期主要为晚石炭世一早二叠世 (韩宝福等, 2006; Xiao *et al.*, 2008; Geng *et al.*, 2009; 童英等, 2010; 高睿等, 2013)。关于区域晚石炭世的构造背景目前仍然存在着一些不同的认识, 一些学者通过对区内出露的大量 A 型花岗岩以及基性岩墙群等研究, 认为区域晚石炭世为后碰撞伸展环境, 且一直持续到早二叠世 (李辛子等, 2004; Chen and Arakawa, 2005; 韩宝福等, 2006; 苏玉平等, 2006; 高睿等, 2013; 胡洋等, 2015); 而另一些学者通过对区内典型的 I 型花岗岩 (319 ~

310 Ma; 贺敬博等, 2011; 杨钢等, 2015; 杨猛等, 2015; Cao *et al.*, 2016; 徐倩等, 2016)、赞岐质高镁安山岩 (321 ~ 291 Ma; Yin *et al.*, 2010, 2015; Ma *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2016)、埃达克岩 (316 ~ 312 Ma; 张连昌等, 2006; Shen *et al.*, 2009; Tang *et al.*, 2010; 段丰浩等, 2015) 及基性火山岩 (315 ~ 303 Ma; Tang *et al.*, 2012b; 向坤鹏等, 2015; 李永军等, 2016) 研究, 认为区域晚石炭世一早二叠世为与俯冲作用有关的岛弧环境。本文也支持这一观点。

区域内大多数中酸性侵入体已有大量的岩石地球化学和同位素年代学数据积累。系统梳理前人资料可知, 侵位于 319 ~ 310 Ma 的中酸性小岩体岩性主要以花岗闪长岩、(石英)闪长岩类为主, 地球化学特征显示其多为 (高钾) 钙碱性系列 I 型花岗岩 (图 9a); 而侵位于 308 ~ 296 Ma 以正长花岗岩及二长花岗岩类为主的大岩基, 地球化学特征揭示其多为碱性系列 A 型花岗岩 (图 9a), 表明区域晚石炭世一早二叠世可能存在着性质不同的两期岩浆活动。在花岗岩微量元素判别图解 (图 9b) 中, 侵位于 319 ~ 310 Ma 的中酸性小岩体样品投影点均落入火山弧花岗岩区, 而侵位于 308 ~ 296 Ma 的花岗岩基样品投影点部分落入火山弧花岗岩区, 部分落入板内花岗岩过渡区域, 可能代表区域岛弧俯冲挤压体制向后碰撞伸展体制的转换。然而, 两期岩浆活动间隔时间过短 (< 5 Ma), 而在这么短的时间里发生区域构造体制的突变, 可能性似乎不大, 这也进一步佐证西准噶尔地区在晚石炭世一早二叠世仍为岛弧俯冲体系这一观点。

本次获得库尔尕克希岩体花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 312.9 ± 2.9 Ma, 时代为晚石炭世早期, 该结果与区内别鲁阿嘎希岩体等具 I 型花岗岩特征的小岩体成岩时代基本一致, 证实这些小岩体是近同期形成的, 可能为同一地球动力学背景下的产物。岩相学及岩石地球化学特征表明库尔尕克希岩体为钙碱性弱过铝质 I 型花岗岩, 富集大离子亲石元素 Rb、Ba, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素和重稀土元素, 总体表现出与俯冲带相关的弧岩浆相似的地球化学特征 (Hole *et al.*, 1984), 与区内别鲁阿嘎希等小岩体具有极为相似的稀土、微量元素分布模式 (图 5), 表明它们成因相似。综合区域岩浆活动及构造演化, 认为库尔尕克希岩体与区内如别鲁阿嘎希等以石英闪长岩、花岗闪长岩类为主的小岩体在

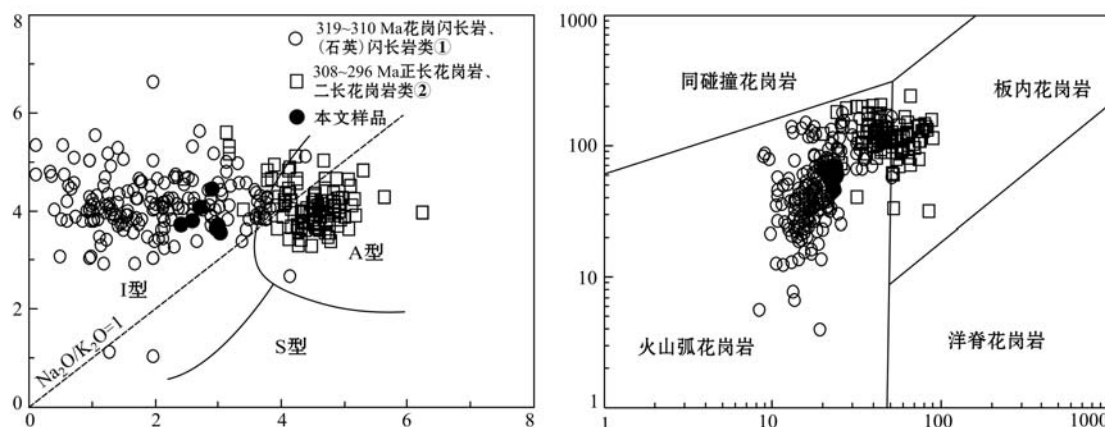


图 9 西准噶尔南部地区中酸性侵入体 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ (a, 据 Collins 等, 1982)、 $\text{Rb}-\text{Y}+\text{Nb}$ 图解 (b, 据 Pearce 等, 1984)

Fig. 9 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ (a, after Collins *et al.*, 1982) and $\text{Rb}-\text{Y}+\text{Nb}$ (b, after Pearce *et al.*, 1984) diagrams for intermediate-acidic intrusions of south western Junggar

①中数据引自高山林等, 2006; 张连昌等, 2006; Shen *et al.*, 2009; Tang *et al.*, 2010; 贺敬博等, 2011; Shen and Pan, 2013; Gao *et al.*, 2014; 杨钢等, 2015; 杨猛等, 2015; 魏少妮等, 2015; Cao *et al.*, 2016; 徐倩等, 2016 及部分未发表数据; ②中数据引自 Chen and Arakawa, 2005; Geng *et al.*, 2009; 庞振甲等, 2010; 王晓伟等, 2011; Yang *et al.*, 2014; 胡洋等, 2015; 姜芸等, 2015 及部分未发表数据 Data for ① are from Gao Shanlin *et al.*, 2006; Zhang Lianchang *et al.*, 2006; Shen *et al.*, 2009; Tang *et al.*, 2010; He Jingbo *et al.*, 2011; Shen and Pan, 2013; Gao *et al.*, 2014; Yang Gang *et al.*, 2015; Yang Meng *et al.*, 2015; Wei Shaoni *et al.*, 2015; Cao *et al.*, 2016; Xu Qian *et al.*, 2016 and some unpublished data; Data for ② are from Chen and Arakawa, 2005; Geng *et al.*, 2009; Pang Zhenjia *et al.*, 2010; Wang Xiaowei *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2014; Hu Yang *et al.*, 2015; Jiang Yun *et al.*, 2015 and some unpublished data

成岩时代及成因类型上均有显著的相似性, 同为晚石炭世早期俯冲作用的产物, 均形成于和俯冲作用有关的岛弧环境。

6 结论

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年获得库尔尕克希岩体花岗闪长岩年龄为 312.9 ± 2.9 Ma, 时代为晚石炭世早期。

(2) 岩相学显示库尔尕克希岩体花岗闪长岩中有较多角闪石及少量石榴子石产出; 岩石地球化学研究表明其具有中等硅、铝, 富碱, 贫钾, 富集 Rb、Ba 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素和重稀土元素, 负 Eu 异常较微弱, FeO^T/MgO 值 (1.42~1.51) 和 $10^4 \text{ Ga}/\text{Al}$ 值 (1.87~1.99) 较低的特征, 为钙碱性弱过铝质 I 型花岗岩。

(3) 库尔尕克希岩体花岗闪长岩形成于晚石炭世早期与俯冲作用相关的岛弧环境, 源岩更可能是受俯冲流体交代的亏损地幔衍生出来的年轻地壳物质。

致谢 野外工作得到了新疆地矿局第七地质大队的大力帮助; 主量元素分析得到长安大学王柱命老师的支持和帮助; 微量元素测试分析得到了中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室孙胜玲研究员的热情帮助; 论文写作过程中得到长安大学杨高学副教授悉心指导; 审稿专家及编辑部老师对本文提出了许多宝贵的意见, 在此一并致谢!

References

- An Fang and Zhu Yongfeng. 2009. SHRIMP U-Pb zircon ages of tuff in Baogutu formation and their geological significances[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(6): 1 437~1 445 (in Chinese with English abstract).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang (BGMRX). 1993. Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~843 (in Chinese).
- Cao Mingjian, Qin Kezhang, Li Guangming, *et al.* 2016. Genesis of ilmenite-series I-type granitoids at the Baogutu reduced porphyry Cu

- deposit, western Junggar, NW-China[J]. *Lithos*, 246: 13~30.
- Chao Wendi, Li Yongjun, Wang Ran, *et al.* 2015. Genesis of magma mixing and its geological implications for Buerkesitai granite in Tuoli country, West Junggar[J]. *Northwestern Geology*, 48(3): 149~156(in Chinese with English abstract).
- Chappell B W and White A J R. 1974. Two contrasting granite types [J]. *Pacific Geology*, 8(2): 173~174.
- Chappell B W and White A J R. 1992. I- and S- type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 272: 1~26.
- Chen Bin and Arakawa Y. 2005. Elemental and Nd-Sr isotopic geochemistry of granitoids from the West Junggar foldbelt (NW China), with implications for Phanerozoic continental growth[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(5): 1307~1320.
- Chen Bin and Jahn B M. 2004. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 691~703.
- Chen Xuanhua, Nie Lanshi, Ding Weicui, *et al.* 2015. The relationship between strike-slip tectonic system and geochemical anomalies in the West Junggar, northwestern China and its implication for mineral exploration[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(2): 371~387(in Chinese with English abstract).
- Collins W J, Beams S D, White A J R, *et al.* 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to Southeastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80: 189~200.
- Duan Fenghao, Li Yongjun, Wang Ran, *et al.* 2015. Characteristics and geological significance of adakitic rocks of the Dulunhe granite in Toli, Western Junggar[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 35(4): 8~16(in Chinese with English abstract).
- Feng Qianwen, Li Jinyi, Liu Jianfeng, *et al.* 2012. Ages of the Hongshan granite and intruding dioritic dyke swarms, in western Junggar, Xinjiang, NW China: Evidence from LA-ICP-MS zircon chronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2935~2949(in Chinese with English abstract).
- Gao Rui, Xiao Long, Pirajno F, *et al.* 2014. Carboniferous-Permian extensive magmatism in the West Junggar, Xinjiang, northwestern China: Its geochemistry, geochronology, and petrogenesis[J]. *Lithos*, 204: 125~143.
- Gao Rui, Xiao Long, Wang Guocan, *et al.* 2013. Paleozoic magmatism and tectonic setting in West Junggar[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10): 3413~3434(in Chinese with English abstract).
- Gao Shanlin, He Zhiliang and Zhou Zuyi. 2006. Geochemical characteristics of the Karamay granitoids and their significance in West Junggar, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 24(2): 125~130(in Chinese with English abstract).
- Geng Hongyan, Sun Min, Yuan Chao, *et al.* 2009. Geochemical, Sr-Nd and zircon U-Pb-Hf isotopic studies of Late Carboniferous magmatism in the West Junggar, Xinjiang: Implications for ridge subduction? [J]. *Chemical Geology*, 266(3~4): 364~389.
- Gu Pingyang, Li Yongjun, Zhang Bing, *et al.* 2009. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of gabbro in the Darbut ophiolite, western Junggar, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1364~1372(in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, *et al.* 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1077~1086(in Chinese with English abstract).
- He Guoqi, Liu Jianbo, Zhang Yueqian, *et al.* 2007. Karamay ophiolitic mélange formed during Early Paleozoic in western Junggar basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1573~1576(in Chinese with English abstract).
- He Jingbo and Chen Bin. 2011. Petrogenesis of Karamay plutons in the west Junggar: Constraints from geochronology, petrology and geochemistry[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(2): 191~211(in Chinese with English abstract).
- Hole M J, Saunders A D, Marriner G F, *et al.* 1984. Subduction of pelagic sediments: Implications for the origin of Ce-anomalous basalts from the Mariana islands[J]. *Journal of the Geological Society*, 141(3): 453~472.
- Hu Yang, Wang Juli, Wang Jianqi, *et al.* 2015. Geochemistry and geochronology of the Miaogou granite pluton in West Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(2): 505~522(in Chinese with English abstract).
- Huang Penghui, Chen Xuanhua, Wang Zhihong, *et al.* 2016. Late Paleozoic granitic magmatism in West Junggar metallogenic belt (Xinjiang), central Asia, and its tectonic implication[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(1): 145~160(in Chinese with English abstract).
- Jahn B M, Windley B F, Natal'in B A, *et al.* 2004. Phanerozoic continental growth in Central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 599~603.

- Jiang Yun, Xiao Long, Zhou Pei, *et al.* 2015. Geological, geochemical characteristics of Hongshan pluton: Constraint for lower crust of West Junggar, Xinjiang[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 40(7): 1 129~1 147(in Chinese with English abstract).
- Kang Lei, Li Yongjun, Zhang Bing, *et al.* 2009. Petrographic evidence for magma mixing of Xiaerpu granite in West Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 423~432(in Chinese with English abstract).
- Kay R W. 1978. Aleutian magnesian andesites: Melts from subducted Pacific Ocean crust[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 4(1): 117~132.
- King P L, White A J R, Chappell B W, *et al.* 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 38(3): 371~391.
- Li Ganyu, Li Yongjun, Wang Xuance, *et al.* 2016. Identifying late Carboniferous sanukitoids in Hala' alate mountain, Northwest China: New constraint on the closing time of remnant ocean basin in West Junggar[J]. *International Geology Review*, <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2016.1193773>.
- Li Jinyi, He Guoqi, Xu Xin, *et al.* 2006. Crustal tectonic framework of northern Xinjiang and adjacent regions and its formation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 148~168(in Chinese with English abstract).
- Li Xinzi, Han Baofu, Ji Jianqing, *et al.* 2004. Geology, geochemistry and K-Ar ages of the Karamay basic-intermediate dyke swarms from Xinjiang, China[J]. *Geochimica*, 33(6): 574~584(in Chinese with English abstract).
- Li Yongjun, Tong Lili, Zhang Bing, *et al.* 2010. On the old and new relationship between Xibeikulasi Formation and Baogutu Formation of the Carboniferous system, West Junggar[J]. *Xinjiang Geology*, 28(2): 130~136(in Chinese with English abstract).
- Li Yongjun, Xu Qian, Yang Gaoxue, *et al.* 2016. Intracontinental "lagged arc volcanic rocks" and its geological significance: Evidence from early Permian lagged arc magmatism in northern Urho area of Western Junggar[J]. *Earth Science frontiers*, 23(4): 190~199(in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaoming, Gao Shan, Yuan Honglin, *et al.* 2002. Analysis of 42 major and trace elements in glass standard reference materials by 193nm LA-ICP MS[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 408~418(in Chinese with English abstract).
- Liu Ying, Liu Haichen and Li Xianhua. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS[J]. *Geochimica*, 25(6): 552~558(in Chinese with English abstract).
- Ma Chong, Xiao Wenjiao, Windley B F, *et al.* 2012. Tracing a subducted ridge-transform system in a late Carboniferous accretionary prism of the southern Altaids: Orthogonal sanukitoid dyke swarms in western Junggar, NW China[J]. *Lithos*, 140~141(3): 152~165.
- Miller C F. 1985. Are strongly peraluminous magmas derived from politic sedimentary source? [J]. *The Journal of Geology*, 93(6): 673~689.
- Pang Zhenjia, Li Yongjun, Zhao Yumei, *et al.* 2010. The determination and its significance of Akebasitao aluminous A-type granites in west Junggar, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 28(2): 119~124(in Chinese with English abstract).
- Pearce J A and Cann J. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks using trace element analysis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290~300.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956~983.
- Sengör A M C, Natal'in B A and Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 364(6435): 209~304.
- Shen Ping and Pan Hongdi. 2013. Country-rock contamination of magmas associated with the Baogutu porphyry Cu deposit, Xinjiang, China[J]. *Lithos*, 177: 451~469.
- Shen Ping, Shen Yuanchao, Liu Tiebing, *et al.* 2009. Geochemical signature of porphyries in the Baogutu porphyry copper belt, western Junggar, NW China[J]. *Gondwana Research*, 16(2): 227~242.
- Shen Ping, Shen Yuanchao, Pan Chengze, *et al.* 2010. Zircon age and metallogenic characteristics of the Hatu-Baogutu Au-Cu metallogenic concentric region in Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 2 879~2 893(in Chinese with English abstract).
- Shen Ping, Shen Yuanchao, Pan Hongdi, *et al.* 2012. Geochronology and isotope geochemistry of the Baogutu porphyry copper deposit in the West Junggar region, Xinjiang, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 99~115.
- Su Yuping, Tang Hongfeng, Hou Guangshun, *et al.* 2006. Geochemistry of aluminous A-type granites along Darabut tectonic belt in West Junggar, Xinjiang[J]. *Geochimica*, 35(1): 55~67(in Chinese with English abstract).

- nese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society, Special Publications, 42(1): 313~345.
- Sun Yu, Zhao Chunhuan, Li Yongjun, *et al.* 2014. Detrital zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of the Carboniferous Xibeikulasi Formation sandstone in the Baogutu area, western Junggar, and its geological significance[J]. Journal of Stratigraphy, 38(1): 42~50(in Chinese with English abstract).
- Tang Gongjian, Wang Qiang, Wyman D A, *et al.* 2010. Ridge subduction and crustal growth in the Central Asian Orogenic Belt: Evidence from Late Carboniferous adakites and high-Mg diorites in the western Junggar region, northern Xinjiang (West China) [J]. Chemical Geology, 277(3): 281~300.
- Tang Gongjian, Wang Qiang, Wyman D A, *et al.* 2012a. Late Carboniferous high $\epsilon\text{Nd}(t)$ - $\epsilon\text{Hf}(t)$ granitoids, enclaves and dikes in western Junggar, NW China: Ridge-subduction-related magmatism and crustal growth[J]. Lithos, 140~141(5): 86~102.
- Tang Gongjian, Wang Qiang, Zhao Zhenhua, *et al.* 2009. Geochronology and geochemistry of the ore-bearing porphyries in the Baogutu area (western Junggar): Petrogenesis and their implications for tectonics and Cu-Au mineralization[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 34(1): 56~74(in Chinese with English abstract).
- Tang Gongjian, Wyman D A, Wang Qiang, *et al.* 2012b. Asthenosphere-lithosphere interaction triggered by a slab window during ridge subduction: trace element and Sr-Nd-Hf-Os isotopic evidence from Late Carboniferous tholeiites in the western Junggar area (NW China)[J]. Earth and Planetary Science Letters, 329: 84~96.
- Tong Lili, Li Yongjun, Zhang Bing, *et al.* 2009. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and geologic age of the Baogutu Formation andesite in the south of Daerbute faulted zone, Western Junggar[J]. Xinjiang Geology, 27(3): 226~230(in Chinese with English abstract).
- Tong Ying, Wang Tao, Hong Dawei, *et al.* 2010. Spatial and temporal distribution of the Carboniferous-Permian granitoids in northern Xinjiang and its adjacent areas, and its tectonic significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(6): 619~641(in Chinese with English abstract).
- Wang Ran and Zhang Shenglong. 2015. The discovery of garnet from Yuyitalepenketi granite porphyry in western Junggar and its geological significance[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 34(6): 1254~1261(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaowei, Yang Chunxia, Liu Xianjing, *et al.*, 2011. Geochemistry and tectonic significance of A-type granite in West Junggar[J]. Gansu Geology, 20(2): 11~19(in Chinese with English abstract).
- Wei Shaoni and Zhu Yongfeng. 2015. Petrology, geochronology and geochemistry of intermediate-acidic intrusions in Baogutu area, West Junggar, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(1): 143~160(in Chinese with English abstract).
- Wei Yongming, Lin Qizhong, Xiao Sang, *et al.* 2015. Remote sensing identification of geological structures at different scales in Western Junggar, Xinjiang and its prospecting significance[J]. Geotectonica et Metallogenia, 39(1): 76~92(in Chinese with English abstract).
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, *et al.* 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Journal of the Geological Society of London, 164: 31~47.
- Woodhead J D, Hergt J M, Davidson J P, *et al.* 2001. Hafnium isotope evidence for 'conservative' element mobility during subduction zone processes[J]. Earth and Planetary Science Letters, 192(3): 331~346.
- Wu Fuyuan, Jahn B M, Wilde S, *et al.* 2000. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China[J]. Tectonophysics, 328(1~2): 89~113.
- Xiang Kunpeng, Li Yongjun, Li Zhao, *et al.* 2015. LA ICP-MS zircon age and geochemistry of the Aladeyikesai Formation volcanic rocks in the Halaalate mountain of west Junggar, Xinjiang, and their tectonic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 89(5): 843~855(in Chinese with English abstract).
- Xiao Wenjiao, Han Chunming, Yuan Chao, *et al.* 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 32(2): 102~117.
- Xiao Wenjiao and Santosh M. 2014. The western Central Asian Orogenic Belt: A window to accretionary orogenesis and continental growth[J]. Gondwana Research, 25: 1429~1444.
- Xu Qian, Chao Wendi, Li Yongjun, *et al.* 2016. Geochemical characteristics and ore-forming significance of magma mixing action of Buerkesitai granite in Tuoli County, Western Junggar[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 35(3): 407~424(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhao, Han Baofu, Ren Rong, *et al.* 2012. Ultramafic-mafic

- mélange, island arc and post-collisional intrusions in the Mayile Mountain, West Junggar, China: Implications for Paleozoic intra-oceanic subduction-accretion process[J]. *Lithos*, 132: 141~161.
- Yang Gang, Xiao Long, Wang Guocan, *et al.* 2015. Geochronological, geochemical and petrogenesis of Bieluagaxi granodioritic pluton in Western Junggar[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 40(5): 810~823(in Chinese with English abstract).
- Yang Gaoxue. 2016. Genesis of oceanic island basalt in ophiolitic mélange from core area of Central Asian Orogenic Belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 61(34): 3 684~3 697(in Chinese with English abstract).
- Yang Gaoxue, Li Yongjun, Xiao Wenjiao, *et al.* 2015. OIB-type rocks within West Junggar ophiolitic mélanges: Evidence for the accretion of seamounts[J]. *Earth-Science Reviews*, 150: 477~496.
- Yang Gaoxue, Li Yongjun, Yan Jing, *et al.* 2014. Geochronological and geochemical constraints on the origin of the 304 ± 5 Ma Karamay A-type granites from West Junggar, Northwest China: Implications for understanding the Central Asian Orogenic Belt[J]. *International Geology Review*, 56(4): 393~407.
- Yang Gaoxue, Li Yongjun, Yang Baokai, *et al.* 2012. Geochemistry of basalt from the Barleik ophiolitic mélange in West Junggar and its tectonic implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(1): 188~197(in Chinese with English abstract).
- Yang Meng, Wang Juli, Wang Jianqi, *et al.* 2015. Late Carboniferous intra-oceanic subduction and mineralization in western Junggar: Evidence from the petrology, geochemistry and zircon U-Pb geochronology of I # ore-bearing granite body in Suyunhe molybdenite orefield, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(2): 523~533(in Chinese with English abstract).
- Yin Jiyan, Chen Wen, Xiao Wenjiao, *et al.* 2015. Petrogenesis of Early-Permian sanukitoids from West Junggar, northwest China: Implications for later Paleozoic crustal growth in central Asia[J]. *Tectonophysics*, 662: 385~397.
- Yin Jiyan, Yuan Chao, Sun Min, *et al.* 2010. Late Carboniferous High-Mg dioritic dikes in western Junggar, NW China: Geochemical features, petrogenesis and tectonic implications[J]. *Gondwana Research*, 17(1): 145~152.
- Yu Jinhai, Zhao Lei and Zhou Xuan. 2004. Mineralogical characteristics and origin of garnet-bearing I-type granitoids in southeastern Fujian province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 10(3): 364~377(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lianchang, Wan Bo, Jiao Xuejun, *et al.* 2006. Characteristics and geological significance of adakitic rocks in copper-bearing porphyry in Baogutu, western Junggar[J]. *Geology in China*, 33(3): 626~631(in Chinese with English abstract).
- Zou Tao, Wang Jingbin, Wang Yuwang, *et al.* 2011. Magma mixing in the Karamay rock body of west Junggar, Xinjiang: Evidence from geochemistry[J]. *Geology in China*, 38(1): 65~76(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 安 芳, 朱永峰. 2009. 新疆西准噶尔包古图组凝灰岩锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 25(6): 1 437~1 445.
- 晁文迪, 李永军, 王 冉, 等. 2015. 西准噶尔托里县布尔克斯台岩体岩浆混合成因的确认及其地质意义[J]. *西北地质*, 48(3): 149~156.
- 陈宣华, 聂兰仕, 丁伟翠, 等. 2015. 西准噶尔走滑断裂系元素分布特征及其成矿意义[J]. *岩石学报*, 31(2): 371~387.
- 段丰浩, 李永军, 王 冉, 等. 2015. 西准噶尔托里县都伦河东岩体埃达克岩特征及其地质意义[J]. *矿物岩石*, 35(4): 8~16.
- 冯乾文, 李锦轶, 刘建峰, 等. 2012. 新疆西准噶尔红山岩体及其中闪长质岩墙的时代: 来自锆石 LA-ICP-MS 定年的证据[J]. *岩石学报*, 28(9): 2 935~2 949.
- 高 睿, 肖 龙, 王国灿, 等. 2013. 西准噶尔晚古生代岩浆活动和构造背景[J]. *岩石学报*, 29(10): 3 413~3 434.
- 高山林, 何治亮, 周祖翼. 2006. 西准噶尔克拉玛依花岗岩体地球化学特征及其意义[J]. *新疆地质*, 24(2): 125~130.
- 辜平阳, 李永军, 张 兵, 等. 2009. 西准达尔布特蛇绿岩中辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年[J]. *岩石学报*, 25(2): 1 364~1 372.
- 韩宝福, 季建清, 宋 彪, 等. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)—后碰撞深成岩浆活动的时限[J]. *岩石学报*, 22(5): 1 077~1 086.
- 何国琦, 刘建波, 张越迁, 等. 2007. 准噶尔盆地西缘克拉玛依早古生代蛇绿混杂岩带的厘定[J]. *岩石学报*, 23(7): 1 573~1 576.
- 贺敬博, 陈 斌. 2011. 西准噶尔克拉玛依岩体的成因: 年代学、岩石学和地球化学证据[J]. *地学前缘*, 18(2): 191~211.
- 黄鹏辉, 陈宣华, 王志宏, 等. 2016. 西准噶尔成矿带晚古生代花岗岩类岩浆活动及其构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 40(1): 145~160.
- 胡 洋, 王居里, 王建其, 等. 2015. 新疆西准噶尔庙尔沟岩体的地球化学及年代学研究[J]. *岩石学报*, 31(2): 505~522.
- 姜 芸, 肖 龙, 周 佩, 等. 2015. 新疆西准噶尔红山岩体地质地

- 球化学特征及对下地壳性质的启示[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 40(7): 1 129~1 147.
- 康磊, 李永军, 张兵, 等. 2009. 新疆西准噶尔夏尔莆岩体岩浆混合的岩相学证据[J]. 岩石矿物学杂志, 28(5): 423~432.
- 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[J]. 地质学报, 80(1): 148~168.
- 李辛子, 韩宝福, 季建清, 等. 2004. 新疆克拉玛依中基性岩墙群的地质地球化学和 K-Ar 年代学[J]. 地球化学, 33(6): 574~584.
- 李永军, 佟丽莉, 张兵, 等. 2010. 论西准噶尔石炭系希贝库拉斯组与包古图组的新老关系[J]. 新疆地质, 28(2): 130~136.
- 李永军, 徐倩, 杨高学, 等. 2016. 陆内“滞后”弧岩浆岩特征及其地质意义: 来自西准噶尔乌尔禾北早二叠世岩浆作用的证据[J]. 地学前缘, 23(4): 190~199.
- 柳小明, 高山, 袁洪林, 等. 2002. 193 nm LA-ICP MS 对国际地质标准参考物质中 42 种主量和微量元素的分析[J]. 岩石学报, 18(3): 408~418.
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素[J]. 地球化学, 25(6): 552~558.
- 庞振甲, 李永军, 赵玉梅, 等. 2010. 西准阿克苏陶铝质 A 型花岗岩厘定及意义[J]. 新疆地质, 28(2): 119~124.
- 申萍, 沈远超, 潘成泽, 等. 2010. 新疆哈图-包古图金铜矿集区锆石年龄及成矿特点[J]. 岩石学报, 26(10): 2 879~2 893.
- 苏玉平, 唐红峰, 侯广顺, 等. 2006. 新疆西准噶尔达拉布特构造带铝质 A 型花岗岩的地球化学研究[J]. 地球化学, 35(1): 55~67.
- 孙羽, 赵春环, 李永军, 等. 2014. 西准噶尔包古图地区石炭系希贝库拉斯组碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 地层学杂志, 38(1): 42~50.
- 佟丽莉, 李永军, 张兵, 等. 2009. 新疆西准噶尔达尔布特断裂带南包古图组安山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及地质时代[J]. 新疆地质, 27(3): 226~230.
- 童英, 王涛, 洪大卫, 等. 2010. 北疆及邻区石炭-二叠纪花岗岩时空分布特征及其构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 29(6): 619~641.
- 唐功建, 王强, 赵振华, 等. 2009. 西准噶尔包古图成矿斑岩年代学与地球化学: 岩石成因与构造、铜金成矿意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 34(1): 56~74.
- 王冉, 张胜龙. 2015. 西准噶尔玉依塔勒盆克提斑岩体中石榴子石的发现及地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(6): 1 254~1 261.
- 王晓伟, 杨春霞, 刘景显, 等. 2011. 西准噶尔 A 型花岗岩地球化学特征及构造意义[J]. 甘肃地质, 20(2): 11~19.
- 魏少妮, 朱永峰. 2015. 新疆西准噶尔包古图地区中酸性侵入体的岩石学、年代学和地球化学研究[J]. 岩石学报, 31(1): 143~160.
- 魏永明, 蔺启忠, 肖臻, 等. 2015. 新疆西准噶尔地区不同尺度地质构造的遥感标识特征及找矿意义[J]. 大地构造与成矿学, 39(1): 76~92.
- 向坤鹏, 李永军, 李钊, 等. 2015. 新疆西准噶尔哈拉阿拉特山火山岩 LA ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及意义[J]. 地质学报, 89(5): 843~855.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1~843.
- 徐倩, 晁文迪, 李永军, 等. 2016. 西准噶尔托里县布尔克斯台岩体岩浆混合作用的地球化学特征及其成矿意义[J]. 岩石矿物学杂志, 35(3): 407~424.
- 杨钢, 肖龙, 王国灿, 等. 2015. 西准噶尔别鲁阿嘎希花岗闪长岩年代学、地球化学特征及岩石成因[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 40(5): 810~823.
- 杨高学. 2016. 中亚造山带核心区蛇绿混杂岩中洋岛玄武岩成因探讨[J]. 科学通报, 61(34): 3 684~3 697.
- 杨高学, 李永军, 杨宝凯, 等. 2012. 西准噶尔巴尔雷克蛇绿混杂岩带中玄武岩地球化学特征及大地构造意义[J]. 地质学报, 86(1): 188~197.
- 杨猛, 王居里, 王建其, 等. 2015. 新疆西准噶尔地区晚石炭世洋内俯冲与成矿: 来自苏云河钼矿区 I 号含矿花岗岩体的证据[J]. 岩石学报, 31(2): 523~533.
- 于津海, 赵蕾, 周旋. 2004. 闽东南含石榴子石 I 型花岗岩的矿物学特征及成因[J]. 高校地质学报, 10(3): 364~377.
- 张连昌, 万博, 焦学军, 等. 2006. 西准包古图含铜斑岩的埃达克岩特征及其地质意义[J]. 中国地质, 33(3): 626~631.
- 邹滔, 王京彬, 王玉往, 等. 2011. 新疆克拉玛依岩体的岩浆混合作用成因: 岩石地球化学证据[J]. 中国地质, 38(1): 65~76.