

doi:10.3799/dqkx.2015.066

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

杨 钢^{1,2}, 肖 龙^{2*}, 王国灿^{2,3}, 高 睿^{2,4}, 贺新星^{2,5}, 张 雷^{2,6}, 周 佩²

1. 中国地震局地震研究所地震预警湖北省重点实验室, 湖北武汉 430071

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

4. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059

5. 江苏省地质调查研究院, 江苏南京 210018

6. 湖北省地质矿业开发有限责任公司, 湖北武汉 430022

摘要: 为更深入了解西准噶尔晚古生代岩浆活动和构造背景, 对位于西准噶尔中部的别鲁阿嘎希岩体开展了年代学、地球化学以及 Sr-Nd 同位素研究, 讨论了岩石成因、源区性质和构造背景。别鲁阿嘎希花岗闪长岩为钙碱性系列岩石, 岩浆锆石结晶年龄为 318.7 ± 3.3 Ma, 其具相对高的 MgO ($Mg^{\#} = 49 \sim 59$)、Ni、Cr 含量, 富集大离子亲石元素 (如 K、Rb、Sr 和 Ba)、亏损高强度元素 (如 Nb、Ta、Ti), 轻重稀土元素分异不明显。Sr-Nd 同位素特征显示, 其有较低的初始 Sr 比值 ($0.704297 \sim 0.704399$), 较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 ($5.8 \sim 6.5$)。通过综合分析, 认为在晚石炭世早期, 达尔布特洋壳 (板片) 俯冲至地幔楔下部, 俯冲洋壳板片脱水所产生的流体在上升过程中与地幔楔共同作用, 底侵加热由亏损地幔形成不久的年轻地壳 (由洋壳和岛弧组成), 使其部分熔融形成了别鲁阿嘎希分异 I 型花岗岩。

关键词: 别鲁阿嘎希岩体; 地质年代学; 地球化学; Sr-Nd 同位素; 西准噶尔; 地层学。

中图分类号: P534

文章编号: 1000-2383(2015)05-0810-14

收稿日期: 2014-09-20

Geochronological, Geochemical and Petrogenesis of Bieluagaxi Granodioritic Pluton in Western Junggar

Yang Gang^{1,2}, Xiao Long^{2*}, Wang Guocan^{2,3}, Gao Rui^{2,4}, He Xinxing^{2,5}, Zhang Lei^{2,6}, Zhou Pei²

1. Hubei Key Laboratory of Earthquake Early Warning, Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

5. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China

6. Hubei Geological & Mining Exploration Co., Ltd., Wuhan 430022, China

Abstract: For a better understanding of the petrogenesis and tectonic environment of the acidic intrusive rocks in Western Junggar, a study is carried out on Bieluagaxi granodioritic pluton located in the Central part of West Junggar. Its petrogenesis, magma source, tectonics setting based on petrography, zircon LA-ICP-MS U-Pb ages, whole-rock major and trace elements, and Sr-Nd isotopic compositions are discussed in detail. LA-ICP-MS U-Pb zircon data of the granodiorite give weighted ages of

基金项目: 中国地质调查局项目 (No.1212011220245); 新疆 1:25 万铁厂沟镇幅 (L45C002001) 与克拉玛依市幅 (L45C003001) 区调修测项目 (No.1212011120502)。

作者简介: 杨钢 (1987-), 男, 助理工程师, 从事岩石学和地震地质学研究, E-mail: 2639297557@qq.com

* **通讯作者:** 肖龙, E-mail: longxiao@cug.edu.cn

引用格式: 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. 地球科学——中国地质大学学报, 40(5): 810-823.

318.7±3.3 Ma. Bieluagaxi granodiorite is calc-alkaline suite with high MgO (Mg[#] = 49–59), Ni and Cr contents. Bieluagaxi granodiorite is strongly enriched in large ion lithophile elements (LILEs, e.g. K, Rb, Sr and Ba), but it displays depletion of high field strength elements (HFSEs, e.g. Nb, Ta and Ti). In terms of Sr-Nd isotopic compositions, granodiorite has low initial ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios (0.704 297–0.704 399) and high positive ε_{Nd}(t) (5.8–6.5). Therefore, we suggest that the early Late Carboniferous Bieluagaxi granodioritic pluton has been generated in a subduction setting, the mantle wedge began to partially melt due to the upward fluid from the dehydration of subducting oceanic slab, resulting in the asthenospheric mafic magma underplating the lower crust. Then, the lower juvenile basaltic crust derived from the depleted mantle underwent partial melting to generate the I type granites of the Bieluagaxi granodioritic pluton.

Key words: Bieluagaxi granodioritic pluton; geochronology; geochemistry; Sr-Nd isotope; western Junggar; stratigraphy.

0 引言

中亚造山带位于东欧地台—卡拉库姆地台—塔里木地台—中朝地台和西伯利亚地台之间,是全球显生宙地壳增生与改造最显著的地区,也是全球最大的增生造山带与大陆成矿域 (Sengör *et al.*, 1993; Hu *et al.*, 2000; Chen and Jahn, 2004; Jahn, 2004; Xiao and Kusky, 2009). 西准噶尔地区位于新疆西北部,地处西伯利亚、哈萨克斯坦和塔里木 3 个大陆板块的交接处,北部与哈萨克斯坦板块和阿尔泰造山带接壤,南部毗邻准噶尔盆地和天山造山带,是中亚造山带的重要组成部分(图 1a)(Feng *et al.*,

1989),吸引了大量学者的关注(韩宝福等, 2006; Geng *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2012; 高睿等 2013). 西准噶尔地区大面积的晚古生代岩浆岩,从超基性到酸性均有出露,其中中酸性侵入岩既有超浅成相的岩墙或岩枝,也有深成相的中小型岩株和巨大岩基(Kwon *et al.*, 1989; Koschek, 1993; Chen and Jahn, 2004; 韩宝福等, 2006; Geng *et al.*, 2009; Yin *et al.*, 2010),其中出露最为广泛的是花岗岩,以 NEE 向的达拉布特断裂为界,断裂以南有包古图、红山、克拉玛依花岗岩等大型岩基分布,断裂以北则分布有著名的铁厂沟、哈图、阿克巴斯套和庙尔

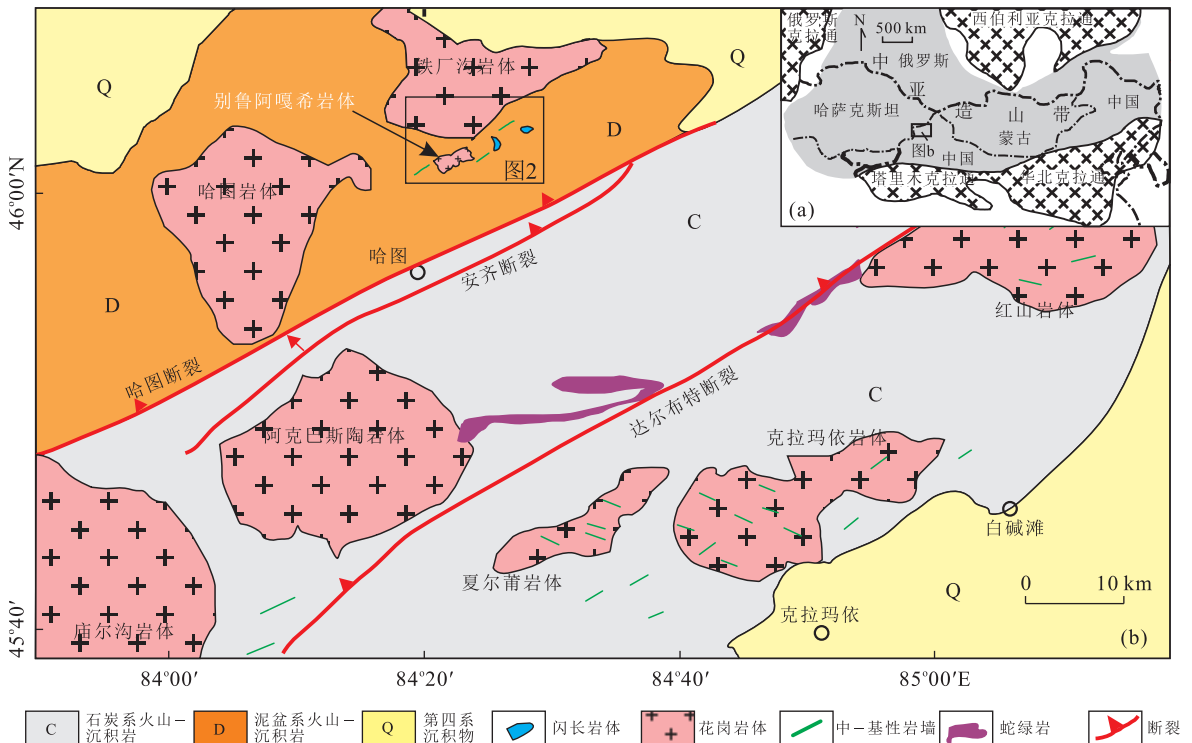


图 1 西准噶尔地区地质简图

Fig.1 Geological sketch of the western Junggar region
据苏玉平等(2006)、安芳和朱永峰(2007)和尹继元等(2012)修改

沟等花岗岩(图 1b).这些花岗岩大多侵位于下石炭统中,大量的数据证实,这些深成岩浆活动主要发生在 300 Ma 前后(金成伟和张秀棋,1993;Chen and Jahn,2004;李宗怀等,2004;Chen and Arakawa,2005;韩宝福等,2006;苏玉平等,2006;Geng *et al.*,2009;尹继元等,2013).上述岩浆岩中相当一部分岩石与铜金等成矿作用关系密切(金成伟和张秀棋,1993;肖文交等,2006;张连昌等,2006;赵振华等,2006;安芳和朱永峰,2007;王瑞和朱永峰,2007;尹继元等,2012,2013),如别鲁阿嘎希金矿、宝贝金矿、哈图金矿、萨尔托海铁矿、包古图金铜矿等.然而,前人对别鲁阿嘎希岩体研究程度偏低,缺乏系统的地球化学研究,且对岩体形成时代认识也不同:新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第十一地质大队(1985)获得别鲁阿嘎希岩体年龄为 320 Ma;而金成伟和徐永生(1997)认为其形成于 369 Ma.本文对别鲁阿嘎希岩体进行系统年代学、岩石地球化学及 Sr-Nd 同位素地球化学研究,解释其侵位时代、源区性质及成岩背景,为进一步认识西准噶尔地区岩浆活动和构造演化提供重要资料.

1 地质背景

别鲁阿嘎希岩体位于中亚造山带中部准噶尔盆地西缘,达尔布特大断裂以北约 30 km,铁厂沟岩体

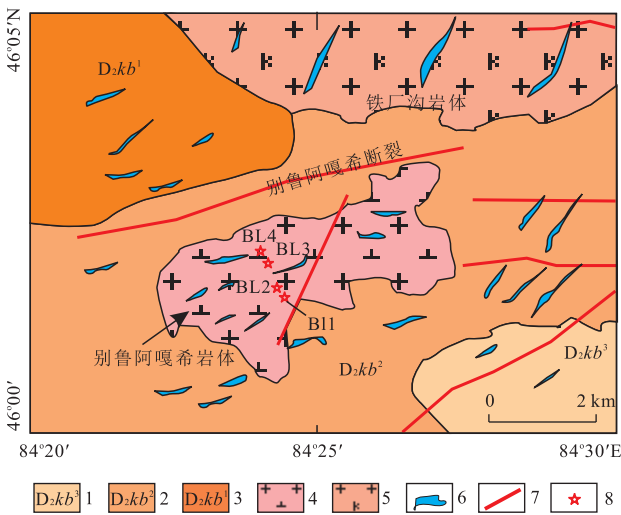


图 2 别鲁阿嘎希岩体地质简图

Fig.2 Geological sketch of the Bieluogaxi pluton

1.库鲁木迪组上亚组上岩性段;2.库鲁木迪组上亚组中岩性段;3.库鲁木迪组上亚组下岩性段;4.花岗闪长岩;5.碱长花岗岩;6.岩墙;7.断层;8.采样点.据金成伟和徐永生(1997)以及尹继元等(2012)

正南约 1.5 km,距西边的哈图岩体约 4 km.岩体总体上呈 NE 向($40^{\circ}\sim 60^{\circ}$)展布,与区内 NE 向的大断裂展布一致(图 2).整个别鲁阿嘎希岩体内部平行密集分布约 70 条岩墙,岩墙岩性主要为闪长岩(图 3c)、闪长玢岩(图 3f),少数为辉绿岩.岩墙规模大小不一,最宽者可达 2 m,最窄者约 20 cm(图 4a),岩墙的长度一般在 100 m 左右,少数长度可达 1 km.

别鲁阿嘎希岩体侵入中泥盆统的库鲁木迪组地层.库鲁木迪组是一套沉积火山岩系,由凝灰质粉砂岩、凝灰质砂岩、凝灰质砂砾岩和层凝灰岩组成,具韵律性,化石稀少.库鲁木迪组下亚组主要分布于区域的北面,为一套灰—深灰色巨厚细粒火山碎屑—陆源碎屑物质组成的深海相沉积;区内主要以库鲁木迪组上亚组为主,上亚组属深海—浅海相复理石建造.

区内断裂非常发育,褶皱其次(图 2).断裂主体方向为 NEE-SWW,与别鲁阿嘎希断裂方向一致.但在北面的铁厂沟岩体中,断裂以 NEE 向压扭性断裂为主.褶皱构造规模不大,为较为紧闭的背斜和向斜褶皱,其枢纽方向亦为 NEE 向.

2 岩石学特征

别鲁阿嘎希岩体出露面积约 12 km^2 .经野外地质调查工作,可知该岩体寄主岩石类型主体为花岗闪长岩(图 3a 和 3b),岩墙与寄主岩石侵入接触界线多数较为清晰,少数岩墙呈楔状侵入(图 4a),还可见岩墙内捕获花岗闪长岩特征(图 4d).岩体中北部与岩墙接触的寄主岩石岩性变为石英闪长岩(图 3e),可见有两个岩相带,且有近圆形和椭圆形微粒闪长岩包体赋存于石英闪长岩中(图 4c);局部出现有中性岩浆与酸性岩浆混合形成的不均匀混合带,该带整体宽约 1 m,由宽度在 $0.5\sim 3.0\text{ cm}$ 不等的酸性岩浆与中性岩浆交错组成(图 3d 和图 4b).本文测试样品为未风化花岗闪长岩,岩石新鲜面颜色为灰—灰白色,中粒半自形结构,块状构造.主要矿物有斜长石($45\%\sim 65\%$)、石英($18\%\sim 23\%$)、碱性长石($5\%\sim 10\%$)和角闪石($5\%\sim 10\%$),少量的黑云母($<5\%$);另有少量副矿物,如锆石、磷灰石、磁铁矿等.斜长石呈半自形板状,具有聚片双晶,粒径为 $1\sim 3\text{ mm}$,有的具有环带构造;微斜长石,呈半自形板状,发育格子双晶,粒径为 $0.9\sim 2.8\text{ mm}$;石英为他形粒状,粒径为 $1.0\sim 2.5\text{ mm}$,充填在其他矿物的空隙中.

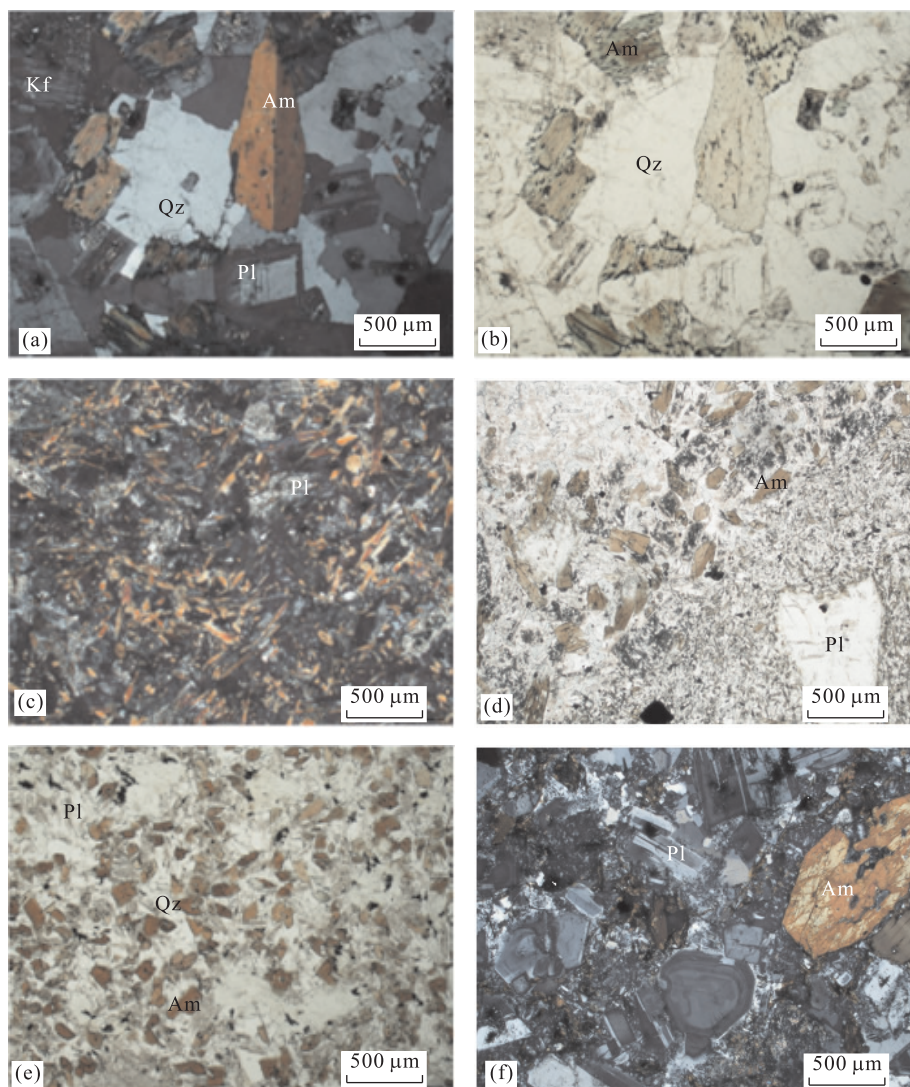


图 3 各岩性镜下特征

Fig.3 Microphotographs of different rock types

a.正交偏光下花岗闪长岩花岗结构特征;b.单片光下花岗闪长岩花岗结构特征;c.正交偏光下闪长岩特征;d.单片光下酸性、与中性岩浆混合特征;e.单片光下石英闪长岩特征;f.正交偏光下具角闪石斑晶闪长玢岩特征;Qz.石英;Pl.斜长石;Kf.碱性长石;Am.角闪石

3 分析方法

本文样品的主、微量元素测试在武汉综合岩矿测试中心完成.所有测试样品均碎至 200 目以下.主量元素采用波长色散型射线荧光光谱分析仪进行测定,分析误差 $<5\%$.微量元素分析首先采用酸溶方法对样品进行预处理,然后利用 ICP-MS 法测定,分析精度优于 10% .

用于锆石年代学测定的样品(BL2)在廊坊地质服务有限公司利用标准技术对锆石进行了分选,用磁法和重力方法挑选,然后在双目镜下挑选出用于定年的锆石.采用环氧树脂固定待测试的锆石颗粒之后,将其抛磨至露出锆石的核部,然后对待测锆石

进行透射光、反射光和阴极发光(CL)照相.锆石制靶、CL 照相及 U-Pb 同位素测年均在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成.锆石 CL 检测在电子探针实验室 MonoCL3 系统上完成.检测时其电子束加速电压为 10 kV,锆石 U-Pb 同位素测年在 Agilent 7500a 电感耦合等离子体质谱仪与 GeoLas 2005 准分子激光剥蚀系统联机上完成.

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年激光束斑直径为 $32\ \mu\text{m}$,用 He 作为剥蚀物质的载气,Ar 作为补偿气以调节灵敏度,锆石 U-Pb 同位素测定采用标准锆石 91500 作为外标标准矿物,以 GJ-1 作为内标标准矿物,用 NISTSRM610 来校正微量元素的



图 4 别鲁阿嘎希花岗岩闪长岩岩墙与寄主岩石野外特征 (a~d) 及部分锆石 CL 图像和年龄值 (e)
 Fig.4 Field geological observation (a~d), representative CL images and ages of zircons (e) for the Bieluagaxi granodiorite
 a. 岩墙呈楔状侵入寄主岩石; b. 酸性与中性岩浆混合带; c. 不同岩相的石英闪长岩中微粒闪长岩包体; d. 闪长岩墙捕获花岗岩闪长岩

表 1 别鲁阿嘎希花岗岩闪长岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年数据
 Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for the Bieluagaxi granodiorite

测试点号	元素含量(10 ⁻⁶)		Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U						
	Pb	Th		U	比值	1σ	比值	1σ	比值(Ma)	1σ	年龄(Ma)	1σ				
BL2.01	35	193	652	0.30	0.058 56	0.002 34	0.407 09	0.015 55	0.050 58	0.000 65	550	87	347	11	318	4
BL2.02	75	537	1 220	0.44	0.052 59	0.002 40	0.360 04	0.016 05	0.049 63	0.000 54	322	101	312	12	312	3
BL2.03	28	154	520	0.30	0.051 83	0.003 25	0.356 89	0.021 51	0.050 25	0.000 72	280	144	310	16	316	4
BL2.04	33	236	600	0.39	0.053 27	0.002 51	0.363 38	0.016 83	0.049 69	0.000 71	339	106	315	13	313	4
BL2.05	59	414	1 014	0.41	0.058 01	0.003 58	0.403 81	0.023 57	0.051 04	0.000 87	532	137	344	17	321	5
BL2.06	60	384	973	0.39	0.055 86	0.003 21	0.392 28	0.021 41	0.051 38	0.000 81	456	123	336	16	323	5
BL2.07	31	177	566	0.31	0.053 74	0.002 12	0.386 91	0.015 50	0.052 04	0.000 73	361	61	332	11	327	4
BL2.08	36	205	642	0.32	0.052 69	0.002 33	0.378 75	0.016 46	0.052 01	0.000 64	322	100	326	12	327	4
BL2.09	49	353	890	0.40	0.053 55	0.001 99	0.375 52	0.013 76	0.050 54	0.000 66	354	85	324	10	318	4
BL2.10	50	229	795	0.29	0.051 41	0.001 69	0.367 91	0.012 03	0.051 36	0.000 58	257	71	318	9	323	4
BL2.11	32	180	576	0.31	0.052 86	0.002 58	0.370 07	0.016 94	0.050 59	0.000 82	324	111	320	13	318	5
BL2.12	29	170	526	0.32	0.053 56	0.003 56	0.368 86	0.024 48	0.049 48	0.001 28	354	150	319	18	311	8
BL2.13	71	551	1 231	0.45	0.052 61	0.002 58	0.370 30	0.019 20	0.050 16	0.001 15	322	113	320	14	316	7

含量.样品分析流程为每测定 5 个样品点测定两次标准锆石 91500,每个样品点的数据采集时间共 100 s,其中前 20 s 为气体背景采集时间.原始数据处理和年龄计算分别用 ICPMSDataCal8.0 (Liu *et al.*, 2008, 2010a, 2010b) 和 ISOPLOT (Ludwig, 2003) 完成,并采用 Anderson (2002) 方法对普通铅进行校正.

全岩 Sr-Nd 同位素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 Triton-TI 型热电离同位素质谱仪完成,仪器的准确度分别用标样 NBS987 和 LaJolla 国际标样进行监测, Sr 同位素质量分馏用 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.375\ 209$ 校正, Nd 同位素质量分馏用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.721\ 900$ 校正,详细流程见 Ling *et al.* (2009).

4 测试结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

花岗闪长岩样品中锆石 (BL2) 均为无色透明,玻璃光泽,呈自形长柱状,长宽比约为 2 : 1.在阴极发光图像(图 4e)中,颗粒大小为 100~200 μm ,阴极发光较强,具有明显的岩浆振荡环带.锆石颗粒的 Th、U 含量变化不大,分别为 $154.11 \times 10^{-6} \sim 550.74 \times 10^{-6}$ 和 $536.02 \times 10^{-6} \sim 1\ 230.62 \times 10^{-6}$, Th/U 值基本在 0.4 左右.锆石颗粒的阴极发光特征及 Th/U 比值均反映了岩浆锆石的特点 (Koschek, 1993; Hoskin and Black, 2000).

花岗闪长岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果见表 1 和图 5 (年龄数据标注在图 5 中).图 5 和表 1 的数据表明,花岗闪长岩中锆石的 13 个分析数据投影点位于谐和线及其附近(图 5),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $318.7 \pm 3.3\ \text{Ma}$ ($n = 13$, MSWD=1.6),该年龄代表别鲁阿嘎希岩体岩浆结晶年龄,即别鲁阿嘎希花岗闪长岩形成于晚石炭早期.

4.2 主量元素

主量和微量元素分析结果见表 2.别鲁阿嘎希花岗闪长岩 4 个样品的主量元素中, SiO_2 含量变化范围为 63.8%~64.5%, TAS 图解(图 6a)所有样品均落入亚碱性花岗闪长岩区域内,在图 6b 中,所有样品都投影在钙碱性系列岩石区域,样品 A/CNK = 0.97~1.01, A/NK = 1.84~2.04, 总体为准铝质到弱过铝质(图 6d). MgO 含量为 1.84%~3.34% ($\text{Mg}^\#$ 值为 49~59), Al_2O_3 含量为 15.6%~17.3%, 全碱

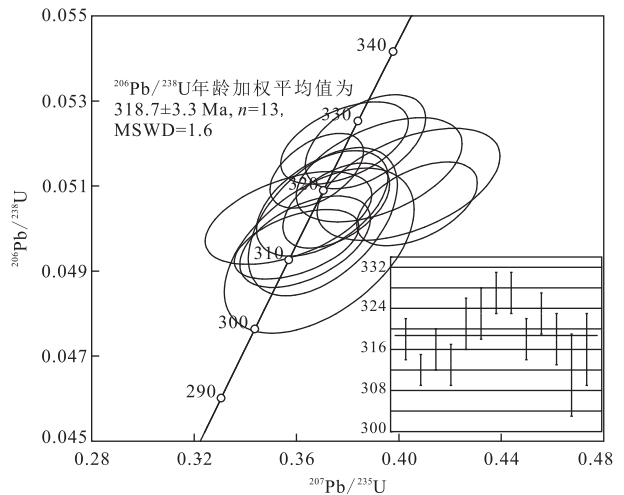


图 5 别鲁阿嘎希花岗闪长岩中锆石 U-Pb 谐和图
Fig.5 U-Pb concordia data of zircons for the Bieluogaxi granodiorite

($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 含量为 5.22%~6.48%, 碱度率 (AR) 在 1.69~1.87, 相对富 Na_2O (3.52%~4.23%), 低 TiO_2 , 其 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值为 1.65~2.07, 在 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 图解(图 6c)中位于 I 型花岗岩区内, 与 Chen and Jahn (2004) 获得的准噶尔 I 型花岗岩范围一致. $\text{Rb}/\text{Ba}-(\text{Zr} + \text{Ce} + \text{Y})$ 和 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}-(\text{Zr} + \text{Ce} + \text{Y})$ 图解(图 6e 和 6f) 显示, 别鲁阿嘎希花岗闪长岩落入 OGT 区域, 即非分离结晶过程形成的分异型 I、S 和 M 型花岗岩.

4.3 微量元素

从图 7 中可知花岗闪长岩表现为富集 K、Sr、Ba 和 Pb, 相对亏损高强度场元素 Nb、Ta、P、Ti 和重稀土元素, 呈现出显著的 TNT 异常(图 7a). 岩石具有相对低的稀土元素总量 ($\sum \text{REE} = 83.03 \times 10^{-6} \sim 99.45 \times 10^{-6}$) (表 2), LREE/HREE 为 2.95~4.18, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 变化于 6.0~8.6, 其 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 比值为 1.4~1.6, 反映了花岗闪长岩轻稀土元素略富集特征, 轻稀土元素分馏较明显, 重稀土元素分馏不明显(图 7b). 别鲁阿嘎希岩体并未见明显的负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.95 \sim 1.05$), 可能反映岩浆在演化早期没有经历明显的斜长石分离结晶.

4.4 Sr-Nd 同位素

笔者选取 2 个样品 (BL2 和 BL4) 进行了 Sr-Nd 同位素实验, 测试结果见表 3. 利用其结晶年龄计算得到两件花岗闪长岩样品具有相对一致的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 (BL2 为 0.704 399, BL4 为 0.704 297), 以及相似的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (BL2 为 +5.8, BL4 为 +6.5), 样品 BL2 的 Nd 同位素模式年龄 $t_{2\text{DM}}$ 为 610 Ma, 样品

表 2 别鲁阿嘎希花岗闪长岩主量元素(%)和微量元素(10^{-6})组成

Table 2 Major (%) and trace elements (10^{-6}) compositions for the Bieluagaxi granodiorite

样号	BL1	BL2	BL3	BL4
SiO ₂	64.2	64.3	64.5	63.8
TiO ₂	0.48	0.42	0.49	0.48
Al ₂ O ₃	15.6	17.3	16.4	17.1
FeO	3.65	2.92	3.28	3.33
Fe ₂ O ₃	0.50	0.51	0.48	0.62
MgO	3.34	1.84	2.25	2.28
MnO	0.09	0.07	0.09	0.09
CaO	4.61	4.22	4.39	4.28
K ₂ O	1.70	2.25	2.29	2.39
Na ₂ O	3.52	4.23	3.78	4.09
P ₂ O ₅	0.11	0.13	0.13	0.15
H ₂ O ⁺	1.96	1.43	1.49	1.19
CO ₂	0.06	0.24	0.24	0.08
Total	99.82	99.86	99.81	99.88
Mg [#]	59	49	52	51
AR	1.69	1.86	1.83	1.87
La	13.0	16.3	16.2	16.1
Ce	27.2	32.6	32.2	39.0
Pr	3.30	3.73	3.67	3.76
Nd	12.3	13.7	13.5	14.9
Sm	2.79	2.87	2.93	2.99
Eu	0.89	0.93	0.88	0.94
Gd	2.56	2.43	2.59	2.58
Tb	0.41	0.37	0.42	0.40
Dy	2.56	2.26	2.53	2.35
Ho	0.54	0.45	0.48	0.46
Er	1.49	1.28	1.42	1.42
Tm	0.24	0.21	0.22	0.23
Yb	1.56	1.36	1.40	1.37
Lu	0.25	0.21	0.22	0.22
Y	14.0	12.6	13.7	12.7
Zr	103	101	103	125
Nb	4.23	3.83	4.80	3.67
Ba	480	603	681	680
Hf	3.50	3.12	3.35	3.98
Ta	0.53	0.42	0.50	0.27
Li	25.5	18.7	23.8	29.3
Sc	14.60	9.86	11.90	10.80
Cr	102.0	46.2	56.4	54.8
Co	14.2	8.90	10.8	10.6
Ni	41.9	15.9	20.4	18.1
Rb	33.1	47.9	44.8	51.8
Cs	1.38	1.92	2.42	3.42
Pb	9.52	12.0	10.8	9.42
Th	3.65	5.72	7.25	5.40
U	0.66	0.71	0.89	0.79
Sr	319	357	341	348
V	84.1	37.0	51.6	46.6
ΣREE	83.03	91.35	92.27	99.45
LREE	61.99	72.60	71.93	80.26
HREE	21.05	18.75	20.34	19.19
LREE/HREE	2.95	3.87	3.54	4.18
(La/Yb) _N	6.0	8.6	8.3	8.4
Nb/Ta	8	9	10	13
Zr/Hf	29	32	31	32
Rb/Sr	0.10	0.13	0.13	0.15

注:(La/Yb)_N为La/Nb对球粒陨石标准化的值。

BL4的Nd同位素模式年龄 t_{2DM} 为550 Ma。

5 讨论

5.1 岩石类型

I、S、A和M型是目前常用的花岗岩分类方案,已被大多数人所接受(吴福元等,2007)。角闪石、堇青石和碱性暗色矿物是区别I、S和A型花岗岩重要的矿物学标志,而白云母和石榴石并不是鉴定S型花岗岩的有效标志(Miller,1985)。相对于S型花岗岩,I型花岗岩是准铝质到弱过铝质的岩石,A/CNK在0.69~1.1,具有高CaO、Na₂O、Sr等特征,初始⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值为0.704~0.712(Chappell *et al.*, 1992)。

别鲁阿嘎希花岗闪长岩Na₂O为3.52%~4.23%,A/CNK小于1.1(图6d),初始⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值为0.704 297~0.704 399,明显不同于S型花岗岩,而与达拉布特断裂两侧的哈图、庙尔沟、阿克巴斯套和红山A型花岗岩的也具有明显的区别。在K₂O-Na₂O图解和Rb/Ba-(Zr+Ce+Yb)图解中(图6c和6e)别鲁阿嘎希花岗闪长岩落入I型花岗岩区,岩相学上可观察到较多角闪石产出,未见白云母,均表现I型花岗岩的特征。

5.2 岩浆源区

长英质岩类的岩浆源区主要有3种:(1)壳源(大陆壳和大洋板片);(2)幔源(为幔源岩浆分异形成或新生的地壳物质重熔产生);(3)壳源岩浆和幔源岩浆的混合源。通常情况下,地幔岩石的部分熔融不能产生长英质岩浆,而是先形成玄武质岩浆或形成玄武岩后间接产生的长英质岩浆。前人对西准噶尔I型花岗岩成因认识不一:(1)俯冲洋壳熔融形成(Geng *et al.*, 2009; Tang *et al.*, 2010);(2)亏损地幔部分熔融形成(Han *et al.*, 1997; 韩宝福等, 2006; Zhou *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2010);(3)由玄武质岩浆形成的地幔楔底侵先存在的下地壳,使其部分熔融形成(Wu *et al.*, 2003);(4)下地壳部分熔融形成(Zhou *et al.*, 2008);(5)壳源岩浆与幔源岩浆混合形成(Barbarin, 1999)。

别鲁阿嘎希花岗闪长岩富集K、Sr、Ba和Pb,相对亏损高强度元素Nb、Ta、P、Ti和重稀土元素,呈现出显著的TNT槽岛弧特征,表明花岗闪长岩可能携带消减作用信息,与俯冲残留洋壳流体的交代或者岛弧组分的参与有关(Gill, 1981; 陈家富等, 2010; Shen *et al.*, 2012)。其Nb/Ta值明显低于原始

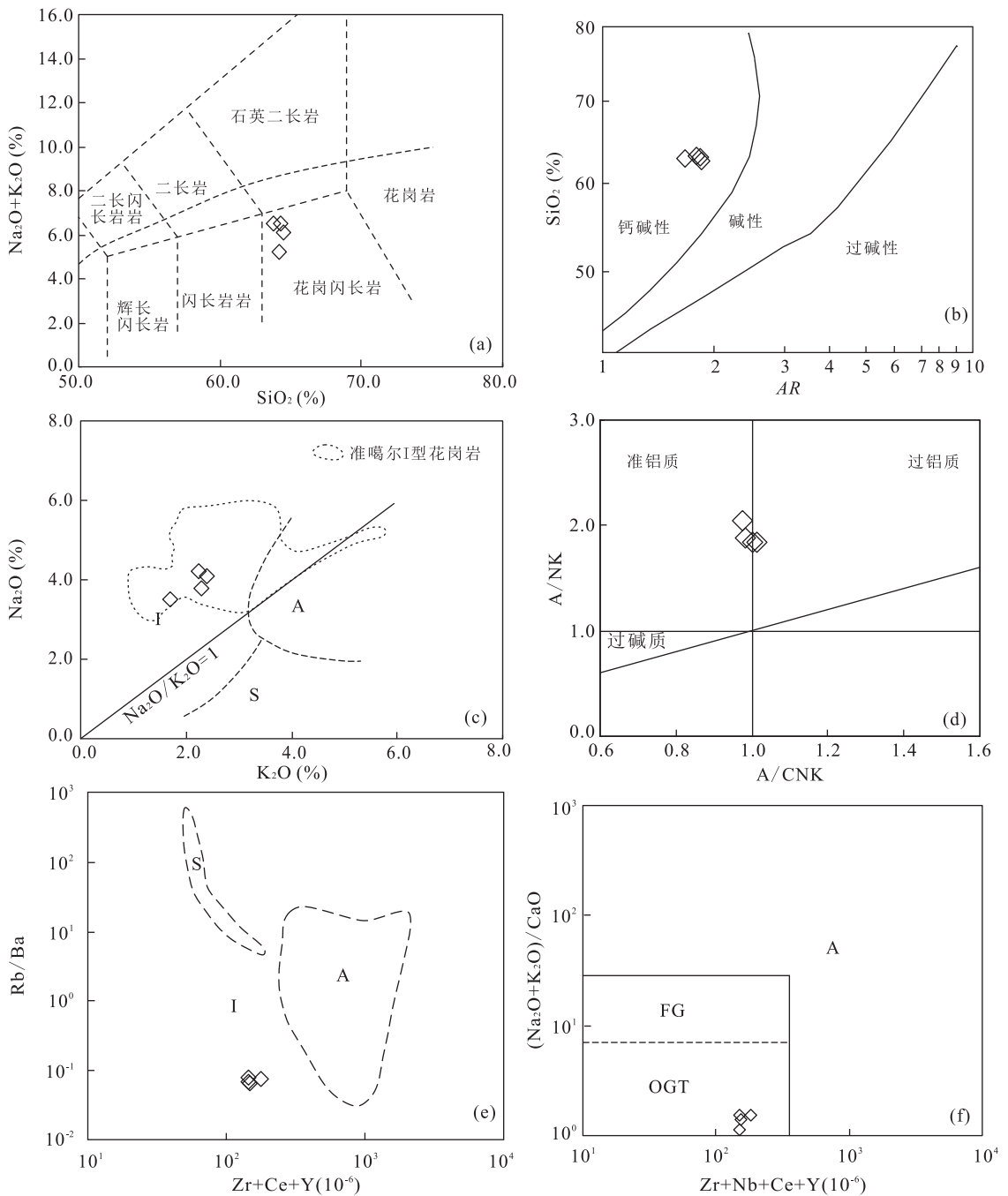


图 6 别鲁阿嘎希花岗闪长岩 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)- SiO_2 、 SiO_2 -AR、 Na_2O - K_2O 、 A/NK - A/CNK 、 Rb/Ba - $(\text{Zr} + \text{Ce} + \text{Y})$ 和 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ - $(\text{Zr} + \text{Ce} + \text{Y})$ 图解

Fig.6 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)- SiO_2 , SiO_2 -AR, Na_2O - K_2O , A/NK - A/CNK , Rb/Ba - $(\text{Zr} + \text{Ce} + \text{Y})$ and $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ - $(\text{Zr} + \text{Ce} + \text{Y})$ relationships of the Bielugaxi granodiorite

数据来源:准噶尔 I 型花岗岩范围据 Chen and Jahn(2004);图 a 底图据 Middlemost(1994);图 b 底图据 Peccerillo and Taylor(1976);图 e 和 f 底图据 Whalen *et al.*(1987);I-I-I 型花岗岩;S-S-S 型花岗岩;A-A-A 型花岗岩;FG.FG 分型 I、S 或 M 型花岗岩;OGT.OGT 分型 I、S 和 M 型花岗岩

地幔, Zr/Hf 值也略低于原始地幔, Rb/Sr 值 (0.10~0.15) 落在壳幔混合源花岗岩的 Rb/Sr 值范围内 (0.05~0.5) (Faure, 1986), 以上这些特点显示它们与俯冲带岩浆地球化学特征类似 (高 Al_2O_3 , 低

TiO_2 , 富大离子亲石元素, 亏损高场强元素), 岩浆具有俯冲板片的印记 (Wilson, 1989). 岩石具有较高的 Al_2O_3 含量, Eu 异常不明显, 表明斜长石未能在岩浆演化早期结晶, 因而反映了一个有流体参与交

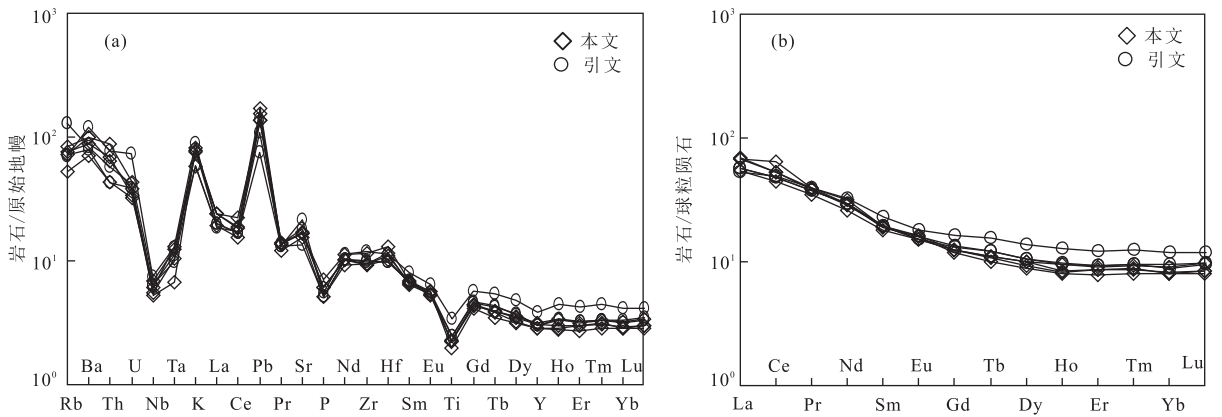


图 7 别鲁阿嘎希花岗闪长岩微量元素原始地幔标准化蛛网(a)和球粒陨石标准化 REE 分布模式(b)

Fig.7 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram (a) and Chondrite-normalized REE patterns (b) for the Bieluagaxi granodiorite

球粒陨石标准化值和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough(1989);引文据尹继元等(2012)

表 3 别鲁阿嘎希花岗闪长岩 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 3 The Sr-Nd isotopic compositions of Bieluagaxi granodiorite

样号	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$T_{2\text{DM}}(\text{Ma})$
BL2	0.388 537	0.706 161 \pm 8	0.126 689	0.512 787 \pm 5	0.704 399	0.512 523	5.8	610
BL4	0.431 488	0.706 254 \pm 4	0.121 195	0.512 814 \pm 5	0.704 297	0.512 561	6.5	550

注:误差为 2σ ;Nd 和 Sr 同位素初始值根据 318.7 Ma 计算。

代的源区 (Yuan *et al.*, 2009). 低的 Th/Yb 比值 (2.3~5.2) 和相对高的 Ba/La 比值 (36.9~42.2) 表明沉积物对岩浆成分贡献很小 (Woodhead *et al.*, 2001). 花岗闪长岩具有相对高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (5.8~6.5), 比较低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值 (0.704 297~0.704 399), 相对年轻的 Nd 同位素模式年龄 (550~610 Ma), 表明其源区为亏损地幔 (Rapp and Watson, 1995) 或由亏损地幔而来的年轻地壳 (Xu *et al.*, 2013). 如果花岗闪长岩是幔源基性岩浆直接分异的产物, 花岗闪长岩的周围应有大量晚古生代基性岩出露, 而事实上, 西准噶尔地区很少发现与花岗岩时空关系密切的基性-超基性岩 (苏玉平等, 2006), 当然也不排除有基性岩浆底侵的可能性. 西准噶尔地区有大量古生代花岗岩出露, 伴有岛弧、蛇绿 (混杂) 岩、增生杂岩、基性岩墙等 (Hu *et al.*, 2000; Chen and Jahn, 2004), 未见到前寒武岩石或老的片岩、片麻岩等, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 与西准噶尔地区古生代洋壳物质相近 (Gao *et al.*, 2014), 表明西准噶尔基底可能是新元古代至早古生代早期由亏损地幔演化来的洋壳和岛弧建造组成的年轻地壳, 别鲁阿嘎希花岗闪长岩的源岩可能是由亏损地幔形成不久的年轻地壳 (由洋壳和岛弧组成).

5.3 构造背景及成岩过程

花岗岩的微量元素组成明显受其成岩的构造环境制约, Pearce *et al.* (1984) 对形成于不同构造背景下的大量花岗岩微量元素进行了统计研究, 在此基础上提出了适用性较好的花岗岩构造环境的微量元素判别图. 在 R_2 - R_1 图解中 (图 8a), 别鲁阿嘎希花岗闪长岩样品均落入碰撞前花岗岩区, 在 Rb-Y+Nb 图解中, 样品都落在火山弧花岗岩 (VAG) 区域 (图 8b), 这表明该花岗闪长岩具有火山弧花岗岩类型的特征.

西准噶尔晚石炭世早期的构造背景目前仍然存在着不同看法, 一些学者认为是岛弧环境 (Chen *et al.*, 2010; 陈家富等, 2010; Shen *et al.*, 2012); 另一些学者认为是后碰撞环境 (韩宝福等, 2006; Zhou *et al.*, 2008). 张弛和黄莹 (1992) 认为达拉布特洋壳形成于早泥盆世, 并至少从中泥盆世开始不断向南北两侧的大陆板块下俯冲, 而在石炭期末, 大洋基本消减殆尽导致岛弧和小洋盆强烈挤压、碰撞关闭, 之后出现一个以挤压结束且伸展开始为特征的动力学演化阶段, 晚石炭世-早二叠世属于后碰撞环境, 且该构造背景一直持续到早二叠世 (韩宝福等, 2006; Chen *et al.*, 2010; 高睿等, 2013). 西准噶尔晚石炭

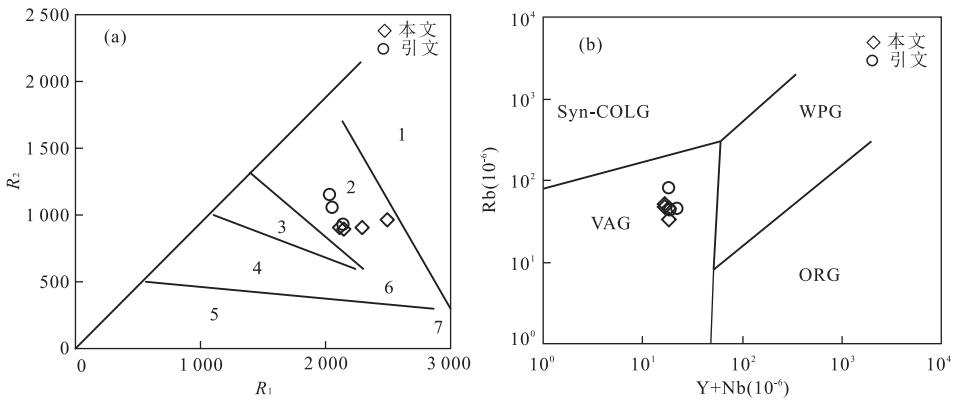


图 8 别鲁阿嘎希花岗闪长岩 R_2-R_1 (a) 和 $Rb-Y+Nb$ (b) 判别

Fig.8 R_2-R_1 (a) and $Rb-Y+Nb$ (b) discriminant diagrams of Bieluogaxi granodiorite

图 a 底图据 Bachelor and Bowden(1985);图 b 底图据 Pearce *et al.*(1984).1.地幔分异花岗岩;2.碰撞前花岗岩;3.碰撞后隆起花岗岩;4.晚造山花岗岩;5.非造山花岗岩;6.同碰撞花岗岩;7.后造山花岗岩.WPG.板内花岗岩;VAG.弧花岗岩;Syn-OLG.同碰撞花岗岩;ORG.洋脊花岗岩,引文据尹继元等(2012)

世早期的花岗岩主要由 I 型花岗岩组成,并没有与后碰撞相关的 A 型花岗岩的报道(尹继元等, 2013),别鲁阿嘎希花岗闪长岩(318.7 Ma)与晚石炭世晚期后碰撞环境形成的哈图(302.0 Ma;韩宝福等, 2006)、庙尔沟(305.0 Ma)、阿克巴斯套(303 Ma)和红山(301.0 Ma) A 型花岗岩地球化学特征存在明显差异.与区域性断裂达尔布特断裂密切相关的克拉玛依蛇绿混杂岩带,形成于中奥陶世至早泥盆世,并于早石炭世早期俯冲侵位(高睿等, 2013).结合上述特征,表明该花岗闪长岩并非形成于后碰撞环境,而是与洋壳俯冲密切相关的.综合分析,笔者认为别鲁阿嘎希花岗闪长岩形成于碰撞前的洋壳俯冲环境.

该地区在晚石炭世早期处于达尔布特洋壳俯冲阶段向碰撞后环境过渡阶段(韩宝福等, 2006; Zhou *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2010; 高睿等, 2013),且本区 I 型花岗岩的形成与俯冲密切相关(高睿等, 2013).由俯冲的洋壳下插到地幔楔下发生部分熔融所产生的原生岩浆必定会在其最终喷出地表或侵入到上部地壳前或多或少与地幔楔和地壳发生作用(肖龙等, 2004),那么岩石中地幔组分的保留是板片熔融最直接的证据.典型的大洋中脊玄武岩的 $Mg^\#$ 为 60,所产生的岩浆 $Mg^\#$ 远低于 60. Rapp(1997)证明了玄武岩部分熔融产生的熔体 $Mg^\# < 45$,样品 $Mg^\#$ 高($Mg^\# = 49 \sim 59$)表明岩浆经历了与地幔楔的相互作用,板片熔体受到地幔楔的混染. Tatsumi *et al.*(1986)认为典型的由俯冲洋壳熔融形成的熔体会带有高强度元素,而俯冲洋壳脱水形成的流体富含大离子亲石元素却不带有高强度元素.别鲁阿

嘎希花岗闪长岩富集 K、Sr、Ba 和 Pb,相对亏损高强度元素 Nb、Ta、P 和 Ti,这说明俯冲洋壳脱水形成的流体参与了别鲁阿嘎希花岗闪长岩的形成.因地幔岩一般不能直接熔融形成花岗岩,在 0.5 ~ 3.2 GPa,水饱和情况下,玄武质岩石发生部分熔融,随着熔融程度逐渐增大可依次产生花岗质和花岗闪长质岩浆(Green, 1982).结合火山弧环境及本区样品的同位素特点 ($(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.704\ 297 \sim 0.704\ 399$ 和 $\epsilon_{Nd}(t) = 5.8 \sim 6.5$),笔者推测在晚石炭世早期,达尔布特洋壳向北俯冲至地幔楔下部时,产生的流体与地幔楔共同底侵加热由亏损地幔形成不久的年轻地壳(洋壳和岛弧),使其部分熔融形成了晚石炭世早期别鲁阿嘎希花岗闪长岩.

6 结论

(1) 本文获得别鲁阿嘎希花岗闪长岩的年龄为 318.7 ± 3.3 Ma,表明其形成时代为晚石炭早期.

(2) 西准噶尔基底可能是新元古代至早古生代早期由亏损地幔演化来的洋壳和岛弧建造组成的年轻地壳.

(3) 晚石炭世早期,达尔布特至地幔楔下部,俯冲洋壳板片脱水产生富集大离子亲石元素的流体在上升过程中与地幔楔共同作用,底侵加热由亏损地幔形成不久的年轻地壳(洋壳和岛弧),使其部分熔融形成了别鲁阿嘎希花岗闪长岩.

致谢: 鄯圣武、杨维、易逸、赵龙、晏文博、杨阳、郁军建等参加了大量野外及室内试验工作,匿名评

委老师对本文提出了许多宝贵的建设性意见,在此一并致以衷心感谢!

References

- An, F., Zhu, Y. F., 2007. Studies on Geology and Geochemistry of Alteration-Type Ore in Hatu Gold Deposit (Western Junggar), Xinjiang, NW China. *Mineral Deposits*, 26(6): 621—633 (in Chinese with English abstract).
- Anderson, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that Do not Report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1—2): 59—79. doi: 10.1016/S0009—2541(02)00195—X
- Bachelor, R. A., Bowden, P., 1985. Petrographic Interpretation of Granitoid Rocks Series Using Multicationic Parameters. *Chemical Geology*, 48(1—4): 43—55. doi: 10.1016/0004—2541(85)90034—8
- Barbarin, B., 1999. A Review of the Relationships between Granitoid Types, Their Origins and Their Geodynamic Environments. *Lithos*, 46(3): 605—626. doi: 10.1016/S0024—4937(98)00085—1
- Chappell, B. W., White, A. J. R., 1992. I- and S-Type Granites in the Lachlan Fold Belt. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83: 1—26. doi: 10.1017/S0263593300007720
- Chen, B., Arakawa, Y., 2005. Elemental and Nd-Sr Isotopic Geochemistry of Granitoids from the West Junggar Foldbelt (NW China), with Implications for Phanerozoic Continental Growth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(5): 1307—1320. doi: 10.1016/j.gca.2004.09.019
- Chen, B., 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. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 691—703. doi: 10.1016/S1367—9120(03)00118—4
- Chen, J. F., Han, B. F., Ji, J. Q., et al., 2010. Zircon U-Pb Ages and Tectonic Implications of Paleozoic Plutons in Northern West Junggar, North Xinjiang, China. *Lithos*, 115(1—4): 137—152. doi: 10.1016/j.lithos.2009.11.014
- Chen, J. F., Han, B. F., Zhang, L., 2010. Geochemistry, Sr-Nd Isotopes and Tectonic Implications of Two Generations of Late Paleozoic Plutons in Northern West Junggar, Northwest China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2317—2335 (in Chinese with English abstract).
- Faure, G., 1986. Principles of Isotope Geology, Second Edition. John Wiley and Sons, New, York, 589.
- Feng, Y., Coleman, R. G., Tilton, G., et al., 1989. Tectonic Evolution of the West Junggar Region, Xinjiang, China. *Tectonics*, 8(4): 729—752. doi: 10.1029/TC008i004p00729
- Gao, R., Xiao, L., Pirajno, F., et al., 2014. Carboniferous-Permian Extensive Magmatism in the West Junggar, Xinjiang, Northwestern China: Its Geochemistry, Geochronology, and Petrogenesis. *Lithos*, 204: 125—143. doi: 10.1016/j.lithos.2014.05.028
- Gao, R., Xiao, L., Wang, G. C., et al., 2013. Paleozoic Magmatism and Tectonic Setting in West Junggar. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10): 3413—3434 (in Chinese with English abstract).
- Geng, H. Y., Sun, M., Yuan, C., 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? *Chemical Geology*, 266(3—4): 364—389. doi: 10.1016/j.chemgeo.2009.07.001
- Gill, J. B., 1981. Orogenic Andesites and Plate Tectonics. Springer-Verlag, Berlin.
- Green, T. H., 1982. Anatexis of Mafic Crust and High Pressure Crystallisation of Andesite. In: Thorpe, R. S., ed., Andesites. John Wiley and Sons, New York, 465—487.
- Han, B. F., Wang, S. G., Jahn, B. M., et al., 1997. Depleted-Mantle Source for the Ulungur River A-Type Granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd-Sr Isotopic Evidence, and Implications for Phanerozoic Crustal Growth. *Chemical Geology*, 138(3—4): 135—159. doi: 10.1016/S0009—2541(97)00003—X
- Han, B. F., Ji, J. Q., Song, B., et al., 2006. Late Paleozoic Vertical Growth of Continental Crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of Post-Collisional Plutonism. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1077—1086 (in Chinese with English abstract).
- Hoskin, P. W. O., Black, L. P., 2000. Metamorphic Zircon Formation by Solid-State Recrystallization of Protolith Igneous Zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423—439. doi: 10.1046/j.1525—1314.2000.00266.x
- Hu, A. Q., Jahn, B. M., Zhang, G. X., et al., 2000. Crustal Evolution and Phanerozoic Crustal Growth in Northern Xinjiang: Nd Isotopic Evidence. Part I. Isotopic Characterization of Basement Rocks. *Tectonophysics*, 328(1—2): 15—51. doi: 10.1016/S0040—1951(00)00176—1
- Jahn, B. M., 2004. The Central Asian Orogenic Belt and Growth of the Continental Crust in the Phanerozoic. *Geological Society, London, Special Publications*, 226: 73—100. doi: 10.1144/GSL.SP.2004.226.01.05
- Jin, C. W., Xu, Y. S., 1997. Petrology and Genesis of the Bieluogaxi Granitoids in Tuoli, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 13(4): 529—537 (in Chinese with English abstract).
- Jin, C. W., Zhang, X. Q., 1993. A Geochronology and Geneses

- of the Western Junggar Granitoids, Xinjiang, China. *Scientia Geologica Sinica*, 28(1): 28—36 (in Chinese with English abstract).
- Koschek, G., 1993. Origin and Significance of the SEM Cathodoluminescence from Zircon. *Journal of Microscopy*, 171(3): 223—232. doi: 10.1111/j.1365—2818.1993.tb03379.x
- Kwon, S. T., Tilton, G. R., Coleman, R. G., et al., 1989. Isotopic Studies Bearing on the Tectonics of the West Junggar Region, Xinjiang, China. *Tectonics*, 8(4): 719—727. doi: 10.1029/TC008i004p00719
- Li, Z. H., Han, B. F., Li, X. Z., et al., 2004. Microgranular Dioritic Enclaves in Junggar Granites and Their Implications for the Origin and Evolution of Post-Collisional Granitic Magmatism in North Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23(3): 214—226 (in Chinese with English abstract).
- Ling, W. L., Duan, R. C., Xie, X. J., et al., 2009. Contrasting Geochemistry of the Cretaceous Volcanic Suites in Shandong Province and Its Implications for the Mesozoic Lower Crust Delamination in the Eastern North China Craton. *Lithos*, 113(3—4): 640—658. doi: 10.1016/j.lithos.2009.07.001
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010a. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1—2): 537—571. doi: 10.1093/petrology/egp082
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Zong, K. Q., et al., 2010b. Reappraisal and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535—1546. doi: 10.1007/s11434—010—3052—4
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1—2): 34—43. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Ludwig, K. R., 2003. ISOPLOT 3.00; A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley.
- Ma, C., Xiao, W. J., 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. *Lithos*, 140—141: 152—165. doi: 10.1016/j.lithos.2012.02.005
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*, 37: 215—224. doi: 10.1016/0012—8252(94)90029—9
- Miller, C. F., 1985. Are Strongly Peraluminous Magmas Derived from Pelitic Sedimentary Sources? *The Journal of Geology*, 93(6): 673—689. doi: 10.1086/628995
- No. 11 Geological Party of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, 1985. 1: 50 000 Geological Survey Report. Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Turpan (in Chinese).
- 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. doi: 10.1093/petrology/25.4.956
- 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. doi: 10.1007/BF00384745
- Rapp, R. P., Watson, E. B., 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8—32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891—931. doi: 10.1093/petrology/36.4.891
- Rapp, R. P., 1997. Heterogeneous Source Regions for Archean Granitoids. In: Wit, M. J., Ashwal, L. D., eds., *Greenstone Belts*. Oxford University Press, Oxford, 35—37.
- Sengör, 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. doi: 10.1038/364299a0
- Shen, P., Shen, Y. C., Li, X. H., et al., 2012. Northwestern Junggar Basin, Xiemisitai Mountains, China: A Geochemical and Geochronological Approach. *Lithos*, 140—141: 103—118. doi: 10.1016/j.lithos.2012.02.004
- Su, Y. P., Tang, H. E., Hou, G. S., et al., 2006. Geochemistry of Aluminous A-Type Granites along Darabut Tectonic Belt in West Junggar, Xinjiang. *Geochemica*, 35(1): 55—67 (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. doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
- Tang, G. J., Wang, Q., 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). *Chemical Geology*,

- 277(3-4); 281-300. doi: 10.1016/j.chemgeo.2010.08.012
- Tatsumi, Y., Hamilton, D. L., Nesbitt, R. W., 1986. Chemical Characteristics of Fluid Phase Released from a Subducted Lithosphere and Origin of Arc Magmas: Evidence from High-Pressure Experiments and Natural Rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 29(1-4): 293-309. doi: 10.1016/0377-0273(86)90049-1
- Wang, R., Zhu, Y. F., 2007. Geology of the Baobei Gold Deposit in Western Junggar and Zircon SHRIMP Age of Its Wall-Rocks, Western Junggar (Xinjiang, NW China). *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 590-602 (in Chinese with English abstract).
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407-419. doi: 10.1007/BF00402202
- Wilson, M., 1989. Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach. Unwin Hyman, London, 466.
- Woodhead, J. D., Hergt, J. M., Davidson, J. P., et al., 2001. Hafnium Isotope Evidence for 'Conservative' Element Mobility during Subduction Zone Processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 192(3): 331-346. doi: 10.1016/S0012-821X(01)00453-8
- Wu, F. Y., Li, X. H., Yang, J. H., et al., 2007. Discussions on the Petrogenesis of Granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217-1238 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Jahn, B. M., Wilde, S. A., et al., 2003. Highly Fractionated I-Type Granites in NE China (I): Geochronology and Petrogenesis. *Lithos*, 66(3-4): 241-273. doi: 10.1016/S0024-4937(02)00222-0
- Xiao, L., Rapp, P. R., Xu, J. F., 2004. The Role of Deep Processes Controls on Variation of Compositions of Adakitic Rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 219-228 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Han, C. M., Yuan, C., et al., 2006. Unique Carboniferous-Permian Tectonic-Metallogenic Framework of Northern Xinjiang (NW China): Constraints for the Tectonics of the Southern Paleasian Domain. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1062-1076 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Kusky, T., 2009. Geodynamic Processes and Metallogenesis of the Central Asian and Related Orogenic Belts: Introduction. *Gondwana Research*, 16(2): 167-169. doi: 10.1016/j.gr.2009.05.001
- Xu, Q. Q., Ji, J. Q., Zhao, L., et al., 2013. Tectonic Evolution and Continental Crust Growth of Northern Xinjiang in Northwestern China: Remnant Ocean Model. *Earth Science Reviews*, 126: 178-205. doi: 10.1016/j.earscirev.2013.08.005
- Yang, G. X., Li, Y. J., Gu, P. Y., et al., 2012. Geochronological and Geochemical Study of the Darbut Ophiolitic Complex in the West Junggar (NW China): Implications for Petrogenesis and Tectonic Evolution. *Gondwana Research*, 21(4): 1037-1049. doi: 10.1016/j.gr.2011.07.029
- Yin, J. Y., Chen, W., Yuan, C., et al., 2013. Ages and Tectonic Implication of Late Paleozoic Plutons in the West Junggar, North Xinjiang: Evidence from LA-ICP-MS Zircon Geochronology. *Geochimica*, 42(5): 414-429 (in Chinese with English abstract).
- Yin, J. Y., Yuan, C., Sun, M., et al., 2010. Late Carboniferous High-Mg Dioritic Dikes in Western Junggar, NW China: Geochemical Features, Petrogenesis and Tectonic Implications. *Gondwana Research*, 17(1): 145-152. doi: 10.1016/j.gr.2009.05.011
- Yin, J. Y., Yuan, C., Sun, M., et al., 2012. Age, Geochemical Features and Possible Petrogenesis Mechanism of Early Permian Magnesian Diorite in Hatu, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2171-2182 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, C., Sun, M., Xiao, W. J., et al., 2008. Garnet-Bearing Tonalitic Porphyry from East Kunlun, Northeast Tibetan Plateau: Implications for Adakite and Magmas from the MASH Zone. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1489-1510. doi: 10.1007/s00531-008-0335-y
- Zhang, C., Huang, X., 1992. The Ages and Tectonic Settings of Ophiolites in West Junggar, Xinjiang. *Geological Review*, 38(6): 509-524 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. E., Xiao, W. J., Han, C. M., et al., 2011. A Devonian to Carboniferous Intra-Oceanic Subduction System in Western Junggar, NW China. *Lithos*, 125(1-2): 592-606. doi: 10.1016/j.lithos.2011.03.013
- Zhang, L. C., Wan, B., Jiao, X. J., et al., 2006. Characteristics and Geological Significance of Adakitic Rocks in Copper-Bearing Porphyry in Baogutu, Western Junggar. *Geology in China*, 33(3): 626-631 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. H., Wang, Q., Xiong, X. L., et al., 2006. Two Types of Adakites in North Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1249-1265 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, T. F., Yuan, F., Fan, Y., et al., 2008. Granites in the Sawuer Region of the West Junggar, Xinjiang Province, China: Geochronological and Geochemical Characteristics and Their Geodynamic Significance. *Lithos*, 106(3-4): 191-206. doi: 10.1016/j.lithos.2008.06.014

附中文参考文献

- 安芳,朱永峰,2007.新疆哈图金矿蚀变岩型矿体地质和地球化学研究.矿床地质,26(6):621—633.
- 陈家富,韩宝福,张磊,2010.西准噶尔北部晚古生代两期侵入岩的地球化学、Sr-Nd 同位素特征及其地质意义.岩石学报,26(8):2317—2335.
- 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.岩石学报,29(10):3413—3434.
- 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.岩石学报,22(5):1077—1086.
- 金成伟,徐永生,1997.新疆托里别鲁阿嘎希地区花岗岩类的岩石学和成因.岩石学报,13(4):529—537.
- 金成伟,张秀棋,1993.新疆西准噶尔花岗岩类的时代及其成因.地质科学,28(1):28—36.
- 李宗怀,韩宝福,李辛子,等,2004.新疆准噶尔地区花岗岩中微粒闪长质包体特征及后碰撞花岗质岩浆起源和演化.岩石矿物学杂志,23(3):214—226.
- 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.地球化学,35(1):55—67.
- 王瑞,朱永峰,2007.西准噶尔宝贝金矿地质与容矿火山岩的锆石 SHRIMP 年龄.高校地质学报,13(3):590—602.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第十一地质大队,1985.1:50 000 普查地质报告.吐鲁番:新疆地质矿产局.
- 吴福元,李献华,杨进辉,等,2007.花岗岩成因研究的若干问题.岩石学报,23(6):1217—1238.
- 肖龙,Rapp,R.P.,许继峰,2004.深部过程对埃达克质岩石成分的制约.岩石学报,20(2):219—228.
- 肖文交,韩春明,袁超,等,2006.新疆北部石炭纪—二叠纪独特的构造—成矿作用:对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约.岩石学报,22(5):1062—1076.
- 尹继元,陈文,袁超,等,2013.新疆西准噶尔晚古生代侵入岩的年龄和构造意义:来自锆石 LA-ICP-MS 定年的证据.地球化学,42(5):414—429.
- 尹继元,袁超,孙敏,等,2012.新疆哈图早二叠世富镁闪长岩的时代,地球化学特征和可能的成因机制.岩石学报,28(7):2171—2182.
- 张弛,黄莹,1992.新疆西准噶尔蛇绿岩形成时代和环境的探讨.地质论评,38(6):509—524.
- 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.中国地质,33(3):626—631.
- 赵振华,王强,熊小林,等,2006.新疆北部的两类埃达克岩.岩石学报,22(5):1249—1265.