

doi:10.3799/dqkx.2015.043

西准噶尔谢米斯台西段花岗岩年代学、地球化学、 锆石 Lu-Hf 同位素特征及大地构造意义

杨 钢^{1,2}, 肖 龙^{2*}, 王国灿^{2,3}, 高 睿^{2,4}, 贺新星^{2,5},
鄢圣武^{2,6}, 杨 维^{2,7}, 晏文博², 周 佩²

1. 中国地震局地震研究所地震大地测量重点实验室, 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. 四川省地质调查院, 四川成都 610081
7. 贵州省煤田地质局地质勘察研究院, 贵州贵阳 550008

摘要: 西准噶尔谢米斯台花岗岩研究程度偏低,运用锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学、地球化学及锆石 Lu-Hf 同位素方法研究西准谢米斯台西段地区花岗岩,结果表明:谢米斯台岩体(427.6 ± 2.3 Ma)和哈勒盖特希岩体(428.6 ± 2.5 Ma)均形成于中志留世;谢米斯台碱长花岗岩地球化学特征类似于I型花岗岩,哈勒盖特希碱长花岗岩地球化学特征类似于 A 型花岗岩;锆石 Hf 同位素组成较均一, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=12.4\sim14.5$,二阶段模式年龄 t_{DM2} 变化范围在 497~603 Ma 之间,I型花岗岩和 A₂ 型花岗岩可能形成于后碰撞阶段的挤压—伸展转变期,是中志留世额尔齐斯—斋桑洋壳向南俯冲至波谢库尔—成吉斯火山弧底部,俯冲板片与岛弧底部岩石圈之间剪切带的物质发生变形、变质及部分熔融作用,使得由亏损地幔形成不久的年轻地壳(由洋壳和岛弧组成)发生部分熔融形成的长英质岩浆经进一步分离结晶作用形成分异I型花岗岩和高温、缺水 A₂ 型花岗岩,A₂ 型花岗岩较I型花岗岩分离结晶程度高。
关键词: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄;谢米斯台西段;Hf 同位素;A 型花岗岩;地球化学。
中图分类号: P534 **文章编号:** 1000—2383(2015)03—0548—15 **收稿日期:** 2014—05—06

Geochronology, Geochemistry and Zircon Lu-Hf Study of Granites in Western Section of Xiemisitai Area, Western Junggar

Yang Gang^{1,2}, Xiao Long^{2*}, Wang Guocan^{2,3}, Gao Rui^{2,4}, He Xinxing^{2,5},
Yan Shengwu^{2,6}, Yang Wei^{2,7}, Yan Wenbo², Zhou Pei²

1. Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Earthquake, 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. Geological Survey of Sichuan Province, Chengdu 610081, China
7. Institute of Geological Prospecting, Coal Mine Exploration of Guizhou Province, Guiyang 550008, China

Abstract: LA-ICP-MS U-Pb zircon age, geochemistry and Lu-Hf isotopic data for Xiemisitai and Halegaitexi granitic plutons in Western Section of Xiemisitai Area, Western Junggar. The results show that the Xiemisitai granite pluton (427.6 ± 2.3 Ma) and the Halegaitexi granite pluton (428.6 ± 2.5 Ma) both formed in the Middle Devonian. The geochemical characteristics of the Xiemisitai alkali feldspar granite are similar to I-type granite, and the geochemical characteristics of the Halegaitexi alkali feldspar granite are similar to A-type granite. The zircon Hf isotopic composition is relatively uniform, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=12.4\sim14.5$, and the two-stage model age t_{DM2} varies from 497 to 603 Ma. I-type granite and A₂-type granite may have formed during the extensional stage of the collisional orogenic belt. The Xiemisitai granite pluton is formed by the partial melting of the young crust (formed by the oceanic crust and island arc) during the extensional stage of the collisional orogenic belt. The material of the collisional orogenic belt undergoes deformation, metamorphism and partial melting, resulting in the formation of the felsic magma. The felsic magma undergoes further fractionation crystallization to form the differentiated I-type granite and the high-temperature, water-deficient A₂-type granite. The A₂-type granite has a higher degree of fractionation crystallization than the I-type granite.
基金项目: 中国地质调查局项目“西准噶尔克拉玛依后山地区三维地质调查试点”(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,主要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. 西准噶尔谢米斯台西段花岗岩年代学、地球化学、锆石 Lu-Hf 同位素特征及大地构造意义. 地球科学——中国地质大学学报,40(3): 548—562.

the western Junggar are presented in this paper, aiming to determine their forming ages, source regions and tectonic settings. LA-ICP-MS zircon yields 427.6 ± 2.3 Ma for Xiemisitai alkali feldspar granites and 428.6 ± 2.5 Ma for Halegaitexi alkali feldspar granites, respectively. Xiemisitai alkali feldspar granites are characterized as the I-type granite, while Halegaitexi alkali feldspar granites have geochemical characteristics similar to the A-type granite. Zircon Lu-Hf isotopic compositions indicate that $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = 12.4 - 14.5$, two-stage model ages (t_{DM2}) range from 497 to 603 Ma. The petrogenesis of I-type and A-type granites were results of different evolutive phases of the same source magma in the compressible to extendable period of the post-collisional phase, which may be derived as follows. The southward subductional Irtysh-Zaysan Oceanic crust subducted to the asthenospheric mantle which is the bottom of Boshchekul-Chingiz volcanic arc, resulted in the asthenospheric mafic magma underplating the lower crust. Then, the lower juvenile basaltic crust derived from the depleted mantle underwent different degrees of partial melting and fractional crystallization to a certain extent to generate the I-type and A₂-type granites.

Key words: LA-ICP-MS zircon U-Pb age; western section of Xiemisitai; Hf isotope; A-type granite; geochemistry.

西准噶尔位于新疆北部,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,北部与阿尔泰造山带接壤,南部与天山造山带接壤(图 1),是中亚造山带的重要组成部分(Feng *et al.*, 1989; Jahn, 2004),因此是研究整个中亚造山带碰撞拼合历史和显生宙地壳生长的热点地区(Feng *et al.*, 1989; 韩宝福等, 1999, 2006; Xiao *et al.*, 2004; 苏玉平等, 2006; Zhou *et al.*, 2008; Geng *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2010; Yin *et al.*, 2010; Shen *et al.*, 2012).

源区性质与基底属性对决定岩浆岩的种类、成因、机制有很大的影响,因此了解并熟悉该地区花岗岩的源区与基底属性非常有必要. 早期国内外学者提出前寒武纪的微地块是准噶尔的基底(Zhang *et*

al., 1984);但随着研究的深入,大部分学者认为准噶尔的基底非常年轻,可能是残余的洋壳与岛弧的复合体(Hu *et al.*, 2000; Chen and Arakawa, 2005; Shen *et al.*, 2012). 西准噶尔地区的埃达克岩、花岗岩及富镁闪长岩都具有正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,低的 Sr 同位素初始值以及年轻的 Nd 模式年龄,这些都表明西准噶尔地区没有古老的大陆地壳,源区由相对年轻的物质组成(Chen and Arakawa, 2005; Geng *et al.*, 2009; Shen *et al.*, 2012). 近年来,一些学者对西准谢米斯台山中段、东段岩浆岩年代学和地球化学方面做了一定研究,揭示了中生代岩浆作用在谢米斯台山的广泛存在,对于西准噶尔北部构造岩浆演化研究具有非常重要的意义(Chen *et al.*, 2010; 孟磊等, 2010; 申萍等, 2010; Shen *et*

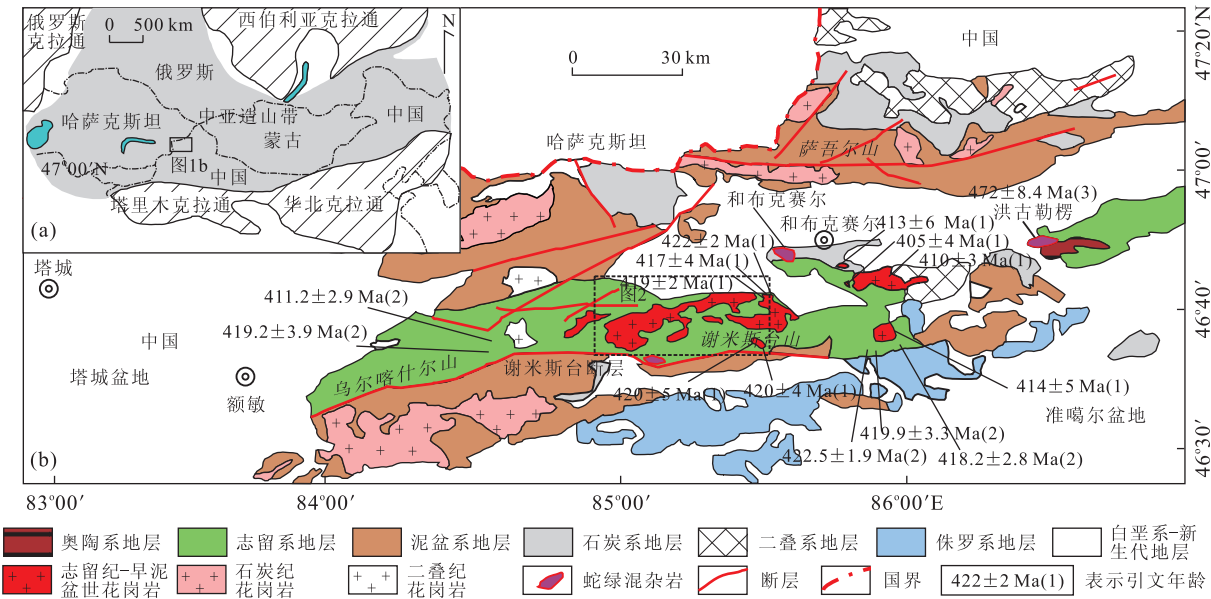


图 1 新疆西准噶尔地区地质图

Fig. 1 Geological map of western Junggar Region, Xinjiang

图 1 改自申萍等(2010),Shen *et al.* (2012). 年龄 1 据 Chen *et al.* (2010); 年龄 2 据 Shen *et al.* (2012); 年龄 3 据张元元和郭召杰(2010)

al. , 2012; 王章棋等, 2014), 但受野外地质条件影响, 谢米斯台山西段岩浆岩研究程度偏低。

本文在详细的野外地质考察基础上, 准确测定花岗岩体的形成时代, 并结合区域上最新的研究成果和锆石 Hf 同位素特征详细讨论西准噶尔西北缘谢米斯台山地区花岗岩体的成因类型, 探讨岩体形成的大地构造背景, 为探讨准噶尔的基底性质与波谢库尔—成吉斯火山岛弧演化过程提供一些参考。

1 地质背景及岩石特征

谢米斯台地区西段广泛出露中酸性火山岩和侵入岩。本文研究的花岗岩体在谢米斯台山西段, 岩体整体呈东—西向展布, 出露面积约为 300 km², 属于岩基, 其未发生变形, 围岩有轻微的变质, 角岩化现象普遍。岩体侵位地层为一套火山岩及火山碎屑岩, 对于其形成时代的认识, 早期成果与近几年研究成果迥异: 新疆维吾尔自治区地质矿产局 (1979, 1993) 认为该地层时代为中泥盆世, 近几年研究的新进展认为该地层时代为志留纪 (Chen *et al.* , 2010; 申萍等, 2010; Shen *et al.* , 2012)。该套火山岩及火山碎屑岩主要为凝灰岩、安山质熔结凝灰岩、流纹斑岩、集块岩、安山岩和英安岩等。

谢米斯台地区断裂构造发育, 主要为和布克赛尔北东向哈拉也门断裂和谢米斯台山南部的北东东—南西西向伊尼萨拉断裂, 次级断裂发育, 近 EW

向、NE 向和 NW 向断裂 (图 2)。近 EW 向断裂与地层走向大致平行, NE、NW 向断裂斜切地层。岩浆岩以中酸性岩为主, 主要为晚志留—早泥盆世 (417~422 Ma) 花岗岩、闪长岩、钾长花岗岩和次火山岩等, 其次为晚石炭—中二叠世花岗岩、花岗斑岩及闪长岩 (Chen *et al.* , 2010; 孟磊等, 2010; 申萍等, 2010; Shen *et al.* , 2012), 在谢米斯台山南侧, 有一蛇绿混杂岩岩带, 为黄建华等 (1995) 所厘定的洪古勒楞蛇绿混杂岩带的西延部分, 赵磊等 (2013) 获得该蛇绿混杂岩 (查干陶盖勒蛇绿岩) 的年龄为 517~519 Ma。

谢米斯台和哈勒盖特希岩体位于谢米斯台山西段, 两岩体呈东西向展布, 岩体内部均为发育较多的暗色细粒中基性包体, 包体呈近椭圆状, 大小约 1~20 cm (图 3)。本文所研究的样品均采集于岩体内部新鲜未遭受蚀变的碱长花岗岩, 谢米斯台碱长花岗岩呈浅肉红色, 具中细粒结构、块状构造, 主要矿物为钾长石 (70%~65%, 多半自形柱状, 粒径 1.3~5.0 mm, 具轻微泥化)、石英 (25%~30%, 他形粒状, 粒径 1.2~2.3 mm), 次要矿物为角闪石 (4%~2%, 半自形柱状, 粒径 0.7~1.2 mm), 副矿物组成包括磁铁矿、磷灰石、锆石等。哈勒盖特希碱长花岗岩呈浅肉红色, 具中细粒结构、块状构造, 主要矿物为钾长石 (68%~64%, 多半自形柱状, 粒径 1.1~4.8 mm)、石英 (24%~32%, 他形粒状, 粒径 0.9~2.4 mm), 次要矿物为黑云母 (1%~3%, 半自形柱

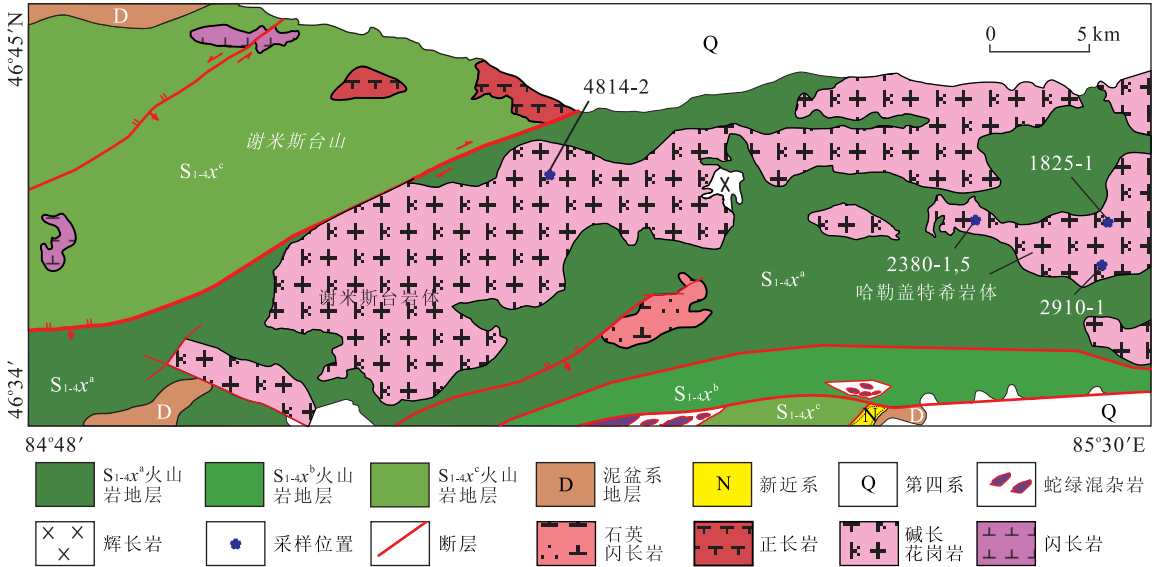


图 2 谢米斯台西段地质图

Fig. 2 Geological map in west part of Xiemisitai Mountain

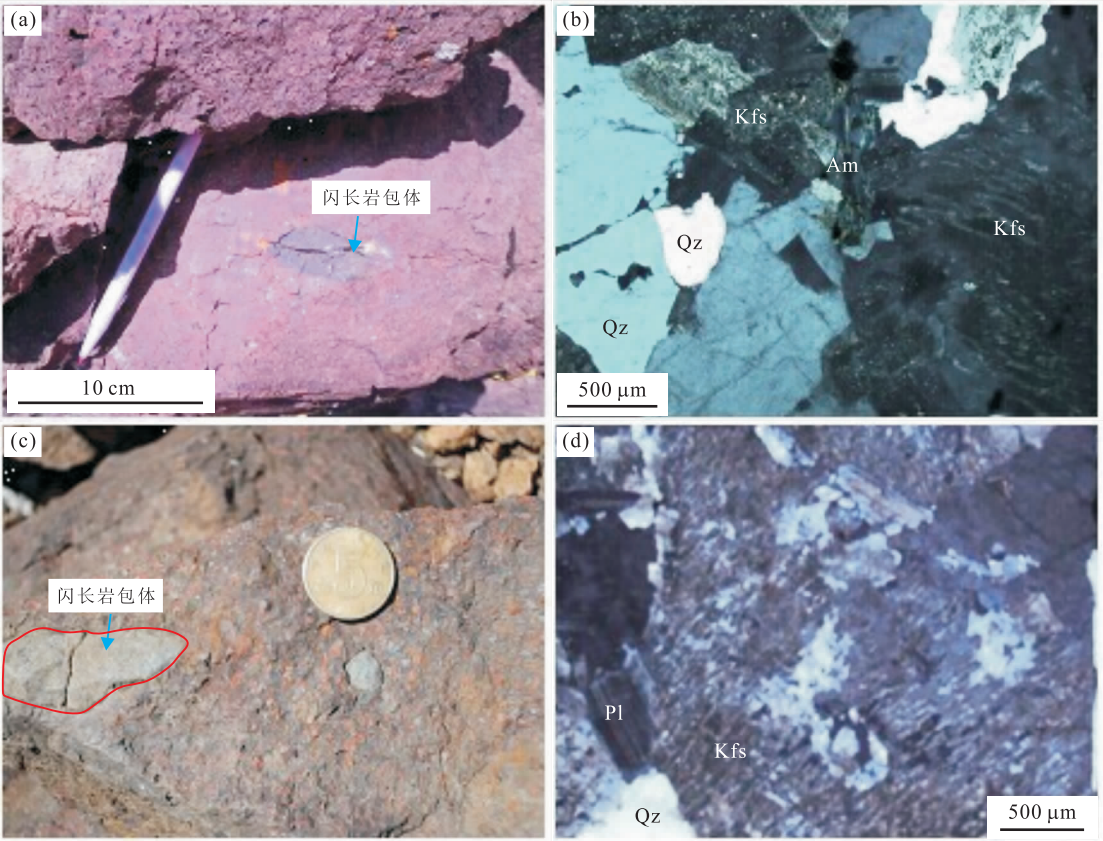


图 3 谢米斯台西段花岗岩野外及显微镜下特征

Fig. 3 Field and microscopic characteristics of granites in west part of Xiemisitai Mountain

碱长花岗岩野外特征(a. 谢米斯台;c. 哈勒盖特希);花岗岩正交镜下特征(b. 谢米斯台;d. 哈勒盖特希);Qz. 石英;Am. 角闪石;Kfs. 钾长石;Pl. 斜长石

状,粒径 0.6~1.4 mm),副矿物组成包括磁铁矿、磷灰石、锆石等(图 3)。

2 样品分析与结果

2.1 样品分析与测试

本文样品的主、微量元素测试在湖北省地质实验研究所完成。所有测试样品粉末均碎至 200 目以下。主量元素采用波长色散型射线荧光光谱分析仪(XRF)进行测定,分析误差<2%。微量元素分析首先采用酸融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 5%。

用于锆石年代学测定的样品在河北廊坊诚信地质服务有限公司利用标准技术对锆石进行了分选,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(GPMR)制靶后进行阴极发光照像,以观察锆石的内部结构。锆石微量元素含量和 U-Pb 同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 LA-ICP-MS 同时

分析完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a。本次测试采用的激光剥蚀束斑直径为 32 μm,激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,两者在进入感应耦合等离子体(ICP)之前通过一个 T 型接头混合。在等离子体中心气流(Ar+He)中加入了少量氮气,以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精密性(Hu *et al.*, 2008)。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值)采用软件 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2008, 2010a, 2010b)完成,样品的 U-Pb 谐和图和年龄加权平均值计算均采用 Isoplot/Ex_ver3 完成(Ludwig, 2003),详细的仪器操作条件和数据处理方法同 Liu *et al.* (2008, 2010a, 2010b)。

锆石 Lu-Hf 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(GPMR)

利用 LA-MC-ICP-MS(激光剥蚀多接受杯电感耦合等离子体质谱系统)进行,分析流程与实验参数见 Hu *et al.* (2012).

2.2 分析结果

2.2.1 锆石 U-Pb 定年结果 用于锆石 U-Pb 年代学测定的哈勒盖特希碱长花岗岩(样号 N1825-1,坐标为 85°27′18″E,46°39′13″N)、谢米斯台碱长花岗岩(样号 N4814-2,坐标为 85°6′28″E,46°41′7″N)锆石样品的部分锆石阴极发光图像见图 4. 图 4a 中,哈勒盖特希碱长花岗岩(样号 N1825-1)锆石多数为短柱状,自形程度较好,颗粒较大,粒径介于 100~200 μm,其岩浆振荡型环带显示较为清晰,少数形态不规则,有破碎;在单偏光显微镜下我们观察到锆石特征,呈淡褐色或无色透明,少数锆石可见到核部,粒径介于 10~30 μm. 谢米斯台碱长花岗岩(N4814-2)测年样品中,锆石呈柱状,多数锆石自形程度高,少数颗粒破碎,形态不完整,粒径约 70~120 μm 不等. 图 4b 中可见不同锆石阴极发光图颜色明暗不一,锆石的振荡环带结构比较清晰,岩浆型锆石特征明显.

哈勒盖特希碱长花岗岩和谢米斯台碱长花岗岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分析数据见表 1. 哈勒盖特希碱长花岗岩锆石 Th 含量变化范围为 $434\times10^{-6}\sim4\,645\times10^{-6}$,U 含量变化范围为 $651\times10^{-6}\sim6\,786\times10^{-6}$,Th/U 比值变化范围为 0.6~1.7. 谢米斯台碱长花岗岩锆石 Th 含量变化范围为 $321\times10^{-6}\sim4\,072\times10^{-6}$,U 含量变化范围为 $412\times10^{-6}\sim3\,928\times10^{-6}$,Th/U 比值变化范围为 0.7~

1.1. 2 个岩体的 Th/U 比值均大于 0.4,反映了岩浆成因锆石的特点(Koschek, 1993; Hoskin and Black, 2000).

哈勒盖特希碱长花岗岩测年点共有 20 个,其中 1 号点年龄为 517.2 Ma,3 号点年龄为 483.5 Ma,年龄较老,测点位置为锆石核部,不代表侵入岩结晶年龄,剩余锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄变化范围为 426.1~432.7 Ma,U-Pb 谐和图(图 5a,5b)显示测试数据基本在谐和线上或其附近,得到剩余锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 428.6 ± 2.5 Ma (MSWD=0.086,*n*=18),表明哈勒盖特希碱长花岗岩结晶时代是中志留世.

谢米斯台碱长花岗岩测年点共有 20 个,其中 7 号点年龄为 490.8 Ma,10 号点年龄为 476.1 Ma,年龄较老,测点位置为锆石核部,不代表侵入岩结晶年龄;1 号、2 号、13 号和 17 号点年龄变化为 300.2~386.8 Ma,时代较新,可能为后期热液活动所致. 14 号、15 号和 16 号点存在 U-Pb 不一致现象,且偏离谐和线较远,因此不能反映岩浆结晶年龄. 剩余锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄变化范围为 423.4~430.3 Ma,U-Pb 谐和图(图 5c,5d)显示剩余测试数据基本在谐和线上或其附近,得到²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 427.6 ± 2.3 Ma (MSWD=0.108,*n*=11).

2.2.2 锆石 Lu-Hf 同位素 2 个花岗岩体中锆石 Lu-Hf 同位素分析测试结果和相关参数计算结果列于表 2,测点号与表 1 对应,测点位置与 U-Pb 定年点位于同一岩浆振荡环带.

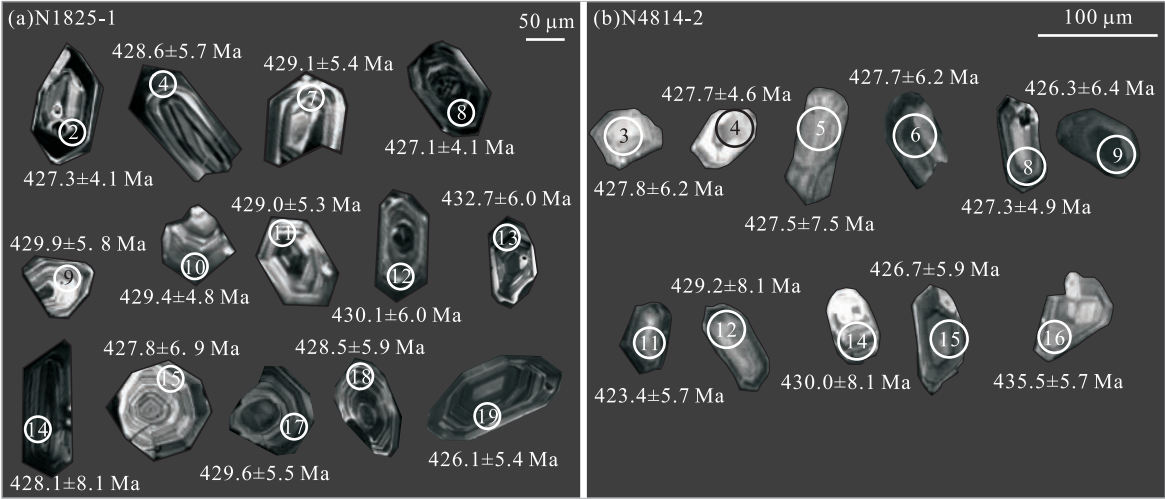


图 4 谢米斯台西段花岗岩部分锆石 CL 图像、测点位置及谐和年龄

Fig. 4 Zircon CL graphics, points sites and concordia ages of granite in Wangfeng area in west part of Xiemisitai Mountain

表 1 谢米斯台西段花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年数据

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating data of granites in west part of Xiemisitai Mountain

分析点	²³² Th (10 ⁻⁶)	²³⁸ U (10 ⁻⁶)	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ Pb			²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U			²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U			²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U			²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		
				比值	1σ	1σ	比值	1σ	1σ	比值	1σ	1σ	年龄(Ma)	1σ	1σ	年龄(Ma)	1σ	1σ
哈勒盖特希碱长花岗岩																		
N1825-1-01	1 147	1 342	0.9	0.074 9	0.003 1	0.867 3	0.033 3	0.083 5	0.000 9	1 065.7	82.6	634.1	18.1	517.2	5.5			
N1825-1-02	3 057	3 155	1.0	0.072 6	0.002 1	0.696 3	0.020 3	0.068 5	0.000 7	1 003.4	58.8	536.6	12.2	427.3	4.1			
N1825-1-03	3 332	2 535	1.3	0.062 8	0.001 9	0.682 1	0.020 3	0.077 9	0.000 8	701.9	64.8	528.0	12.3	483.5	4.7			
N1825-1-04	2 229	1 849	1.2	0.055 3	0.002 1	0.527 1	0.018 8	0.068 7	0.000 9	433.4	85.2	429.9	12.5	428.6	5.7			
N1825-1-05	3 681	2 646	1.4	0.055 8	0.001 8	0.536 1	0.017 0	0.068 8	0.000 8	455.6	74.1	435.8	11.2	429.1	4.9			
N1825-1-06	2 334	1 878	1.2	0.059 9	0.002 2	0.571 9	0.020 7	0.068 4	0.000 8	611.1	79.6	459.2	13.4	426.2	4.8			
N1825-1-07	1 625	1 320	1.2	0.057 9	0.002 5	0.549 3	0.022 0	0.068 8	0.000 9	524.1	92.4	444.5	14.5	429.1	5.4			
N1825-1-08	2 727	2 371	1.2	0.056 4	0.001 8	0.536 4	0.016 9	0.068 5	0.000 7	477.8	72.2	436.1	11.2	427.1	4.1			
N1825-1-09	605	753	0.8	0.075 6	0.003 8	0.728 1	0.038 5	0.069 0	0.001 0	1 084.9	100.0	555.5	22.6	429.9	5.8			
N1825-1-10	4 645	2 878	1.6	0.055 3	0.001 8	0.528 0	0.017 0	0.068 9	0.000 8	433.4	74.1	430.5	11.3	429.4	4.8			
N1825-1-11	3 121	1 828	1.7	0.071 9	0.002 5	0.687 9	0.025 0	0.068 8	0.000 9	983.3	72.2	531.5	15.1	429.0	5.3			
N1825-1-12	2 604	2 657	1.0	0.062 6	0.002 4	0.596 3	0.021 5	0.069 0	0.001 0	694.5	80.4	474.9	13.7	430.1	6.0			
N1825-1-13	2 867	2 160	1.3	0.068 4	0.002 7	0.661 4	0.027 1	0.069 4	0.001 0	879.6	84.3	515.4	16.5	432.7	6.0			
N1825-1-14	965	1 033	0.9	0.057 4	0.003 7	0.546 5	0.035 9	0.068 7	0.001 3	505.6	137.9	442.7	23.5	428.1	8.1			
N1825-1-15	434	651	0.7	0.062 5	0.003 8	0.588 6	0.033 7	0.068 6	0.001 1	700.0	129.6	470.0	21.6	427.8	6.9			
N1825-1-16	888	1 044	0.9	0.062 7	0.003 1	0.605 0	0.031 0	0.069 1	0.001 1	698.2	304.6	480.4	19.6	430.7	6.8			
N1825-1-17	713	1 008	0.7	0.056 9	0.002 2	0.544 6	0.020 7	0.068 9	0.000 9	487.1	87.0	441.4	13.6	429.6	5.5			
N1825-1-18	1 865	1 701	1.1	0.058 9	0.002 2	0.564 1	0.020 9	0.068 7	0.001 0	561.1	81.5	454.2	13.6	428.5	5.9			
N1825-1-19	1 077	1 309	0.8	0.053 4	0.002 0	0.510 7	0.019 1	0.068 3	0.000 9	346.4	85.2	418.9	12.8	426.1	5.4			
N1825-1-20	3 945	6 786	0.6	0.068 4	0.003 0	0.660 7	0.030 0	0.068 8	0.001 3	879.6	90.7	515.1	18.3	428.7	8.0			
谢米斯台碱长花岗岩																		
N4814-2-1	1 642	1 594	1.0	0.071 4	0.002 3	0.562 9	0.018 2	0.058 9	0.001 4	968.5	66.7	453.4	11.8	369.0	8.8			
N4814-2-2	4 072	3 928	1.0	0.229 2	0.005 9	1.502 9	0.035 9	0.047 7	0.000 6	3 046.0	40.6	931.6	14.6	300.2	3.8			
N4814-2-3	342	412	0.8	0.057 4	0.003 6	0.536 3	0.031 9	0.068 6	0.001 0	505.6	138.9	436.0	21.1	427.8	6.2			
N4814-2-4	1 261	1 188	1.1	0.056 9	0.002 3	0.542 4	0.022 0	0.068 6	0.000 8	500.0	88.9	440.0	14.5	427.7	4.6			
N4814-2-5	495	536	0.9	0.068 7	0.004 6	0.647 3	0.039 9	0.068 6	0.001 2	900.0	143.5	506.8	24.6	427.5	7.5			
N4814-2-6	1 368	1 412	1.0	0.089 5	0.003 5	0.849 4	0.033 0	0.068 6	0.001 0	1 416.7	74.5	624.3	18.1	427.7	6.2			
N4814-2-7	925	1 134	0.8	0.060 7	0.002 1	0.662 8	0.021 8	0.079 1	0.000 9	631.5	75.9	516.3	13.3	490.8	5.5			
N4814-2-8	1 298	1 406	0.9	0.085 8	0.002 9	0.817 7	0.027 4	0.068 5	0.000 8	1 400.0	60.2	606.8	15.3	427.3	4.9			
N4814-2-9	381	471	0.8	0.064 1	0.003 8	0.601 2	0.034 6	0.068 4	0.001 1	746.3	124.1	478.0	22.0	426.3	6.4			
N4814-2-10	332	434	0.8	0.062 6	0.003 5	0.665 5	0.037 3	0.076 6	0.001 3	694.5	120.4	517.9	22.8	476.1	8.0			
N4814-2-11	1 050	1 030	1.0	0.063 1	0.003 1	0.591 6	0.028 0	0.067 9	0.000 9	722.2	101.7	471.9	17.9	423.4	5.7			
N4814-2-12	533	724	0.7	0.053 0	0.003 6	0.499 0	0.029 2	0.068 8	0.001 3	331.5	151.8	411.0	19.8	429.2	8.1			

续表 1

分析点	^{232}Th (10^{-6})		^{238}U (10^{-6})	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	比值	1 σ			比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	年龄(Ma)	1 σ	年龄(Ma)	1 σ	年龄(Ma)	1 σ
N4814-2-13	2 319	3 075	0.8	0.125 6	0.005 0	0.030 8	0.959 3	0.030 8	0.056 9	0.001 0	2 036.7	70.4	682.9	16.0	356.9	5.8
N4814-2-14	936	1 113	0.8	0.131 6	0.008 4	0.070 0	1.245 5	0.070 0	0.069 0	0.001 3	2 120.4	112.3	821.4	31.7	430.0	8.1
N4814-2-15	1 824	1 662	1.1	0.102 4	0.004 0	0.035 6	0.962 3	0.035 6	0.068 4	0.001 0	1 677.8	72.4	684.5	18.4	426.7	5.9
N4814-2-16	961	997	1.0	0.114 8	0.004 4	0.042 4	1.114 5	0.042 4	0.069 9	0.000 9	1 877.5	69.9	760.3	20.4	435.5	5.7
N4814-2-17	868	1 177	0.7	0.085 7	0.003 6	0.033 5	0.744 0	0.033 5	0.061 8	0.000 7	1 331.8	80.1	564.7	19.5	386.8	4.4
N4814-2-18	321	455	0.7	0.056 5	0.003 9	0.037 6	0.540 5	0.037 6	0.069 0	0.001 4	472.3	149.1	438.8	24.8	430.1	8.3
N4814-2-19	448	532	0.8	0.058 7	0.003 7	0.032 8	0.554 2	0.032 8	0.069 0	0.001 2	553.7	138.9	447.7	21.4	430.3	7.5
N4814-2-20	477	512	0.9	0.058 2	0.003 0	0.029 4	0.558 0	0.029 4	0.069 0	0.001 0	600.0	119.4	450.2	19.2	430.0	6.0

表 2 谢米斯台西段花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 2 Zircon Lu-Hf isotopic analysis results of granites in west part of Xiemisitai Mountain

测点号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1 σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1 σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	1 σ	年龄(Ma)	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	1 σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	1 σ	t_{DM1} (Ma)	t_{DM2} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
哈勒盖特希碱长花岗岩														
N1825-1-6	0.282 889	0.000 010	0.001 492	0.000 003	0.047 059	0.000 303	426.2	4.2	0.6	13.5	0.7	521	550	-0.96
N1825-1-7	0.282 878	0.000 011	0.002 162	0.000 059	0.074 503	0.001 959	429.1	3.7	0.6	12.7	0.7	547	587	-0.93
N1825-1-9	0.282 922	0.000 010	0.002 219	0.000 078	0.070 719	0.002 474	429.9	5.3	0.6	14.5	0.7	483	497	-0.93
N1825-1-11	0.282 904	0.000 011	0.001 585	0.000 018	0.054 474	0.000 824	429.0	4.7	0.6	13.7	0.7	500	526	-0.95
N1825-1-12	0.282 920	0.000 014	0.002 200	0.000 095	0.067 869	0.002 120	430.1	5.2	0.7	14.4	0.8	486	501	-0.93
N1825-1-14	0.282 912	0.000 013	0.002 216	0.000 074	0.065 818	0.001 258	428.1	4.9	0.7	14.0	0.7	498	519	-0.93
谢米斯台碱长花岗岩														
N4814-2-14	0.282 868	0.000 009	0.002 012	0.000 019	0.066 244	0.001 039	430.0	3.4	0.6	12.4	0.6	559	603	-0.94
N4814-2-11	0.282 917	0.000 013	0.001 920	0.000 059	0.064 961	0.001 309	423.4	5.1	0.7	14.2	0.7	486	504	-0.94
N4814-2-6	0.282 879	0.000 011	0.001 891	0.000 051	0.067 577	0.002 224	427.7	3.8	0.6	12.9	0.7	541	578	-0.94
N4814-2-5	0.282 884	0.000 014	0.002 040	0.000 090	0.062 693	0.002 882	427.5	4.0	0.7	13.0	0.8	536	571	-0.94
N4814-2-3	0.282 913	0.000 011	0.002 424	0.000 065	0.087 726	0.002 421	427.8	5.0	0.6	13.9	0.7	500	522	-0.93
N4814-2-8	0.282 907	0.000 010	0.002 129	0.000 018	0.077 695	0.000 617	427.3	4.8	0.6	13.9	0.7	505	527	-0.94

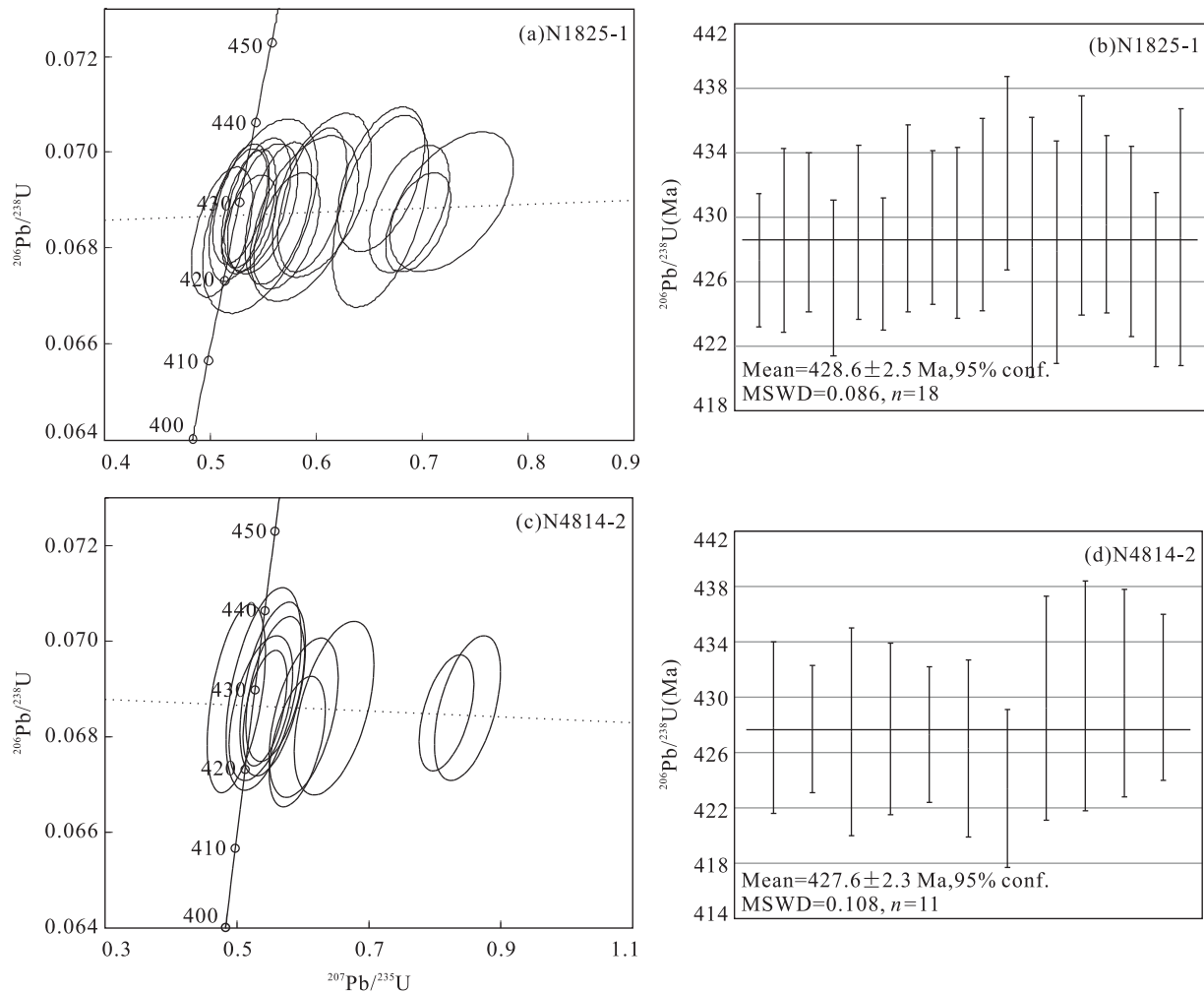


图 5 谢米斯台西段花岗岩锆石 U-Pb 谐和图
Fig. 5 U-Pb concordia diagram of granites in west part of Xiemisitai Mountain

哈勒盖特希碱长花岗岩中所测锆石¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值变化在 0.001 492~0.002 219 之间,平均值为 0.001 979;谢米斯台碱长花岗岩中所测锆石¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值变化在 0.001 891~0.002 424 之间,平均值为 0.002 069。两者¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值基本小于或略大于 0.002,表明锆石形成后具有很低的放射性成因 Hf 积累,所测¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值基本可代表锆石结晶时岩浆体系的 Hf 同位素组成。

哈勒盖特希碱长花岗岩锆石 Hf 同位素组成较均一,¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf=0.282 878~0.282 922,加权平均值为 0.282 903±0.000 019,ε_{Hf}(*t*)均为正值且变化范围较窄,ε_{Hf}(*t*)=12.7~14.5,平均值为 13.8,单阶段模式年龄 *t*_{DM1} 变化范围在 483~547 Ma 之间,二阶段模式年龄 *t*_{DM2} 变化范围在 497~587 Ma 之间,平均值为 530 Ma。谢米斯台碱长花岗岩锆石 Hf 同位素组成也较均一,¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf=0.282 868~0.282 917,加权平均值为 0.282 892±0.000 022,

ε_{Hf}(*t*)均为正值且变化范围较窄,ε_{Hf}(*t*)=12.4~14.2,平均值为 13.4,单阶段模式年龄 *t*_{DM1} 变化范围在 486~559 Ma 之间,二阶段模式年龄 *t*_{DM2} 变化范围在 504~603 Ma 之间,平均值为 551 Ma。它们正的 ε_{Hf}(*t*)值表明其源区为亏损地幔或由亏损地幔而来的年轻地壳(图 6)。

2.2.3 主量元素特征 谢米斯台岩体(H4814-2)和哈勒盖特希岩体(H2380-1, H2380-5, H2910-1)主量、微量元素分析结果见表 3。

从表 3 可以看出,谢米斯台碱长花岗岩的 MgO (0.49%)、P₂O₅ (13.99%)、CaO (0.09%)、TiO₂ (0.32%)、Al₂O₃ (13.99%)、全碱含量(8.96%)较哈勒盖特希碱长花岗岩的 MgO(0.15%~0.25%)、P₂O₅ (0.02%)、CaO (0.01%~0.65%)、TiO₂ (0.21%~0.22%)、Al₂O₃ (11.57%~12.41%)、全碱含量(8.27%~8.87%)高,谢米斯台碱长花岗岩的 SiO₂ (72.32%)含量、碱度率(AR=4.05)较哈勒

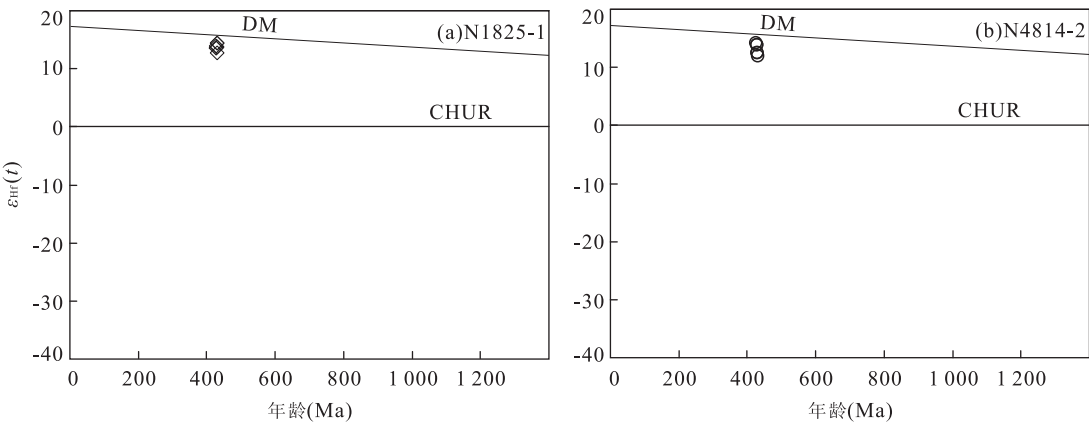


图 6 谢米斯台西段花岗岩 Hf 同位素特征

Fig. 6 Zircon Hf isotopic features for the granites in west part of Xiemisitai Mountain

表 3 谢米斯台西段碱长花岗岩主量元素(%)、微量(10⁻⁶)和稀土元素(10⁻⁶)分析结果

Table 3 Major and trace element contents of alkalic granites in west part of Xiemisitai Mountain

样品号	H4814-2	H2380-1	H2380-5	H2910-1	样品号	H4814-2	H2380-1	H2380-5	H2910-1
SiO ₂	72.32	75.64	74.92	75.02	Yb	2.35	8.04	7.28	7.14
TiO ₂	0.32	0.22	0.22	0.21	Lu	0.36	1.21	1.13	1.07
Al ₂ O ₃	13.99	12.04	12.41	11.57	Y	20.40	65.60	62.40	61.80
Fe ₂ O ₃	1.13	1.56	1.34	1.98	Cr	9.38	12.30	11.30	9.00
FeO	0.72	1.15	1.07	0.67	Co	3.06	1.32	0.87	1.87
MnO	0.08	0.08	0.02	0.05	Li	4.43	11.10	8.01	5.70
MgO	0.49	0.16	0.25	0.21	Rb	148.00	148.00	106.00	128.00
CaO	0.85	0.12	0.01	0.65	Nb	11.90	28.90	23.80	25.40
Na ₂ O	3.77	3.56	4.59	3.54	Cs	1.79	1.34	1.15	1.66
K ₂ O	5.19	4.71	4.28	4.83	Hf	5.93	12.80	11.20	12.50
P ₂ O ₅	0.09	0.02	0.02	0.02	Zr	178.00	561.00	455.00	467.00
H ₂ O ⁺	0.83	0.61	0.71	0.56	Ta	1.12	1.95	1.57	1.90
CO ₂	0.03	0.03	0.03	0.57	Pb	15.30	9.15	8.72	15.10
Lost	0.77	0.53	0.68	0.87	Th	15.60	14.70	11.30	12.10
Total	100.58	100.43	100.55	100.75	U	1.38	3.78	3.00	3.48
A/CNK	1.05	1.08	1.02	0.95	Sc	6.35	4.94	5.46	3.66
A/NK	1.18	1.10	1.02	1.05	Ba	778.00	71.90	73.50	104.00
Mg [#]	42.00	13.00	21.00	19.00	Ni	1.98	2.76	2.53	3.13
La	28.10	61.80	53.30	46.40	Sr	157.00	24.20	17.40	20.60
Ce	50.50	120.00	99.40	96.90	V	18.40	8.45	5.14	7.11
Pr	6.30	16.40	13.50	12.50	ΣREE	146.92	383.73	328.85	314.67
Nd	22.50	60.90	50.40	47.40	LREE	112.82	272.42	227.18	213.83
Sm	4.42	12.80	10.30	10.40	HREE	34.10	111.31	101.67	100.84
Eu	0.970	0.320	0.301	0.320	LREE/HREE	3.31	2.45	2.23	2.12
Gd	3.85	10.60	8.77	8.55	La/Sm	6.36	4.81	5.17	4.47
Tb	0.657	2.240	1.780	1.900	Sr/Y	7.68	0.37	0.28	0.33
Dy	3.26	11.90	10.20	10.50	Rb/Sr	0.95	6.10	6.11	6.23
Ho	0.734	2.700	2.270	2.320	(La/Yb) _N	8.58	5.51	5.25	4.66
Er	2.09	7.70	6.73	6.51	δEu	0.71	0.08	0.09	0.10
Tm	0.379	1.290	1.150	1.130	AR	4.05	5.25	6.00	5.35

注:δEu=[Eu_N/(Sm+Gd)_N]^{1/2},A/NK=Al₂O₃/(Na₂O+K₂O),A/CNK=Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O),这三者均为摩尔百分比。

盖特希碱长花岗岩的 SiO₂ (74.92%~75.64%) 含量、碱度率 (AR=5.25~6.00) 小, 在 SiO₂-AR 图 (图 7a)、A/NK-A/CNK 图解 (图 7b) 中, 显示 2 个

碱长花岗岩岩体为碱性系列准铝质—弱过铝质花岗岩。

2.2.4 微量元素特征 谢米斯台碱长花岗岩稀土

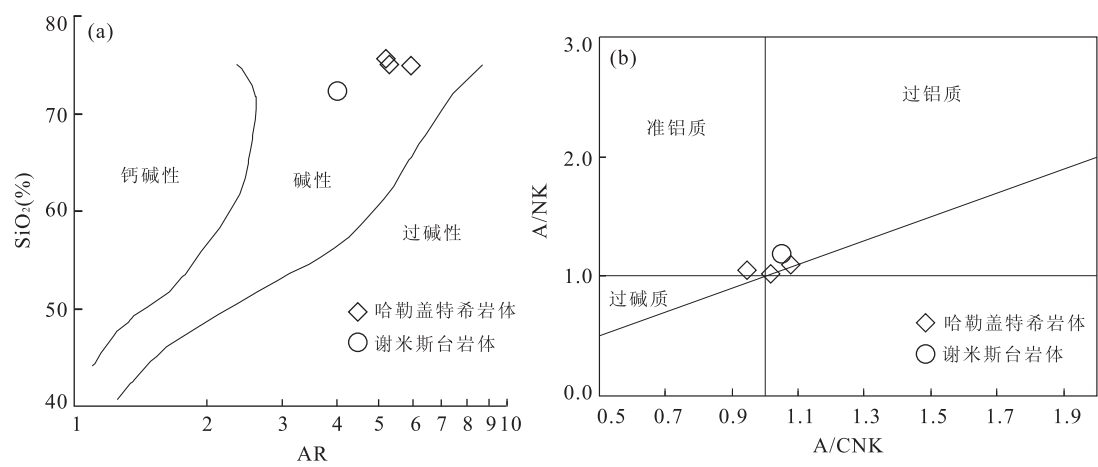


图7 谢米斯台西段花岗岩 SiO₂-AR 关系和(a)铝饱和指数图解(b)
Fig. 7 The relation of SiO₂-AR (a) and Al-saturation index diagram (b) of granites in west part of Xiemisitai Mountain
a 底图据肖庆辉等(2002)

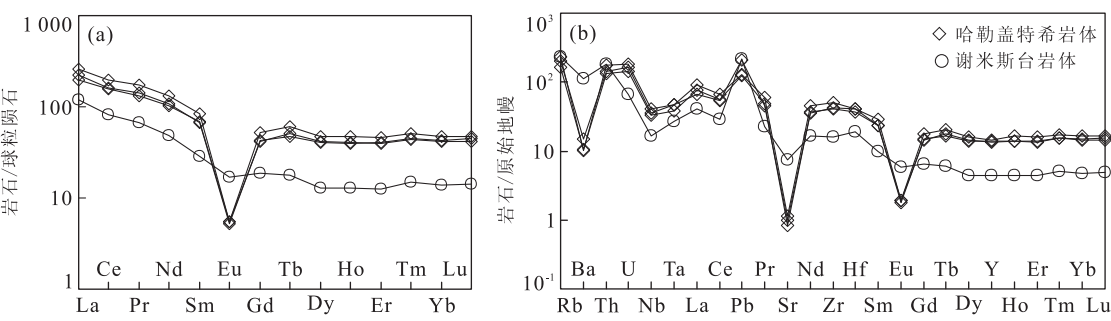


图8 谢米斯台西段花岗岩稀土元素配分型式图解(a)与微量元素配分型式图解(b)
Fig. 8 Chondrite-normalized REE diagram (a) and primitive mantle-normalized trace element diagram (b) of granites in west part of Xiemisitai Mountain
标准化的球粒陨石 REE 含量引自 Sun and McDonough(1989)

总量($\sum \text{REE} = 146.92 \times 10^{-6}$, $\text{LREE} = 112.82 \times 10^{-6}$, $\text{HREE} = 34.1 \times 10^{-6}$)较哈勒盖特希碱长花岗岩稀土总量($\sum \text{REE} = 314.67 \times 10^{-6} \sim 383.37 \times 10^{-6}$, $\text{LREE} = 213.83 \times 10^{-6} \sim 272.42 \times 10^{-6}$, $\text{HREE} = 100.84 \times 10^{-6} \sim 111.31 \times 10^{-6}$)低,而谢米斯台岩体 LREE/HREE 比值(3.31)、 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值(8.58)较轻哈勒盖特希岩体 LREE/HREE 比值(2.12~2.45)、 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值(4.66~5.51)高,表明谢米斯台碱长花岗岩轻重稀土分馏程度偏高。谢米斯台碱长花岗岩具有弱的 Eu 负异常($\delta \text{Eu} = 0.71$),哈勒盖特希碱长花岗岩具有较强的 Eu 负异常($\delta \text{Eu} = 0.08 \sim 0.10$)。在球粒陨石标准化稀土配分图中,哈勒盖特希碱长花岗岩整体呈不对称“右倾海鸥型”(图 8a),与福建沿海的铝质 A 型花岗岩一致(邱检生等,2000),而谢米斯台碱长花岗岩不具有“右倾海鸥型”特征, Eu 负异常表明该区碱长花岗岩成岩之前经历一定程度的分离结晶作用或是源区有

不同程度的斜长石残留。
微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 8b)中,2 个岩体碱长花岗岩均富集 Rb、Th、Pb 元素和亏损 Ba、Sr、Eu 等元素为特征,而谢米斯台碱长花岗岩 Ba、Sr、Eu 元素亏损程度较哈勒盖特希碱长花岗岩 Ba、Sr、Eu 元素亏损程度低。在 Whalen *et al.* (1987)以 $(\text{Zr} + \text{Ce} + \text{Y})$ 、 $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ 为标准的花岗岩分类图上,哈勒盖特希碱长花岗岩落入 A 型花岗岩区(图 9a、9b),而谢米斯台碱长花岗岩落入高分异 I 型花岗岩区。

3 讨论

3.1 成因类型

目前常用的花岗岩分类方案是从物源角度划分为 I、S、A 和 M 型花岗岩分类方案,已被大多数人所接受(Bonin, 2007; 吴福元等, 2007)。角闪石、堇青

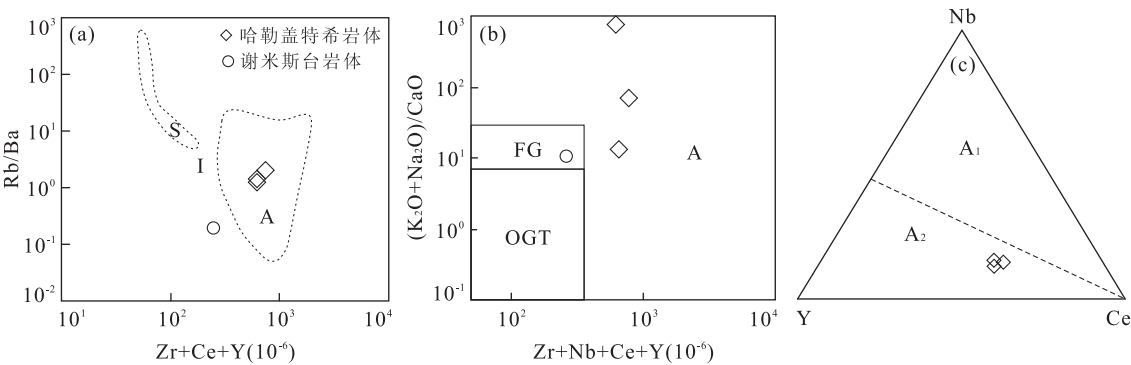


图 9 Rb/Ba-(Zr+Nb+Ce+Y)、(Na₂O+K₂O)/CaO-(Zr+Nb+Ce+Y)图解和 A₁-A₂ 型花岗岩图解

Fig. 9 Rb/Ba-(Zr+Nb+Ce+Y), (Na₂O+K₂O)/CaO-(Zr+Nb+Ce+Y) diagrams and distinguish diagrams of A₁-A₂ granites
图 a, b 据 Whalen *et al.* (1987); 图 c 据 Eby (1992). A-A₁ 型花岗岩; FG. M+I+S 型分异花岗岩; OGT. 未分异 M+I+S 型花岗岩; S. 分异的 S 型花岗岩; I. 分异的 I 型花岗岩; A₁. A₁ 型花岗岩; A₂. A₂ 型花岗岩

石和碱性暗色矿物是区别 I、S 和 A 型花岗岩的重要矿物学标志,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). Chappell and White (1992) 认为 I 型花岗岩源区为未经风化的火成岩,可能为下地壳和上地幔物质混合成因, S 型花岗岩源岩为沉积岩,一般来源于上地壳物质 (泥质岩为主). 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 0.69~1.10 之间, 具有高 CaO、Na₂O 等特征 (Chappell and White, 1992). 相对于典型的 I 型花岗岩, A 型花岗岩地球化学上具有高碱 (Na₂O+K₂O)、Fe/Mg、HFSE 和 低 CaO、Sr、Eu 等特征 (Loiselle and Wones, 1979; Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987; Bonin, 2007). Eby (1992) 把 A 型花岗岩分为 A₁ 和 A₂ 型 两类花岗岩, 其中 A₁ 型以其微量元素比值与洋岛 玄武岩相类似为特征, 岩浆来源于地幔并产生于大 陆裂谷或地幔热柱、热点环境; A₂ 型的微量元素 比值与平均地壳及岛弧玄武岩相类似, 其岩浆起源 于地壳或由岛弧岩浆派生, 产生于碰撞后或造山期 后的张性构造环境.

矿物组成上, 谢米斯台地区碱长花岗岩以不含 白云母等富铝矿物组合区别于 S 型花岗岩 (邱检生 等, 2000), 也不同于 M 型花岗岩 (奥长花岗岩、偏 铝质斜长花岗岩). 主量元素组成上, 明显不同于地 壳富铝风化沉积岩部分熔融形成的强过铝花岗岩, 而 与 A 型花岗岩 (富碱且相对富钾, 碱性系列) 相似. 微量元素及稀土元素组成上, 谢米斯台碱长花岗岩 Zr+Nb+Ce+Y 含量为 260.80×10⁻⁶, 在 (K₂O+Na₂O)/CaO-(Zr+Nb+Ce+Y) 和 Rb/Ba-(Zr+Ce+Y) 图中 (图 9a, 9b) 落入分异 I 型花岗岩区; 哈

勒盖特希碱长花岗岩 Zr+Nb+Ce+Y 含量为 640.60×10⁻⁶~775.50×10⁻⁶, 在 (K₂O+Na₂O)/CaO-(Zr+Nb+Ce+Y) 和 Rb/Ba-(Zr+Ce+Y) 图中 (图 9) 落入 A 型花岗岩区, 在 Nb-Y-Ce 图解 (图 9c) 中落入 A₂ 型花岗岩区. 综合分析, 谢米斯台地区碱长花岗岩共有 2 种类型: A 型花岗岩和分异 I 型花岗岩.

3.2 成岩构造环境

谢米斯台山发育安山岩一流纹岩火山岩组合及 霏细岩一花岗斑岩次火山岩组合, 火山岩主要形成 于早古生代, 东哈萨克斯坦波谢库尔一成吉斯火山 弧向东可能经西准噶尔北部的塔尔巴哈台山、谢米 斯台山, 一直延到沙尔布尔提山. 新厘定的西准噶尔 早古生代火山弧是洋壳向南俯冲形成的, 其上发育 的火山岩源于地幔楔形区, 有富集地幔 (EMI) 混合, 并有少量新元古代壳源物质混入, 晚古生代额尔齐 斯一斋桑洋向南俯冲, 形成了萨吾尔火山弧 (Shen *et al.*, 2012). 因此, 在西准噶尔北部和东哈萨克斯 坦, 古生代洋壳连续向南俯冲形成了 2 个平行的火 山弧 (早古生代波谢库尔一成吉斯和晚古生代扎尔 玛一萨吾尔火山弧) (Chen *et al.*, 2010; Shen *et al.*, 2012).

谢米斯台地区在奥陶纪一志留纪期间为活跃的 岛弧、弧前、弧后盆地的构造环境, 而在志留一泥盆 之间的造山作用虽然使得本区的早古生代地层发生 强烈褶皱、变质作用, 但其并未完全转化为稳定古陆 的一部分 (何国琦和李茂松, 2001). 同时该地区蛇绿 混杂岩中岩石组合记录着蛇绿岩形成时期以及之后 部分岩块通过俯冲带循环到地幔深处 (最大深度约 70 km) 并折返到地壳浅部的全过程 (朱永峰等,

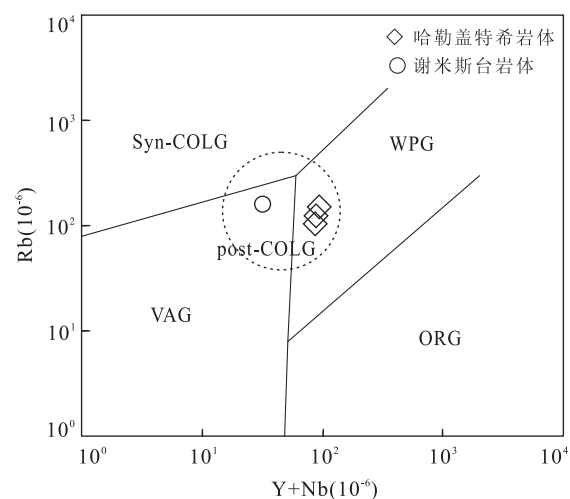


图 10 Rb-(Y+Nb)构造判别

Fig. 10 Rb-(Y+Nb) diagram

ORG. 大洋脊花岗岩;WPG. 板内花岗岩;VAG. 火山弧花岗岩;syn-COLG. 同碰撞花岗岩;post-COLG. 后碰撞花岗岩;底图据 Pearce *et al.* (1984)

2008). 谢米斯台地区 A 型花岗岩与 I 型花岗岩的年龄与该区火山岩年龄相似(Chen *et al.* , 2010; Shen *et al.* , 2012;王章棋等,2014),它们可能形成于相似构造环境. 哈勒盖特希碱长花岗岩为 A₂ 型花岗岩(图 9c),表明其形成于碰撞后或造山期后的张性构造环境,在 Rb-(Y+Nb)微量元素构造判别中(图 10),谢米斯台岩体落入火山弧花岗岩区域,哈勒盖特希岩体落入板内花岗岩区域,但是都可以归入后碰撞花岗岩区域. 这种特征反映出哈勒盖特希岩体和谢米斯台岩体可能形成于后碰撞阶段的挤压—伸展转变期.

3.3 源区性质及成岩过程

谢米斯台岩体与哈勒盖特希岩体均以正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(12.4~14.5)为特征(图 6),平均值为 13.6,对应的二阶段模式年龄为 497~603 Ma,略大于锆石形成年龄, t_{DM2} 可能代表了波谢库尔—成吉斯岛弧新元古代晚期至早古生代结晶基底从地幔分离的年龄,二阶段模式年龄更能反映源区物质在地壳中的平均存留年龄(吴福元等,2007),表明源区物质在地壳中存留时间较短(62~167 Ma). 正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值指示本区碱长花岗岩的源区具有亏损地幔的性质,但如果碱长花岗岩是幔源基性岩浆直接的分异产物,花岗岩的周围应有大量基性岩出露,而事实上,西准噶尔地区很少发现与碱长花岗岩时空关系密切的基性—超基性岩,当然也不排除基性岩浆底侵作用的可能性(苏玉平等,2006). 花岗岩的高

SiO₂(>69%)和低 MgO(<0.50%)组成排除了其直接由地幔演化而来的可能,结合野外观察到岩浆混入的标志—暗色微粒包体发育(图 3),表明源区有地幔物质加入. 因此,本区碱长花岗岩来源于年轻地壳,是亏损地幔来的物质在地壳滞留一段时间后的熔融产物,这一成岩模式得到了花岗岩年轻的同位素模式年龄(497~603 Ma)的支持. 西准噶尔盆地基底的时代问题一直以来都受到人们的重视,花岗岩高 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和年轻亏损地幔模式年龄反映:准噶尔盆地可能是以新元古代晚期至早古生代早期由亏损地幔演化而来的洋壳和岛弧建造组成的年轻地壳为主.

谢米斯台 I 型花岗岩和 A₂ 型花岗岩的 Lu-Hf 同位素特征相似,均显示出这 2 类花岗岩具有幔源特征,它们应为同源岩浆不同演化阶段的产物. A₂ 型花岗岩具明显负铕异常,稀土元素 LREE/HREE 比值、(La/Yb)_N 相对较小,稀土总量较大,而 I 型花岗岩负铕异常不明显,稀土元素 LREE/HREE 比值、(La/Yb)_N 较大,轻、重稀土分馏程度高于 A₂ 型花岗岩,同时稀土总量较小,这些差异反映了区内 I 型花岗岩和 A₂ 型花岗岩的成因不同. 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,哈勒盖特希岩体 Mg[#] 值(13~21)低于谢米斯台碱长花岗岩样品 Mg[#] 值(42),表明这 2 个岩体的源岩可能为基性洋壳,岩浆形成受到地幔楔的混染可能性较小,且 2 个岩体的形成过程存在明显差异;哈勒盖特希岩体的 Ba、Sr、Eu 等元素的含量明显低于谢米斯台岩体,显示了斜长石的分离结晶趋势.

笔者认为,中志留世额尔齐斯—斋桑洋向南俯冲至波谢库尔—成吉斯火山弧一带,俯冲板片与岛弧底部岩石圈之间剪切带的物质发生变形、变质及部分熔融作用,使由亏损地幔形成不久的年轻地壳(由洋壳和岛弧组成)发生部分熔融形成的长英质岩浆经进一步分离结晶作用形成分异 I 型花岗岩和高温、缺水 A₂ 型花岗岩(苏玉平等,2006),A₂ 型花岗岩较 I 型花岗岩分离结晶程度高.

4 结论

(1)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果显示,谢米斯台岩体岩浆结晶年龄为 427.6±2.3 Ma,哈勒盖特希岩体岩浆结晶年龄为 428.6±2.5 Ma,二者

成岩时代均为中志留世。

(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洋壳和岛弧建造组成的年轻地壳。

(3)新疆西准噶尔谢米斯台山西段碱长花岗岩岩石类型有 2 种:碱性弱过铝质 A_2 型花岗岩和碱性弱过铝质分异 I 型花岗岩,它们可能形成于后碰撞阶段的挤压—伸展转变期,是中志留世额尔齐斯—斋桑洋壳向南俯冲至波谢库尔—成吉斯火山弧底部,俯冲板片与岛弧底部岩石圈之间剪切带的物质发生变形、变质及部分熔融作用,使得由亏损地幔形成不久的年轻地壳(由洋壳和岛弧组成)发生部分熔融形成的花岗闪长质岩浆经进一步分离结晶作用形成分异 I 型花岗岩和高温、缺水 A_2 型花岗岩, A_2 型花岗岩较 I 型花岗岩分离结晶程度高。

致谢:易逸、赵龙、杨阳、郝军建、姜芸、廖婉琳等对成文提供了许多帮助,审稿老师对文章的修订提出了宝贵的建设性意见,在此一并致以衷心感谢!

References

- Bonin, B., 2007. A-Type Granites and Related Rocks: Evolution of a Concept, Problems and Prospects. *Lithos*, 97 (1—2): 1—29. doi: 10. 1016/j. lithos. 2006. 12. 007
- 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 Western 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, J. F., Han, B. F., Ji, J. Q., et al., 2010. Zircon U-Pb Ages and Tectonic Implications of Paleozoic Plutons in Northern Western Junggar, North Xinjiang, China. *Lithos*, 115 (1—4): 137—152. doi: 10. 1016/j. lithos. 2009. 11. 014
- 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. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 80: 189—200. doi: 10. 1007/BF00374895
- Eby, G. N., 1992. Chemical Subdivision of the A-Type Granitoids: Petrogenetic and Tectonic Implications. *Geology*, 20(7): 641—644. doi: 10. 1130/0091—7613(1992)020<0641:CSOTAT>2. 3. CO;2
- Feng, Y., Coleman, R. G., Tilton, G., et al., 1989. Tectonic Evolution of the Western Junggar Region, Xinjiang, China. *Tectonics*, 8(4): 729—752. doi: 10. 1029/TC008i004p00729
- 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 Western Junggar, Xinjiang: Implications for Ridge Subduction? *Chemical Geology*, 266(3—4): 364—389. doi: 10. 1016/j. chemgeo. 2009. 07. 001
- Han, B. F., He, G. Q., Wang, S. G., 1999. Post Collision Mantle Genesis Magma Activity Bottom, Uplifting and Character of Junggar Basin Basement. *Science in China (Series D)*, 29(1): 16—21 (in Chinese).
- 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).
- He, G. Q., Li, M. S., 2001. Significance of Paleostucture and Paleogeography of Ordovician-Silurian Rock Associations in Northern Xinjiang, China. *Acta Scientiarum Naturalium, Universitatis Pekinensis*, 37(1): 99—110 (in Chinese with English abstract).
- Hoskin, P. W. O., Black, L. P., 2000. Metamorphic Zircon Formation by Solid-State Recrystallization of Protolith Igneous Zircons. *Journal of Metamorphic Geology*, 18 (4): 423—439. doi: 10. 1046/j. 1525—1314. 2000. 00266. x
- Hu, A., Jahn, B., Zhang, G., 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
- Hu, Z. C., Gao, S., Liu, Y. S., et al., 2008. Signal Enhancement in Laser Ablation ICP-MS by Addition of Nitrogen in the Central Channel Gas. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23 (8): 1093—1101. doi: 10. 1039/B804760J
- Hu, Z. C., Liu, Y. S., Gao, S., et al., 2012. Improved In Situ Hf Isotope Ratio Analysis of Zircon Using Newly Designed X Skimmer Cone and Jet Sample Cone in Combination with the Addition of Nitrogen by Laser Ablation Multiple Collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27(9): 1391—1399. doi: 10. 1039/C2JA30078H
- Huang, J. H., Lü, X. C., Zhu, X. N., et al., 1995. Advance in Research of the Ophiolites in Hongguleleng of North Junggar, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 13(1): 20—30 (in

- Chinese with English abstract).
- 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
- 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
- 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 of 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
- Loiselle, M. C., Wones, D. R., 1979. Characteristic and Origin of Anorogenic Granites. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 11(7): 468.
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00; A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley.
- Meng, L., Shen, P., Shen, Y. C., et al., 2010. Igneous Rocks Geochemistry, Zircon U-Pb Age and Its Geological Significance in the Central Section of Xiemisitai Area, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 3047—3056 (in Chinese with English abstract).
- Miller, C. F., 1985. Are Strongly Peraluminous Magmas Derived from Pelitic Sedimentary Sources? *The Journal of Geology*, 93(6): 673—689.
- Qiu, J. S., Wang, D. Z., Satoshi, K., et al., 2000. Geochemistry and Petrogenesis of Aluminous A-Type Granites in the Coastal Area of Fujian Province. *Geochimica*, 29(4): 313—321 (in Chinese with English abstract).
- Rapp, R. P., 1997. Heterogeneous Source Regions for Archean Granitoids: Experimental and Geochemical Evidence. *Oxford Monographs on Geology and Geophysics*, 35: 267—279.
- 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): 956—983.
- Shen, P., Shen, Y. C., Liu, T. B., et al., 2010. Discovery of the Xiemisitai Copper Deposit in Western Junggar, Xinjiang and Its Geological Significance. *Xinjiang Geology*, 28(4): 413—418 (in Chinese with English abstract).
- 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. F., Hou, G. S., et al., 2006. Geochemistry of Aluminous A-Type Granites along Darabut Tectonic Belt in Western Junggar, Xinjiang. *Geochimica*, 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: 313—345. doi:10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
- Wang, Z. Q., Jiang, X. M., Guo, J., et al., 2014. Discovery of the Early Paleozoic Volcanic Rocks in the Xiemisitai Area of the Western Junggar, Xinjiang. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(3): 670—685 (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
- Wu, F. Y., Li, X. H., Zheng, Y. F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185—220 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, Q. H., Deng, J. F., Ma, D. Q., et al., 2002. The Ways of Investigation on Granitoids. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Xiao, W. J., Zhang, L. C., Qin, K. Z., et al., 2004. Paleozoic Accretionary and Collisional Tectonics of the Eastern Tianshan (China): Implications for the Continental Growth of Central Asia. *American Journal of Science*, 304(4): 370—395. doi:10.2475/ajs.304.4.370
- Yin, J., 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
- Zhang, Y. Y., Guo, Z. J., 2010. New Constraints on Forma-

- tion Ages of Ophiolites in Northern Junggar and Comparative Study on Their Connection. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 421—430 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., Liou, J. G., Coleman, R. G., 1984. An Outline of the Plate Tectonics of China. *Geological Society of America Bulletin*, 95(3): 295—312. doi: 10. 1130/0016-7606(1984)95<295:AOOTPT>2. 0. CO;2
- Zhao, L., He, G. Q., Zhu, Y. B., 2013. Discovery and Its Tectonic Significance of the Ophiolite in the South of Xiemisitai Mountain, Western Junggar, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 32(1): 195—205 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, T., Yuan, F., Fan, Y., et al., 2008. Granites in the Sawuer Region of the Western Junggar, Xinjiang, China: Geochronological and Geochemical Characteristics and Their Geodynamic Significance. *Lithos*, 106(3—4): 191—206. doi:10. 1016/j. lithos. 2008. 06. 014
- Zhu, Y. F., Xu, X., Chen, B., et al., 2008. Dolomite Marble and Garnet Amphibolite in the Ophiolitic Mélange in Western Junggar; Relics of the Early Paleozoic Oceanic Crust and Its Deep Subduction. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2767—2777 (in Chinese with English abstract).
- 黄建华, 吕喜朝, 朱星南, 等, 1995. 北准噶尔洪古勒楞蛇绿岩研究的新进展. *新疆地质*, 13(1): 20—30.
- 孟磊, 申萍, 沈远超, 等, 2010. 新疆谢米斯台中段火山岩岩石地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *岩石学报*, 26(10): 3047—3056.
- 邱检生, 王德滋, 蟹泽聪史, 等, 2000. 福建沿海铝质 A 型花岗岩的地球化学及岩石成因. *地球化学*, 29(4): 313—321.
- 申萍, 沈远超, 刘铁兵, 等, 2010. 西准噶尔谢米斯台铜矿的发现及意义. *新疆地质*, 28(4): 413—418.
- 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.
- 王章棋, 江秀敏, 郭晶, 等, 2014. 新疆西准噶尔谢米斯台地区发现早古生代火山岩地层: 野外地质学和年代学证据. *大地构造与成矿学*, 38(3): 670—685.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等, 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. *岩石学报*, 23(2): 185—220.
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等, 2002. 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1979. 1: 20 万乌鲁木齐幅区域地质图.
- 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. 北京: 地质出版社, 1—762.
- 张元元, 郭召杰, 2010. 准噶尔北部蛇绿岩形成时限新证据及其东、西准噶尔蛇绿岩的对比研究. *岩石学报*, 26(2): 421—430.
- 赵磊, 何国琦, 朱亚兵, 2013. 新疆西准噶尔北部谢米斯台南山坡蛇绿岩带的发现及其意义. *地质通报*, 32(1): 195—205.
- 朱永峰, 徐新, 陈博, 等, 2008. 西准噶尔蛇绿混杂岩中的白云石大理岩和石榴角闪岩: 早古生代残余洋壳深俯冲的证据. *岩石学报*, 24(12): 2767—2777.

附中文参考文献

- 韩宝福, 何国琦, 王式洸, 1999. 后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准噶尔盆地基底的性质. *中国科学(D辑)*, 29(1): 16—21.
- 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.
- 何国琦, 李茂松, 2001. 中国新疆北部奥陶—志留系岩石组合的古构造、古地理意义. *北京大学学报(自然科学版)*, 37(1): 99—110.