

新疆富蕴县北部金格岩体斜长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义

蔺新望^{1,2}, 王 星^{1,2}, 赵江林^{1,2}, 赵端昌^{1,2}, 周少伟^{1,2}, 袁 璋^{1,2}
LIN Xinwang^{1,2}, WANG Xing^{1,2}, ZHAO Jianglin^{1,2}, ZHAO Duanchang^{1,2},
ZHOU Shaowei^{1,2}, YUAN Zhang^{1,2}

1. 陕西省矿产地质调查中心, 陕西 西安 710068;

2. 陕西省地质调查院, 陕西 西安 710054

1. Shaanxi Mineral Resources and Geological Survey, Xi'an 710068, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710054, China

摘要:对新疆富蕴县北部金格岩体斜长花岗岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定, 获得了 402.7 ± 2.9 Ma (MSWD=0.17) 的岩体结晶年龄, 表明岩体形成时代为早泥盆世。金格岩体岩性组合为英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩, 具有 TTG 组合特征, 暗示与洋俯冲作用有关。岩石地球化学具有高硅 ($\text{SiO}_2=72.55\% \sim 77.41\%$), 富钠 ($\text{Na}_2\text{O}=4.94\% \sim 6.63\%$), 贫钾 ($\text{K}_2\text{O}=0.24\% \sim 0.95\%$) 的特征, Al_2O_3 含量为 12.11%~15.30%, 铝饱和指数在 0.94~1.04 之间, 呈低钾拉斑玄武岩系列、准铝质-弱过铝质、I 型花岗岩的特征。稀土元素显示轻稀土元素富集、重稀土元素相对亏损, 中等-弱负 Eu 异常的右倾型, 微量元素 Rb、Th、U 等大离子亲石元素富集, 呈明显的“峰”, Nb、Ta、Ti 等高场强元素强烈亏损, 呈明显“TNT”负异常, 显示了与俯冲作用有关的岩浆岩特征。结合区域地质资料, 金格岩体形成于与洋俯冲作用有关的活动大陆边缘的陆弧环境, 金格-正格河地区在早泥盆世处于局部拉张环境。

关键词:早泥盆世; 斜长花岗岩; TTG 组合; 洋俯冲; 富蕴县北部, 新疆

中图分类号: P597+.3; P588.12+1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2019)11-1813-12

Lin X W, Wang X, Zhao J L, Zhao D C, Zhou S W, Yuan Z. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of the Jin ge plagiogranite in northern Fuyun of Xinjiang and its geological implications. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(11):1813-1824

Abstract: LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Jin'ge plagiogranite in northern Fuyun of Xinjiang shows that it was formed at 402.7 ± 2.9 Ma (MSWD=0.17). This age reveals that the rocks of the Jin ge Plagiogranite were formed in the Early Devonian. The igneous petrotectonic assemblage of the Jin'ge rocks was probably related to oceanic subduction and belonged to TTG series of tonalite-trondhjemite-granodiorite. The granites show high-SiO₂, rich Na₂O and poor K₂O characteristics, with SiO₂ content ranging from 72.55% to 77.41%, Na₂O from 4.94% to 6.63%, K₂O from 0.24% to 0.95%. Al₂O₃ from 12.11% to 15.30% and A/CNK from 0.94 to 1.04, suggesting a suite of low-K calc-alkaline series rocks, being quasi-sialuminous-wearily per-aluminous I-type granites. The Jin'ge plagiogranite is characterized by enrichment of LREE, depletion of HREE, and strong light and heavy REE fractionation, with weak to moderate Eu negative anomalies. The trace element geochemical characteristics of the pluton show enrichment of Rb, Th, U (LILE) and La, Ce, Sm and depletion of Nb, Zr(HFSE) and Sr, P, Ti, exhibiting features of magmatic rocks related to subduction. In combination with previous studies, the authors hold that the Jin'ge pluton was formed in a continental arc under an active continental margin setting, which was related to the oceanic crust subduction, and this area was locally extensional in

收稿日期: 2018-06-21; 修订日期: 2018-08-20

资助项目: 新疆地勘基金中心项目《新疆富蕴县阿拉一带 1:5 万 L45E003023、L45E003024、L45E004023、L45E004024、L46E004001 五幅区域地质调查》(编号: A16-1-LQ01)

作者简介: 蔺新望(1972-), 男, 硕士, 工程师, 从事区域地质调查工作。E-mail: star_cug@126.com

the Early Devonian period.

Key words: Early Devonian; plagiogranite; TTG series; oceanic crust subduction; northern Fuyun, Xinjiang

阿尔泰造山带位于中亚造山带中部,是由一系列大陆块体、岛弧和增生杂岩构成的增生型造山带,是中亚造山带的重要组成部分^[1-2]。造山带在大洋扩张、洋壳俯冲、大洋闭合、大陆碰撞/俯冲、山脉形成和垮塌等构造演化阶段,伴随有不同程度的岩浆作用^[3-6],尤其是与古亚洲洋洋壳俯冲作用有关的岩浆活动最剧烈。阿尔泰造山带广泛分布的花岗岩类,具有多时代、多类型、多成因、多来源等特征,是研究阿尔泰造山带构造演化历史的重要载体^[7-12]。前人通过对这些花岗岩类的深入研究,揭示了古亚洲洋发展、演化历史,以及与岩浆活动有关的矿产资源成矿作用^[13-28]。近年来,随着锆石 SHRIMP U-Pb 和 LA-ICP-MS U-Pb 测年方法的广泛应用,在阿尔泰造山带获得了大量的高精度测年结果,统计结果显示古生代岩浆侵入活动存在4个峰值,即460Ma、410Ma、380Ma及约265Ma^[8,14],其中以早泥盆世岩浆活动最剧烈,多形成于400~410Ma。这些成果大大促进了古亚洲洋俯冲-增生过程中,阿尔泰造山带构造环境、构造演化、造山作用和陆壳增生的研究程度。

火成岩构造组合可以表征大地构造环境与块体或大陆块体边界的性质^[29-33]。如花岗闪长岩与英云闪长岩和奥长花岗岩共生,常组成TTG组合,一般认为,TTG岩类形成于洋壳俯冲作用的构造环境,在大陆边缘岩浆弧靠近海沟一侧的外带发育^[33-34]。新疆富蕴县北部金格岩体的组成岩性为斜长花岗岩-英云闪长岩-花岗闪长岩,具有TTG侵入

岩组合特征,本次获得斜长花岗岩 $402.7 \pm 2.9\text{Ma}$ (MSWD=0.17)的岩浆结晶年龄,表明岩体形成时代为早泥盆世,据此确定了阿尔泰造山带泥盆纪TTG火成岩组合的存在,为更好地研究古亚洲洋构造岩浆序列、动力学背景及造山带演化提供了资料。

1 区域地质概况

阿尔泰造山带位于新疆北部,沿北西—南东向横贯中-蒙-俄-哈四国,北邻西萨彦岭岛弧带,南侧以额尔齐斯断裂与准噶尔地块相接,全长约2000km,是中亚造山带的重要组成部分(图1-a)。中国阿尔泰位于其西南缘,在中国境内的部分约500km,大地构造位置属西伯利亚板块南部大陆边缘增生区,为古亚洲洋域的北带^[7,35]。以红山嘴-诺尔特断裂和阿巴宫-库尔提断裂为界,可将阿尔泰造山带由北向南依次划分为北阿尔泰、中阿尔泰和南阿尔泰3个地块(图1-b)^[2,36]。北阿尔泰块体主要由震旦系-寒武系、上泥盆统一石炭统火山-沉积岩组成;中阿尔泰块体主要由震旦系一下古生界深变质岩系和奥陶纪-侏罗纪侵入岩组成,花岗岩在该区最发育;南阿尔泰块体主要由元古宇片麻岩和泥盆纪火山-沉积岩系组成。金格岩体位于红山嘴断裂的南侧,属中阿尔泰地块的组成部分。

2 岩体及岩石学特征

金格岩体分布于富蕴北部红山嘴断裂以南,喀依尔特河金格西侧的金格一带(图2)。岩体长轴走

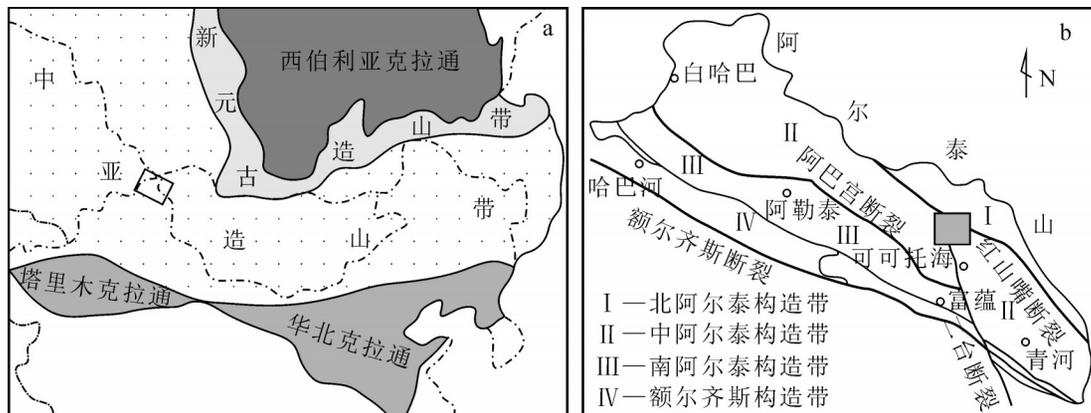


图1 阿尔泰造山带构造位置图^[35] (a)和构造分区图^[7] (b)

Fig. 1 Tectonic position (a) and division (b) of Altay orogenic belt

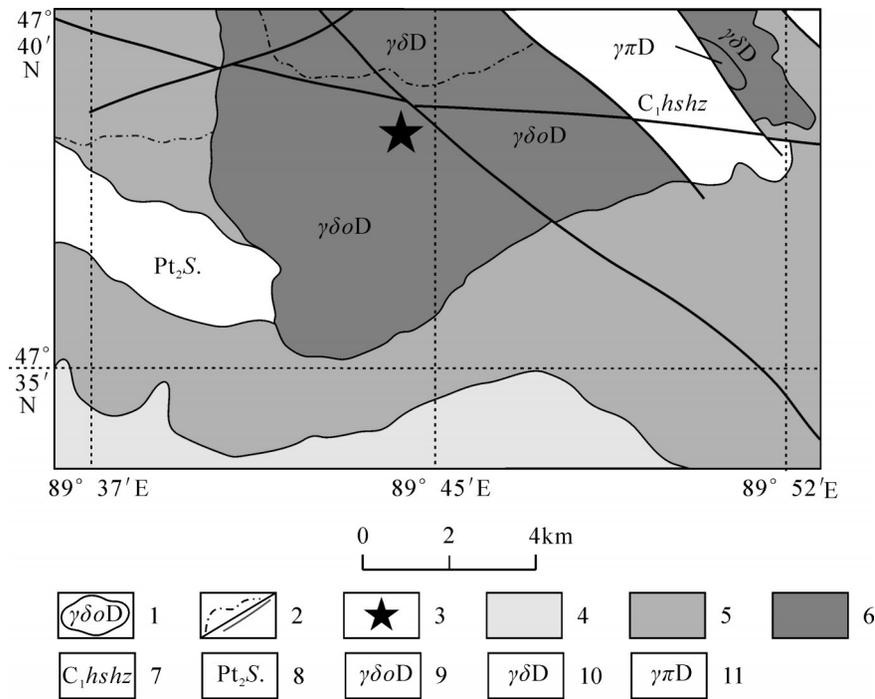


图2 金格岩体地质简图 (据参考文献1 修改)

Fig. 2 Simplified geological map of the Jin'ge plagiogranite

1—岩体界线及代号;2—脉动/断层界线;3—采样位置;4—三叠纪岩体;5—石炭纪岩体;6—泥盆纪岩体;7—红山嘴组;
8—苏普特岩群;9—泥盆纪斜长花岗岩/英云闪长岩;10—泥盆纪花岗闪长岩;11—泥盆纪石英闪长斑岩

向为北西向,岩体西部被石炭纪二云母花岗岩侵入,南部被三叠纪二云母正长花岗岩侵入,西部与石炭纪红山嘴组呈断层接触,发育不同程度的片麻理构造,顺片麻理方向发育暗色闪长质包体,包体分布无规律,大小一般为 3cm~5cm×5cm~25cm,多呈长条状或透镜状或不规则状(图 3-a、b),岩石蚀变具较强的绿泥石化、黝帘石化。其岩性较复杂,根据岩性组合特征及各岩性间的接触关系,将其主体划分为英云闪长岩、花岗闪长岩侵入体。呈脉动或涌动接触关系,第四系覆盖较强。岩体中发育后期长英质脉体,脉体界线多平直延伸,与岩体之间界线截然,宽度多在 3~30cm 之间。

斜长花岗岩:浅灰色,中细粒花岗结构,块状构造、似片麻状构造。岩石主要矿物有斜长石(70%~75%)、石英(20%~25%)、角闪石(1%~3%)、黑云母(2%~4%)(图 3-c)。斜长石近半自形板状,定向分布。可见聚片双晶。局部被绢云母、绿帘石、黝帘石交代。石英他形粒状,填隙状、定向分布。角闪石近半自形柱状,星散状、定向分布。集合体似条痕状定向分布,局部被绿泥石化交代。黑云母片状、

星散状定向分布,被绿泥石、绿帘石、铁质交代。岩石次生变化弱,主要为斜长石绢云母、绿帘石、黝帘石化,黑云母绿帘石、绿泥石化,角闪石绿泥石化。副矿物可见磁铁矿、磷灰石、榍石等零星分布。

英云闪长岩:浅灰色,中细粒花岗结构,块状构造、似片麻状构造。岩石主要由斜斜长石(65%~70%)、石英(20%~30%)、黑云母(3%~5%)等矿物组成(图 3-d)。斜长石近半自形板状,具聚片双晶、卡钠复合双晶,定向分布,局部被绢云母、绿帘石交代。钾长石近半自形—他形粒状,轻土化,表面略脏,局部活化,交代斜长石使其有蠕英、补块等结构。石英他形粒状,定向分布,波状消光明显。黑云母呈片状,定向分布,一组解理发育,表面新鲜干净,局部被绿帘石交代。岩石蚀变弱,蚀变矿物为绢云母、高岭土、绿帘石,岩石矿化弱。副矿物可见磁铁矿、锆石、磷灰石、榍石、褐帘石等零星分布。

花岗闪长岩:浅灰白色,中细粒花岗结构,块状构造。主要矿物有斜长石(50%~60%)、钾长石(10%~20%)、石英(20%~25%)、黑云母(3%~5%)。斜长石近半自形板状,具聚片双晶、卡钠复合双晶,定向分

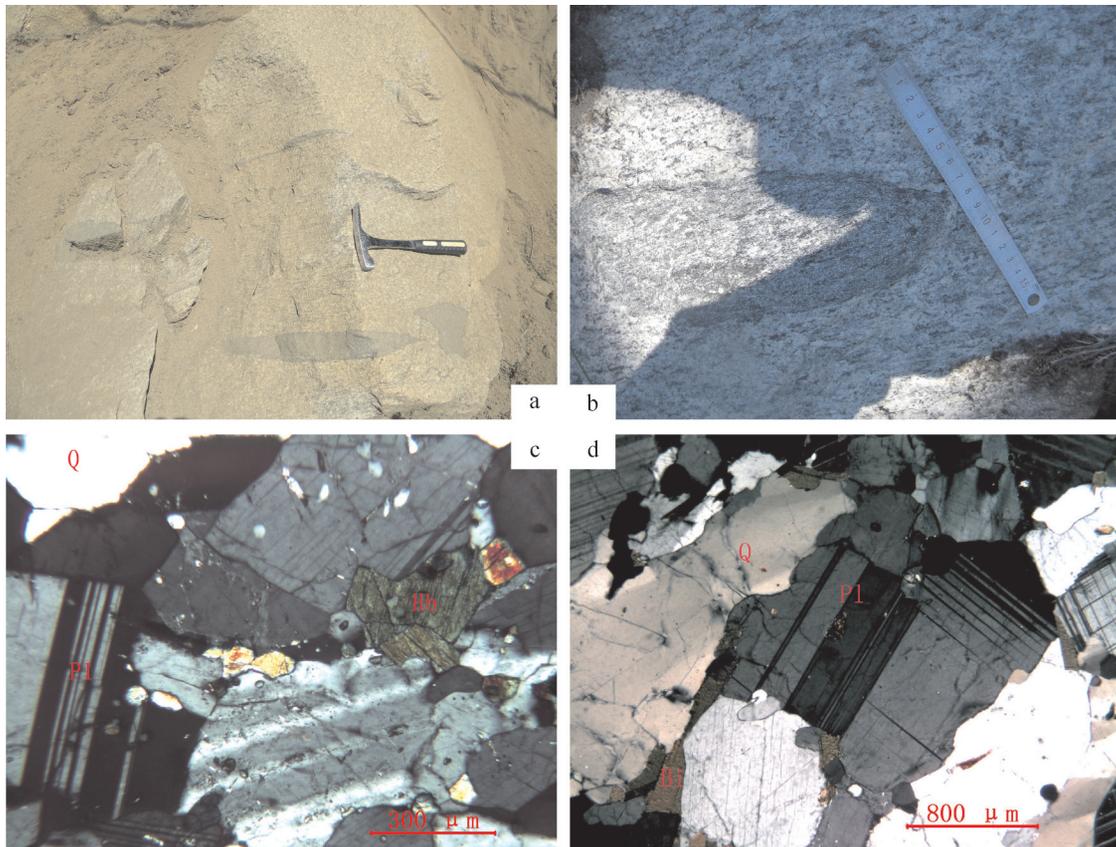


图3 金格斜长花岗岩野外照片(a,b)和显微岩相照片(c,d)

Fig. 3 Outcrop photographs (a, b) and microscopic photographs (c, d) of the Jin'ge plagiogranite

Pl—斜长石; Q—石英; Hb—角闪石; Bi—黑云母

布,被绢云母及绿帘石交代,表面脏。钾长石呈近半自形—他形粒状,定向分布,可见格子双晶,局部见钠质条纹,为微斜条纹长石,局部活化明显,交代斜长石,使其具补块等交代结构,轻土化,表面略脏。石英呈他形粒状,定向分布,集合体透镜状定向分布,波状消光明显,表面新鲜干净。黑云母呈片状,定向分布,一组解理发育,表面新鲜干净,集合体不规则状堆状分布,局部被绿泥石及绿帘石交代,少为假象。岩石轻碎裂,沿裂隙有石英、绿帘石充填交代。岩石蚀变明显,蚀变矿物为绢云母、高岭土、绿泥石、绿帘石,岩石矿化弱。

3 样品采集和分析方法

本次在金格岩体中心相斜长花岗岩中采集了锆石U—Pb同位素测年样品1件,编号为D1703/1,样品采集地理坐标为北纬47°38'27"、东经89°44'40"(图2)。

3.1 分析方法

采集样品约15kg,在核工业二〇三研究所采用常规方法进行粉碎,并用浮选和电磁选方法进行分选,然后在西北大学大陆动力学国家重点实验室双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒,将其粘贴在环氧树脂表面,待环氧树脂充分固化后,对其进行抛光至锆石内部暴露。在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行反射光、透射光和阴极发光(CL)显微照相,锆石的CL图像制备在装有英国Gatan公司生产的Mono CL3+阴极发光装置系统的电子显微扫描电镜上完成。通过对反射光、透射光和阴极发光图像分析,选择吸收程度均匀和形态明显不同的区域进行分析。锆石微量元素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室的LA-ICP-MS仪器上按标准测定程序进行。分析仪器为美国Agilent公司生产的Agilent7500a型四极杆质谱仪和德国Microlas公司生产的Geolas200M型激光剥蚀系

统,激光器为 193nm 深紫外 ArF 准分子激光器,激光波长为 193nm,束斑直径为 30 μm ,频率为 8Hz,能量为 70mJ,采样方式为单点剥蚀,每个分析点的气体背景采集时间为 30s,信号采集时间为 40s;用美国国家标准人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM 610 进行仪器最佳化调试,数据采集选用质量峰采点的跳峰方式,每完成 6 个待测样品测定,插入测标样次。锆石年龄计算采用标准锆石 91500 为外标,元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NISTSRM610 为外标, ^{29}Si 为内标元素进行校正。数据采集处理采用 Glitter (Version 4.0, Mcquaire University) 软件,并采用 Anderson 软件对测试数据进行普通铅校正^[37],年龄计算及谐和图绘制采用 Isoplot(3.0 版)软件完成^[38]。详细的实验原理和流程及仪器参见 Yuan 等^[39]。

3.2 锆石特征

测年样品(D1703/1)锆石颜色为浅、深玫瑰色,毛玻璃光泽至金刚光泽,半透明-透明,大部分含固体及气液包体。锆石晶形多不完整,主要类型为由柱面{110}不发育的柱面{100},锥面{111}及不发育的锥面{311}{131}组成聚形,呈次棱角柱状。粒径多为 50~100 μm ,少数在 110~200 μm 之间,长宽比多为 2:1~3:1,少量晶体为 4:1~6:1。阴极发光图像

(图 4)显示,锆石内部结构清楚,生长振荡环带结构、核幔结构较发育,且所测锆石的 Th 含量介于 $26\times 10^{-6}\sim 408\times 10^{-6}$ 之间,U 含量介于 $90\times 10^{-6}\sim 882\times 10^{-6}$ 之间,Th/U 值多大于 0.4,表现出典型岩浆锆石的特征^[40-41]。

3.3 锆石 U-Pb 年龄

对斜长花岗岩(D1703/1)样品进行了 25 个分析点的测试,测试结果见表 1。25 个测点中,08 号测点在谐和图中明显偏离谐和线,对照锆石阴极发光图像,发现 08 号存在明显的白色条带,暗示锆石不同部位 U、Th 含量差异大;19、20、21 和 22 号测点的年龄值明显偏高,19 号存在明显的白色条带,暗示锆石不同部位 U、Th 含量差异大,20 号锆石发光性特征明显不同,21、22 号测点处发育裂纹,可能引起年龄值存在偏差,故将上述 5 颗锆石的年龄剔除,不参加年龄加权平均值计算。其余 20 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄较和谐,数据点集中于谐和线附近,其交点年龄值为 $402.9\pm 3.1\text{Ma}$ (MSWD=0.31)(图 5-a), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $402.7\pm 2.9\text{Ma}$ (MSWD=0.31)(图 5-b)。所测年龄值代表了岩浆结晶年龄,时代为早泥盆世。

综上所述,金格岩体的岩浆结晶年龄为 $402.7\pm 2.9\text{Ma}$,时代归属为早泥盆世,属晚古生代早期岩浆

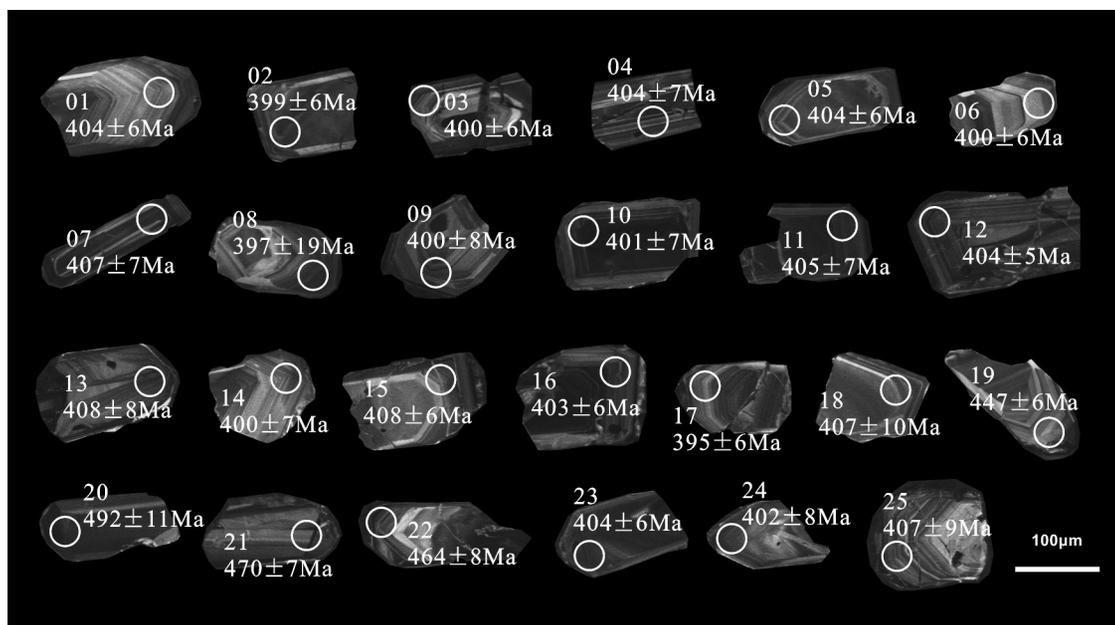


图 4 金格斜长花岗岩锆石阴极发光(CL)图像及年龄值

Fig. 4 CL images for zircons and U-Pb ages of the Jin'ge plagiogranite

表1 金格岩体斜长花岗岩(D1703/1RZ) LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果

Table 1 Isotopic analyses of LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb ages of the Jin'ge plagiogranite(D1703/1RZ)

点号	含量/10 ⁻⁶				同位素比值								年龄/Ma							
	Pb*	Th	U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ
1	20.74	98	254	0.39	0.05625	0.00118	0.5013	0.0124	0.06463	0.00096	0.02058	0.00115	461	46	413	8	404	6	412	23
2	20.88	126	256	0.49	0.05823	0.00098	0.5134	0.0114	0.06384	0.00094	0.02029	0.00100	539	37	421	8	399	6	406	20
3	15.46	90	193	0.47	0.05441	0.00107	0.4796	0.0110	0.06406	0.00106	0.02017	0.00099	387	44	398	8	400	6	404	20
4	8.27	48	100	0.48	0.05824	0.00171	0.5176	0.0152	0.06473	0.00119	0.02033	0.00103	539	69	424	10	404	7	407	20
5	14.83	84	185	0.46	0.05438	0.00107	0.4780	0.0092	0.06401	0.00095	0.02008	0.00089	387	44	397	6	400	6	402	18
6	9.84	47	125	0.38	0.05500	0.00133	0.4892	0.0130	0.06463	0.00107	0.02073	0.00109	413	49	404	9	404	6	415	22
7	14.83	85	181	0.47	0.05481	0.00120	0.4906	0.0116	0.06523	0.00119	0.02181	0.00107	406	50	405	8	407	7	436	21
8	11.71	39	171	0.23	0.05991	0.01044	0.4180	0.1682	0.06353	0.00315	0.00072	0.02045	611	385	355	121	397	19	14	413
9	6.00	43	72	0.60	0.05565	0.00235	0.4892	0.0210	0.06399	0.00127	0.02049	0.00125	439	94	404	14	400	8	410	25
10	18.35	127	233	0.55	0.05647	0.00133	0.5025	0.0160	0.06423	0.00113	0.02240	0.00107	472	52	413	11	401	7	448	21
11	13.03	69	163	0.42	0.05587	0.00152	0.5005	0.0160	0.06492	0.00114	0.02164	0.00092	456	59	412	11	405	7	433	18
12	14.27	76	176	0.43	0.05196	0.00106	0.4628	0.0104	0.06467	0.00084	0.02407	0.00097	283	46	386	7	404	5	481	19
13	19.93	122	259	0.47	0.05541	0.00142	0.4992	0.0170	0.06527	0.00137	0.02425	0.00087	428	56	411	11	408	8	484	17
14	12.83	74	166	0.45	0.05919	0.00159	0.5204	0.0155	0.06396	0.00114	0.02388	0.00085	576	55	425	10	400	7	477	17
15	17.10	82	207	0.40	0.05417	0.00177	0.4876	0.0155	0.06536	0.00093	0.02831	0.00108	389	74	403	11	408	6	564	21
16	14.46	77	179	0.43	0.05776	0.00174	0.5162	0.0195	0.06453	0.00104	0.02553	0.00083	520	67	423	13	403	6	509	16
17	12.58	70	162	0.43	0.05275	0.00104	0.4576	0.0103	0.06314	0.00096	0.02595	0.00065	317	44	383	7	395	6	518	13
18	21.51	99	265	0.38	0.05354	0.00128	0.4812	0.0159	0.06522	0.00165	0.02487	0.00077	350	54	399	11	407	10	496	15
19	13.93	57	156	0.37	0.05656	0.00133	0.5593	0.0136	0.07188	0.00094	0.02521	0.00084	476	52	451	9	447	6	503	17
20	18.92	91	184	0.49	0.07707	0.00668	0.8964	0.1034	0.07929	0.00192	0.03880	0.00459	1124	174	650	55	492	11	769	89
21	10.58	48	114	0.42	0.05492	0.00150	0.5716	0.0167	0.07567	0.00113	0.02657	0.00112	409	66	459	11	470	7	530	22
22	20.41	103	222	0.47	0.05604	0.00094	0.5767	0.0141	0.07469	0.00137	0.02614	0.00101	454	42	462	9	464	8	522	20
23	20.21	118	247	0.48	0.05650	0.00096	0.5023	0.0107	0.06463	0.00106	0.02244	0.00089	472	37	413	7	404	6	449	18
24	15.82	95	194	0.49	0.05608	0.00112	0.4968	0.0130	0.06435	0.00132	0.02192	0.00117	457	44	410	9	402	8	438	23
25	21.76	120	265	0.45	0.05727	0.00151	0.5149	0.0169	0.06525	0.00147	0.02219	0.00131	502	62	422	11	407	9	444	26

注: Pb* = 0.241 × ²⁰⁶Pb + 0.221 × ²⁰⁷Pb + 0.524 × ²⁰⁸Pb

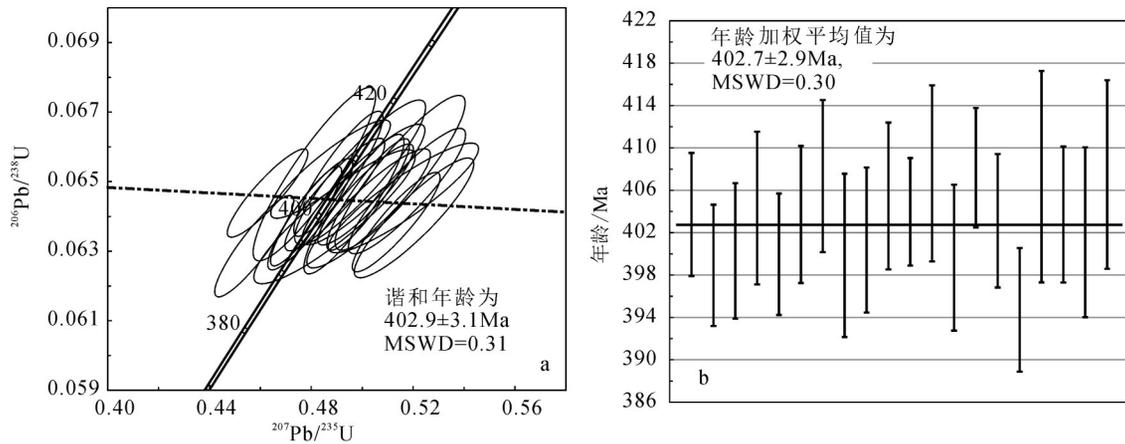


图5 金格斜长花岗岩锆石 U-Pb 谐和图(a)和 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值图(b)

Fig. 5 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagram and ²⁰⁶Pb/²³⁸U ages of the Jin'ge plagiogranite

活动的产物。

4 地球化学特征

4.1 元素分析方法

金格岩体主量、稀土、微量元素分析由核工业二〇三研究所分析测试中心完成。FeO 采用容量法分析,依据标准 GB/T14506. 14—2010;其余主量元素、 TFe_2O_3 和微量元素中 P、Ba、V、Cr、Rb、Sr、Zr、Sc 均采用 XRF 法分析,使用仪器为荷兰帕纳科公司制造的 Axios X 射线光谱仪,依据标准 GB/T14506. 28—2010;所有稀土及微量元素中 Co、Ni、Nb、Hf、Ta、Th、U 采用 ICP-MS 法分析,使用仪器为 Thermo Fisher Scientific 公司制造的 XSERIES2 型 ICP-MS,依据标准 GB/T14506. 30—2010; Fe_2O_3 值通过计算得出,计算公式为 $\text{TFe}_2\text{O}_3 = \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} \times 1.1113$ 。主量元素分析数据中烧失量值介于 0.06%~0.32%之间,总量在 99.49%~100.57%之间,满足精度标准要求;主量元素分析误差小于 1%,微量和稀土元素分析误差优于 5%。主量、稀土、微量元素化学成分及特征值见表 2。

4.2 主量元素特征

金格片麻状斜长花岗岩具有高硅($\text{SiO}_2 = 72.55\% \sim 77.41\%$)、富钠($\text{Na}_2\text{O} = 4.94\% \sim 6.63\%$)、贫钾($\text{K}_2\text{O} = 0.24\% \sim 0.95\%$)的特征。里特曼指数($\sigma = 0.86 \sim 1.49$,均小于 3.3)和碱度率($AR = 1.77 \sim 3.55$,均 < 4)显示为亚碱性特征; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 6.36 \sim 20.58$,平均值为 13.91,在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解(图 6-a)中,样品点落入低钾(拉斑玄武岩)系列。 Al_2O_3 含量在 12.11%~15.30%之间,铝饱和指数为 0.94~1.04,在 A/CNK-A/NK 图解(图 6-b)中,介于准铝质-过铝质之间。综上所述,金格斜长花岗岩具有低钾拉斑玄武岩、准铝质-过铝质、I 型花岗岩的特征。

4.3 稀土元素特征

岩石稀土元素总量变化较大($\sum \text{REE} = 67.42 \times 10^{-6} \sim 376.73 \times 10^{-6}$),平均值为 239.73×10^{-6} 。 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 3.30~20.02, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 2.47~4.46, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 1.04~2.90, δEu 值在 0.41~0.90 之间,呈弱-中等负 Eu 异常。在稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(图 7)上,表现为轻稀土元素富集、重稀土元素相对亏损,弱-中等负 Eu 异常的右倾型,显示了与俯冲作用有关的岩浆岩特征。

表 2 金格斜长花岗岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 2 Major, trace elements and REE analyses of the

Jin'ge plagiogranite					
样品	D1703/1	D1703/2	D1703/3	PM16/15	PM16/16
SiO ₂	72.55	74.15	74.21	77.41	77.20
TiO ₂	0.37	0.10	0.33	0.17	0.17
Al ₂ O ₃	15.03	15.30	13.98	12.46	12.11
Fe ₂ O ₃	0.48	0.04	0.60	0.79	1.72
FeO	1.67	0.86	1.67	0.70	0.40
MnO	0.02	0.01	0.03	0.01	0.02
MgO	0.83	0.18	0.62	0.38	0.49
CaO	4.09	2.64	3.33	0.31	0.36
Na ₂ O	5.01	6.11	4.94	6.63	6.04
K ₂ O	0.32	0.43	0.24	0.52	0.95
P ₂ O ₅	0.08	0.13	0.08	0.03	0.03
烧失量	0.12	0.19	0.32	0.06	0.10
总计	100.57	100.14	100.35	99.47	99.59
σ	0.96	1.37	0.86	1.49	1.43
AR	1.77	2.15	1.85	3.54	3.55
A/CNK	0.94	1.00	0.97	1.04	1.04
A/NK	1.75	1.45	1.67	1.09	1.10
Mg [#]	47.22	27.36	40.06	49.42	68.80
SI	9.98	2.36	7.68	4.21	5.10
Y	39.20	17.90	44.30	64.60	62.80
La	88.60	13.90	78.80	34.20	32.00
Ce	157.00	25.20	142.40	78.90	70.60
Pr	19.20	3.20	18.00	9.41	8.62
Nd	69.40	12.10	64.40	37.90	34.70
Sm	12.50	2.81	13.40	8.71	8.09
Eu	2.16	0.47	3.85	1.23	1.12
Gd	10.70	2.55	12.20	8.83	8.39
Tb	1.45	0.46	2.02	1.64	1.52
Dy	6.78	2.52	9.35	10.10	9.76
Ho	1.43	0.58	1.77	2.05	2.07
Er	3.58	1.64	4.11	6.48	6.43
Tm	0.49	0.24	0.60	0.98	0.97
Yb	2.99	1.52	3.48	6.42	6.55
Lu	0.45	0.23	0.51	0.98	0.98
δEu	0.56	0.53	0.90	0.42	0.41
$\sum \text{REE}$	376.73	67.42	354.89	207.83	191.80
$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	20.02	6.18	15.30	3.60	3.30
$(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$	4.46	3.11	3.70	2.47	2.49
$(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$	2.90	1.36	2.84	1.11	1.04
P	440	729.9	535.3	131	134
Ti	1396	547.8	1101.4	1020	1020
Cr	13.7	11	11.6	4.41	3.37
Zn	16.7	10.3	14.1	11.3	12.6
Ga	16	12.5	17.4	17.9	18
Sr	396	398.5	490.8	67.9	55.1
Zr	212	59.5	194.9	220	207
Ba	163	149.7	107.1	88.1	137
Rb	47.2	57.6	29.1	12.5	15.8
Th	15.9	8.7	11.7	10.9	12.2
U	1.51	1.37	2.36	1.1	1.26
Co	1.87	0.98	1.54	0.85	1.69
Ni	6.68	8.39	6.43	0.78	0.64
Nb	17.4	16.4	16.6	11.8	12.7
Ta	1.21	2.35	0.87	0.99	1.06
K	2655.3	3568.1	1991.5	4314.9	7883.0

注: $\sigma = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})^2 / (\text{SiO}_2 - 43)$; $AR = (\text{MgO} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{MgO} + \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O})$; $A/CNK = \text{摩尔 } \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, $A/NK = \text{摩尔 } \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$; $\text{Mg}^{\#} = 100 \times \text{Mg}^{2+} / (\text{Mg}^{2+} + \text{TFe}^{2+})$, $SI = 100 \times \text{MgO} / (\text{MgO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 。主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10^{-6} 。

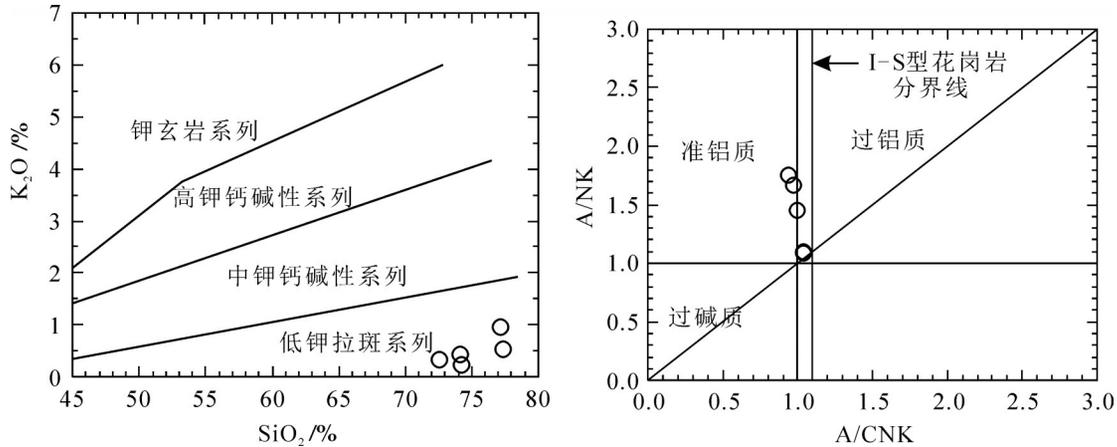


图6 SiO₂-K₂O(a)^[42]和A/CNK-A/NK(b)图解^[43]
 Fig. 6 SiO₂-K₂O (a) and A/CNK-A/NK (b) diagrams

4.4 微量元素特征

岩石微量元素特征表现为富集大离子亲石元素(LILE),如Rb、Th、U等,亏损Nb、Ta、Ti等高场强元素(HFSE),Ba、Sr、P等明显亏损。在原始地幔标准化蛛网图(图8)上,Rb、Th、U等富集,呈明显的“峰”,Nb、Ta、Ti等强烈亏损,呈明显“TNT”负异常,与俯冲作用下形成的岩浆岩特征相似。

5 讨论

5.1 形成时代

近年来,随着高精度的锆石SHRIMP U-Pb和LA-ICP-MS U-Pb同位素测年方法的广泛应用,许多学者在阿尔泰造山带获得了丰富的晚志留世一早泥盆世年龄资料,时代集中在415~390Ma,并确

定这些岩浆岩代表的岩浆活动峰值在400Ma左右^[7-9,46]。剧烈的岩浆活动产生了大量花岗岩类,在北阿尔泰、中阿尔泰和南阿尔泰广泛分布,如北阿尔泰块体诺尔特地区的塔斯比克都尔根岩体(414~396Ma)^[47]、哈龙-巴利尔岩体(401Ma)^[48];中阿尔泰块体的二厂房岩体(398±3.5Ma)^[49]、昆格依特岩体(403.4±7.4Ma)^[50]、喀纳斯岩体(398±5Ma)^[51]、铁列克岩体(403±5Ma)^[16]、琼库尔岩体(399±4Ma)^[17]、可可托海岩体(415~399Ma)^[7,11,14,52]、青格里岩体(420~386Ma)^[13];南阿尔泰块体的冲乎尔盆地北岩体(413±4Ma)^[8]、塔尔浪岩体(413~382Ma)^[52]、蒙库岩体(404±8Ma)^[20]、阿维滩岩体(400±6Ma)^[14]、克兰河中游岩体

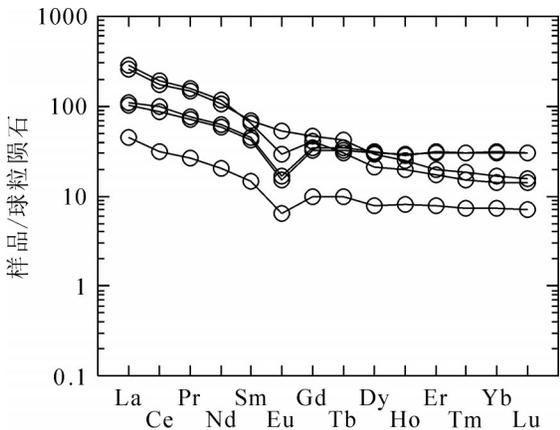


图7 球粒陨石标准稀土元素配分图(标准化值据参考文献[44])
 Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns

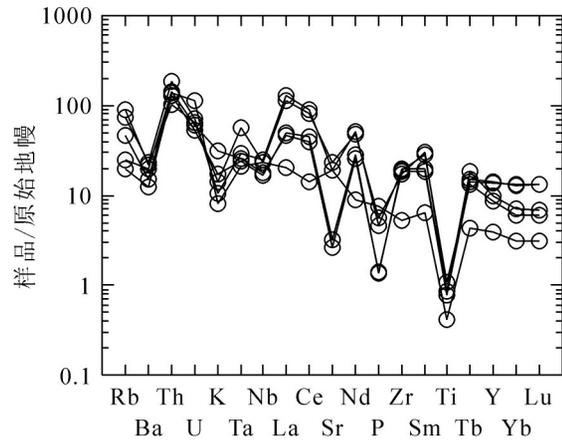


图8 原始地幔微量元素标准化蛛网图
 (标准化值据参考文献[45])
 Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams

(400 ± 2.3 Ma 和 401 ± 2.3 Ma)^[24]。此外,阿尔泰造山带发育的具有岛弧特征的火山岩^[15,23,53-55]、基性侵入岩^[14]及弧后扩张产物-库尔提蛇绿岩^[56],也指示岩浆活动的鼎盛时期在早泥盆世早期。

本次获得金格岩体中斜长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 402.7 ± 2.9 Ma,形成时代划归早泥盆世。相邻的诺尔特正格河火山岩中流纹斑岩的锆石 U-Pb 年龄为 400.4 ± 3.6 Ma^[56],与金格岩体的形成年龄基本一致,属早泥盆世。本次在浅成相的石英闪长斑岩及中浅成相的花岗闪长岩中获得的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 415.7 ± 4.0 Ma 和 413.5 ± 3.0 Ma(未发表资料),也是早泥盆世岩浆活动的产物,证实 415~390Ma 是阿尔泰南缘造山带岩浆活动的高峰期。

5.2 岩体成因

金格斜长花岗岩的地球化学数据显示,岩石具有高硅($\text{SiO}_2=72.55\% \sim 77.41\%$)、富钠($\text{Na}_2\text{O}=4.94\% \sim 6.63\%$)、贫钾($\text{K}_2\text{O}=0.24\% \sim 0.95\%$)的特征。 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=6.36 \sim 20.58$,平均值为 13.91,在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解(图 6-a)中,样品点落入低钾(拉板玄武岩)系列。 Al_2O_3 含量在 12.11%~15.30% 之间,铝饱和指数 $A/\text{ANK}=0.94 \sim 1.04$,介于准铝质-过铝质之间。总体显示低钾拉斑玄武岩、准铝质-过铝质、I 型花岗岩的特征。

较浅色花岗质岩石中发育的暗色微粒闪长质包体,被认为是岩浆混合作用的重要记录^[57]。金格岩体中发育暗色闪长质包体,其微(细)粒结构明显

区别于寄主岩的中粒结构,且两者的界线清晰,这些特征可能是包体代表的岩浆注入寄主岩浆快速冷凝的结果。包体大小不等,个别达 1m 左右,形态多样,多沿片麻理方向拉伸变形呈透镜状或扁平状。这些特征表明,斜长花岗岩的暗色闪长质包体可能起源于地幔的基性岩浆,与起源于地壳的酸性岩浆混合过快而不够充分,形成大小不等的残留物,其变形特征可能与寄主岩体在造山带俯冲-碰撞过程中一起在挤压应力作用下定向拉伸有关。前人根据 Sr-Nd 同位素资料^[14,17],认为新疆阿尔泰早古生代花岗岩类的物源是老陆壳和新生幔源物质混合的结果,杨富全等^[20]研究了同时期蒙库岩体的 Sr、Nd 同位素组成,认为蒙库片麻状斜长花岗岩的物源以幔源物质为主,有少量壳源物质的混入。金格岩体的主要岩性为斜长花岗岩-英云闪长岩-花岗闪长岩,斜长花岗岩中角闪石、黑云母等暗色矿物定向呈片麻状,岩性特征和形成时代与蒙库斜长花岗岩一致,可能代表了同源岩浆的产物。

5.3 构造环境及地质意义

关于阿尔泰造山带泥盆纪早期的构造环境,前人存在多种不同认识:韩宝福和何国琦^[58]、陈毓川等^[59]、王京彬等^[60]认为,当时属大陆边缘裂谷环境,Xiao 等^[2]、Windley 等^[7]、陈汉林等^[15]、牛贺才等^[61]、万博和张连慧^[62]、单强等^[63-64]则倾向于与俯冲有关的岛弧或弧后盆地环境,王涛等^[9]、Wang 等^[14]、童英等^[17]、张海洋等^[52]、许继峰等^[65]认识到当时已处于活动大陆边缘的陆弧环境,Yuan 等^[66]则认为是活动大陆边

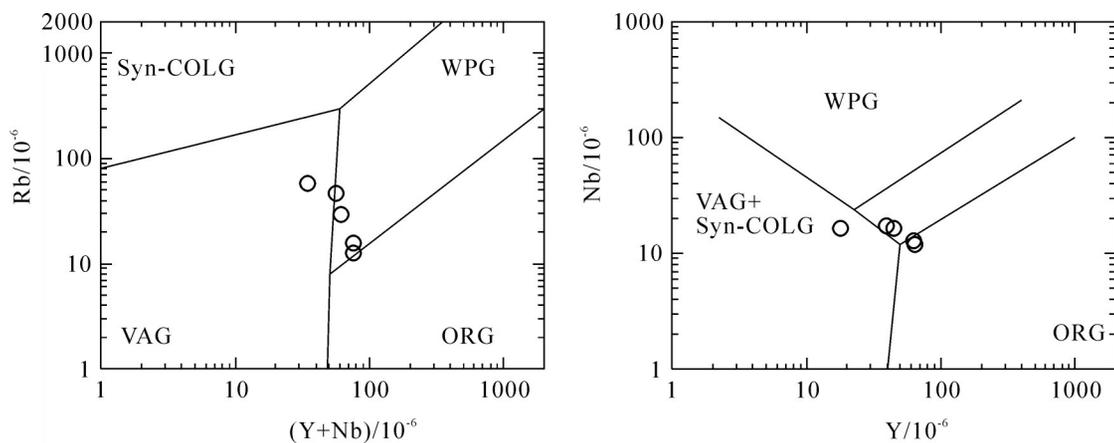


图 9 (Y+Nb)-Rb 图解(a)和 Y-Nb 图解(b)(底图据参考文献[71])

Fig. 9 Diagrams of (Y+Nb)-Rb (a) and Y-Nb (b)

ORG—洋中脊花岗岩;Syn-COLG—同碰撞花岗岩;VAG—火山弧花岗岩;WPG—板内花岗岩

缘的伸展环境。上述观点的共同之处在于,多数学者认同阿尔泰晚志留世—泥盆纪处于活动大陆边缘,岩浆活动与俯冲作用有关。

金格岩体中斜长花岗岩具有高硅($\text{SiO}_2=72.55\%\sim 77.41\%$)、富钠($\text{Na}_2\text{O}=4.94\%\sim 6.63\%$)、贫钾($\text{K}_2\text{O}=0.24\%\sim 0.95\%$)的特征,与阿尔泰库尔提蛇绿岩中斜长花岗岩相似(后者的 $\text{SiO}_2=75.66\%\sim 78.80\%$, $\text{Na}_2\text{O}=4.56\%\sim 6.86\%$, $\text{K}_2\text{O}=0.41\%\sim 1.00\%$)。研究认为,库尔提斜长花岗岩是洋壳运移过程中辉长岩经低角度剪切变形形成的角闪岩部分熔融的产物,形成于大洋板块向北俯冲引发的弧后扩张环境^[56,66]。金格斜长花岗岩与库尔提斜长花岗岩地球化学相似,反映两者具有相同的构造背景,同时期形成的蒙库片麻状斜长花岗岩也有相同的特征,均形成于洋壳俯冲的拉张环境。此外,同时期形成的火山岩具有俯冲带活动大陆边缘特征,也证实该地区在泥盆纪早期存在与洋壳俯冲作用有关的、拉张环境下的岩浆作用^[15,52,67]。另外,龙晓平等^[68]通过对阿尔泰南缘泥盆纪地层浅变质碎屑沉积岩地球化学特征、源区物质年代学及铅同位素组成研究,认为其形成于活动大陆边缘构造环境。

邓晋福等^[33-34]提出利用火成岩组合判别构造环境,如花岗闪长岩与英云闪长岩、奥长花岗岩共生在一起,称为TTG组合。一般认为,TTG岩类形成于洋俯冲作用的构造环境,是洋俯冲玄武岩板片脱水熔融的产物。金格岩体的岩性组合为斜长花岗岩—英云闪长岩—花岗闪长岩,属TTG组合,利用O'Connor (1965) An-Ab-Or 分类方法^[69],样品落入英云闪长岩+奥长花岗岩区域,也属于TTG组合。斜长花岗岩被认为是蛇绿岩套的重要组成部分,根据蛇绿岩形成环境的不同,可分为MORS型和SSZ型^[33]。对于洋斜长花岗岩类来说,MORS型中未见碱钙型、钙型特征的洋斜长花岗岩,且无TTG组合。微量元素特征显示,金格斜长花岗岩与典型的大陆花岗岩类(Chile)和SSZ型库尔提蛇绿岩套中的斜长花岗岩、蒙库斜长花岗岩相似,而与洋脊花岗岩类(Troodos)有明显区别;岩石富集Rb、Th、U等大离子亲石元素,亏损Nb、Ta、Ti等高场强元素,这种“TNT”异常是岛弧构造环境的重要标志^[70]。因此,金格岩体应形成于大陆弧环境,而不是洋脊环境。在Y-Nb和(Y+Nb)-Rb图解(图9)中,样品点落入板内、火山弧与洋脊花岗岩的交汇处,

靠近洋脊花岗岩,表明金格斜长花岗岩可能是板块俯冲过程中,洋壳中铁镁质岩石熔融形成的。

综上所述,笔者认为金格岩体斜长花岗岩具有俯冲带花岗岩类的地球化学特征,形成于与板块俯冲作用有关的大陆边缘弧的陆弧环境,金格—正格河地区在早泥盆世处于局部拉张环境。

6 结 论

(1)金格岩体中斜长花岗岩LA-ICP-MS 锆石U-Pb 年龄为 $402.7\pm 2.9\text{Ma}$,与附近的正格河火山岩($400.4\pm 3.6\text{Ma}$)形成时代相似,均属于早泥盆世岩浆活动的产物。

(2)金格岩体斜长花岗岩具有俯冲带花岗岩类的地球化学特征,形成于与板块俯冲作用有关的活动大陆边的陆弧环境,金格—正格河地区在早泥盆世处于局部拉张环境。

致谢:岩体成因与陕西省矿产地质调查中心张亚峰高级工程师进行了有益的探讨,审稿专家对文稿提出了宝贵的修改意见及建议,在此一致表示衷心的感谢。

参考文献

- [1]Sengör A M C, Natal' in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia[J]. Nature, 1993, 364(22): 299-307.
- [2]Xiao W J, Windley B F, Badarch G, et al. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altai: implications for the growth of Central Asia[J]. Journal of the Geological Society, 2004, 161: 339-342.
- [3]Handy M R, Schmid S, Bousquet R, et al. Reconciling plate-tectonic reconstructions of Alpine Tethys with the geological-geophysical record mantle[J]. Geology, 2010, 39: 155-158.
- [4]Zheng Y F. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones[J]. Chem. Geol., 2012, 328: 5-48.
- [5]Song S G, Niu Y L, Su L, et al. Continental orogenesis from ocean subduction, continent collision/sunduction, to orogen collapse, and orogen recycling: The example of the North Qaidam UHPM belt, NW China[J]. Earth-Sci. Rev., 2014, 129: 59-84.
- [6]宋述光,王梦珏,王潮,等. 大陆造山带碰撞-俯冲-折返-垮塌过程中岩浆作用及大陆地壳净生长[J]. 中国科学:地球科学, 2015, 45(7):916-940.
- [7]Windley B F, Krner A, Guo J H, et al. Neoproterozoic to paleozoic geology of the Altai orogen, NW China: new zircon age data and tectonic evolution[J]. The Journal of Geology, 2002, 110: 719-737.
- [8]曾乔松,陈广浩,王核,等. 阿尔泰冲乎尔盆地花岗质岩体的锆石SHRIMP U-Pb 定年及其构造意[J]. 岩石学报, 2007, 23(8):1921-

- 1932.
- [9]王涛,童英,李舫,等.阿尔泰造山带花岗岩时空演变、构造环境及地壳生长意义——以中国阿尔泰为例[J].岩石矿物学杂志,2010,29(6):595-618.
- [10]邓晋福,冯艳芳,狄永军,等.古亚洲洋构造域侵入岩时-空演化框架[J].地质评论,2015,61(6):1211-1224.
- [11]章享云,王根厚,赵军,等.阿尔泰乌希里克地区满克依顶萨依岩体地球化学特征、形成时代及其构造环境[J].地质通报,2016,35(8):1376-1387.
- [12]付超,李俊建,唐文龙,等.蒙古戈壁阿尔泰巴音陶勒盖地区二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].地质通报,2016,35(4):565-571.
- [13]王中刚,赵振华,邹天人.阿尔泰花岗岩类地球化学[M].北京:科学出版社,1998:1-152.
- [14]Wang T, Hong D W, Jahn B M, et al. Timing, Petrogenesis, and Setting of Paleozoic Synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: implications for the tectonic evolution of an accretionary Orogen[J]. Journal of Geology, 2006, 114:735-751.
- [15]陈汉林,杨树锋,厉子龙,等.阿尔泰晚古生代早期长英质火山的地球化学特征及构造背景[J].地质学报,2006,80(1):38-42.
- [16]童英.阿尔泰造山带晚古生代花岗岩年代学、成因及其地质意义[D].中国地质科学院博士学位论文,2006:12-101.
- [17]童英,王涛,洪大卫,等.中国阿尔泰北部山区早泥盆世花岗岩的年龄、成因及构造意义[J].岩石学报,2007,23(8):1933-1944.
- [18]李会军,何国琦,吴泰然,等.阿尔泰-蒙古微大陆的确定及其意义[J].岩石学报,2006,22(5):1369-1379.
- [19]李会军,何国琦,吴泰然,等.中国阿尔泰早古生代后碰撞花岗岩的发现及其地质意义[J].岩石学报,2010,26(8):2445-2451.
- [20]杨富全,毛景文,闫升好,等.新疆阿尔泰蒙库同造山斜长花岗岩年代学、地球化学及其地质意义[J].地质学报,2008,82(4):485-499.
- [21]孙桂华,李锦轶,杨天南,等.阿尔泰山脉南部线性花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J].中国地质,2009,36(5):976-987.
- [22]柴凤梅,毛景文,董连慧,等.阿尔泰南缘克朗盆地康布铁堡组变质火山岩年龄及岩石成因[J].岩石学报,2009,25(6):1403-1415.
- [23]柴凤梅,董连慧,杨富全,等.阿尔泰南缘克朗盆地铁木尔特花岗岩体年龄、地球化学特征及成因[J].岩石学报,2010,26(2):2946-2958.
- [24]刘国仁,董连慧,高福平,等.新疆阿尔泰克兰河中游泥盆纪花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及地球化学特征[J].地球学报,2010,31(4):519-531.
- [25]张志欣,杨富全,柴凤梅,等.阿尔泰南缘乌吐布拉克铁矿岩区花岗岩年代学及成因[J].地质论评,2011,57(3):350-365.
- [26]张亚峰,藺新望,郭岐明,等.阿尔泰南缘可可托海地区阿拉尔花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学特征及其源区意义[J].地质学报,2015,89(2):339-354.
- [27]王春龙,秦克章,唐冬梅,等.阿尔泰阿斯喀尔特 Be-Nb-Mo 矿床年代学锆石 Hf 同位素研究及其地质意义[J].岩石学报,2015,31(8):2337-2352.
- [28]宋鹏,童英,王涛,等.阿尔泰东南缘泥盆纪花岗质岩石的锆石 U-Pb 年龄、成因演化及构造意义:钙碱性-高钾钙碱性-碱性岩浆演化新证据[J].地质学报,2017,91(1):55-79.
- [29]Condie K G. Plate Tectonics and Crustal Evolution[M]. Pergamon: 1982,1-310.
- [30]Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination in of granitoids[J]. Geol. Soc. Am. Bull., 1989, 1: 635-643.
- [31]Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. Lithos, 1999, 46: 605-625.
- [32]邓晋福,罗照华,孙尚国,等.岩石成因、构造环境与成矿作用[M].北京:地质出版社,2004:1-381.
- [33]邓晋福,肖庆辉,孙尚国,等.火成岩组合与构造环境:讨论[J].高校地质学报,2007,13(3):392-402.
- [34]冯艳芳,邓晋福,肖庆辉,等.TTG 岩类的识别:讨论与建议[J].高校地质学报,2011,17(3):406-414.
- [35]何国琦,韩宝福,岳永君,等.中国阿尔泰造山带的构造分区和地壳演化[C]//新疆地质科学(第2辑).北京:地质出版社,1990:14-25.
- [36]Li J Y, Xiao W J, Wang K Z, et al. Neoproterozoic-Paleozoic tectonostratigraphy, magmatic activities and tectonic evolution of eastern Xinjian, N W China[C]//Mao J W, Goldfarb S, Wang X, et al. Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tinanshan. IACOD Cuidebook Series, 2003, 10: 31-74.
- [37]Anderson T. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb[J]. Chemical Geology, 2002, 192(12):59-79.
- [38]Ludwig K R. Isoplot/Ex, Version 2. 49. A Geochronological Tool kit for Microsoft Excel[J]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1999: 1-47.
- [39]Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2004, 28(3): 353-370.
- [40]Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. Chemical Geology, 2002, 184: 123-138.
- [41]吴元保,郑永飞.锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J].科学通报,2004,49(16):589-1604.
- [42]Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene Calc-alkaline volcanic rocks from the kastamonu area, northern Turkey[J]. CMP, 1976, 58:63-81.
- [43]Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides for major and minor element[J]. Lithos, 1989, 22: 246-263.
- [44]Taylor S R, Mclennan S M. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Blackwell: Oxford Press, 1985: 1-312.
- [45]Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. London: Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313-345.

- [46]牛贺才,于学元,许继峰,等.中国新疆阿尔泰晚古生代火山作用及成矿[M].北京:地质出版社,2006.
- [47]肖序常,汤耀庆,冯益民,等.新疆北部及其邻区大地构造[M].北京:地质出版社,1992:1-171.
- [48]袁峰,周涛发,岳书仓.阿尔泰诺尔特地区花岗岩形成时代及成因类型[J].新疆地质,2001,19(4):292-296.
- [49]张亚峰,蔺新望,郭岐明,等.阿尔泰南缘可可托海地区二厂房岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、岩石成因及其地质意义[J].岩石矿物学杂志,2014,33(1):13-28.
- [50]张亚峰,蔺新望,王星,等.阿尔泰造山带南缘昆格依特岩体锆石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、岩石成因及其地质意义[J].现代地质,2014,28(1):16-28.
- [51]童英,王涛,洪大卫,等.阿尔泰造山带西段同造山铁列克花岗岩体锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J].地球学报,2005,26(增刊):74-77.
- [52]张海洋,牛贺才,Hiroaki S,等.新疆北部晚古生代埃达克岩、富铋玄武岩组合:古亚洲洋板块南向俯冲的证据[J].高校地质学报,2004,10(1):106-113.
- [53]刘伟,刘丽娟,刘秀金,等.阿尔泰南缘早泥盆世康布铁堡组的 SIMS 锆石 U-Pb 年龄及其向东向北延伸的范围[J].岩石学报,2010,26(2):387-400.
- [54]耿新霞,杨福全,柴凤梅,等.新疆阿尔泰南缘大东沟铅锌矿区火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J].矿床地质,2012,31(5):1119-1131.
- [55]王星,蔺新望,张亚峰,等.阿尔泰诺尔泰地区泥盆纪正格河火山岩的厘定及其地质意义[J].中国地质,2015,42(1):180-191.
- [56]张海洋,牛贺才,Kentaro T,等.新疆北部阿尔泰地区库尔提蛇绿岩中斜长花岗岩的 SHRIMP 年代学研究[J].科学通报,2003,48(12):1350-1354.
- [57]肖庆辉,邓晋福,邱瑞照,等.花岗岩类与大陆地壳生长初探——以中国典型造山带花岗岩类岩石的形成为例[J].中国地质,2009,36(3):594-622.
- [58]韩宝福,何国琦.阿尔泰山南缘泥盆纪火山岩带的大地构造性质[J].新疆地质科学,1991,3:89-100.
- [59]陈毓川,叶庆同,冯京.阿舍勒铜锌成矿带成矿条件和成矿预测[M].北京:地质出版社,1996:1-85.
- [60]王京彬,秦克章,吴志亮,等.阿尔泰山南缘火山喷流沉积型铅锌矿床[J].北京:地质出版社,1998:18-60.
- [61]牛贺才,许继峰,于学元,等.新疆阿尔泰富镁火山岩系的发现及其地质意义[M].科学通报,1999,44(9):1002-1004.
- [62]万博,张连昌.新疆阿尔泰南缘泥盆纪多金属成矿带 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学与构造背景[J].岩石学报,2006,22(1):145-152.
- [63]单强,曾乔松,罗勇,等.新疆阿尔泰康布铁堡组钾质和钠质流纹岩的成因及其同位素年代学研[J].岩石学报,2011,27(12):3653-3665.
- [64]单强,曾乔松,李宁波,等.新疆阿尔泰南缘康布铁堡组钾-钠质流纹岩锆石 U-Pb 年龄和地球化[J].岩石学报,2012,28(7):2132-2144.
- [65]许继峰,梅厚钧,于学元,等.准噶尔北缘晚古生代岛弧中与俯冲作用有关的 adakite 火山岩:消减板片部分熔融的产物[J].科学通报,2001,46(8):684-687.
- [66]Yuan C, Sun M, Xiao W J, et al. Accretionary orogenesis of the Chinese Altai: Insights from Paleozoic granitoids[J]. Chemical Geology, 2007, 242: 22-39.
- [67]丛峰,唐红峰,苏玉平,等.阿尔泰南缘泥盆纪流纹岩的地球化学和大地构造背景[J].大地构造与成矿学,2007,31(3):359-364.
- [68]龙晓平,袁超,孙敏,等.北疆阿尔泰南缘泥盆系浅变质碎屑沉积岩地球化学特征及其形成环境[J].岩石学报,2008,24(4):718-732.
- [69]O'Connor J T. A Classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios[J]. U. S. Geol. Survey Professional Paper, 1965, 525B: B79-B84.
- [70]赵振华.关于岩石微量元素构造环境判别图解使用的相关问题[J].大地构造与成矿学,2007,31(1):92-103.
- [71]Pearce J A, Harris N B L, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of the granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25: 956-983.
- ①蔺新望,王星,赵端昌,等.新疆富蕴县阿拉一带 1:5 万 L45E003023、L45E003024、L45E004023、L45E004024、L46E004001 五幅区域地质调查报告.2019.