

阿尔泰造山带青河地区早泥盆世和寒武纪末 花岗岩的年代学、岩石成因及其地质意义

黄博涛, 董增产, 潘 峰, 王 凯

(国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘 要: 阿尔泰造山带中广泛发育古生代的花岗质岩浆活动, 它们对认识阿尔泰造山带的构造演化具有重要意义。本文对青河县西南方向敖包特花岗岩体中的片麻状黑云二长花岗岩及其捕掳体片麻状英云闪长岩进行 LA-ICP-MS 定年, 分别获得了 407 ± 3 Ma 和 491 ± 3 Ma 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, 为早泥盆世和寒武纪末。岩石地球化学特征表明早泥盆世的片麻状黑云二长花岗岩具有钙碱性-碱钙性和镁质花岗岩的特点, 其 A/CNK 比值为 $0.98 \sim 1.08$, 为准铝质-弱过铝质, CIPW 标准刚玉分子数主体小于 1, 且其具有较高的 Y 含量 ($27.2 \times 10^{-6} \sim 40.5 \times 10^{-6}$) 和 Th 含量 ($10.2 \times 10^{-6} \sim 27.0 \times 10^{-6}$), 随着 Rb 含量的增加均有逐渐增加的趋势, 表现出 I 型花岗岩的特征。寒武纪末的片麻状英云闪长岩具有较低的 SiO_2 含量 ($60.28\% \sim 64.01\%$), 其初始铝饱和指数应为准铝质-弱过铝质, 微量元素特征同样表现出 I 型花岗岩的成因特点。通过综合分析认为该早泥盆世的花岗岩与寒武纪末的英云闪长岩均形成于俯冲相关的构造环境。

关键词: 阿尔泰; I 型花岗岩; 寒武纪末; 早泥盆世; 俯冲环境

中图分类号: P588.12⁺1; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)04-0458-15

Geochronology, petrogenesis and geological significance of the early Devonian and terminal Cambrian granites in Qinghe area of China's Altay orogenic belt

HUANG Bo-tao, DONG Zeng-chan, PAN Feng and WANG Kai

(Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MLR, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, China)

Abstract: There are abundant Paleozoic granites in China's Altay orogenic belt, which played an important role in the tectonic evolution. In this study, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yielded the $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of 407 ± 3 Ma and 491 ± 3 Ma for the gneissic granite and gneissic tonalite of the Aobaote pluton in Qinghe area respectively, suggesting early Devonian and terminal Cambrian period. The gneissic granite is of calc-alkaline or alkali-calc nature, and belongs to magnesian granite. It is metaluminous-slightly peraluminous with the A/CNK values being $0.98 \sim 1.08$ and normative corundum values being less than 1. And there are high Y values of $27.2 \times 10^{-6} \sim 40.5 \times 10^{-6}$ and Th values of $10.2 \times 10^{-6} \sim 27.0 \times 10^{-6}$, which increase with increasing Rb. The above characteristics indicate that the gneissic granite belongs to I-type granite. There are low SiO_2 values of $60.28\% \sim 64.01\%$ for the gneissic tonalite, and its A/CNK values show that its protolith was metaluminous-slightly peraluminous. Together with its trace element characteristics, the authors hold that the gneissic tonalite is characterized by I-type granite. Synthetic analysis shows that the gneissic granite and gneissic tonalite were formed by the subduction.

收稿日期: 2017-03-02; 接受日期: 2017-06-12

基金项目: 中国地质调查局资助项目(121201011000150003)

作者简介: 黄博涛(1990-), 男, 硕士, 助理工程师, 岩石学专业, E-mail: huangbt1990@163.com。

Key words: Altay; I-type granite; terminal Cambrian; early Devonian; subduction

Fund support: Project of China Geological Survey (12120101100015003)

中国阿尔泰造山带是中亚显生宙增生型造山带的重要组成部分(Sengör *et al.*, 1993; Hu *et al.*, 2000; Windley *et al.*, 2002; Xiao *et al.*, 2004; Yuan *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2009)。同整个中亚造山带相类似, 该区发育有大量的花岗岩, 花岗岩出露面积约占全区的40%以上(邹天人等, 1988; 王涛等, 2005; 童英等, 2006)。阿尔泰花岗岩的主要岩石类型包括英云闪长岩、花岗闪长岩、黑云母花岗岩、二云母花岗岩、白云母花岗岩等, 大量的研究工作认为它们具有多时代、多类型、多成因、多来源以及形成于多种构造环境的特点(如邹天人等, 1988; Wang *et al.*, 2006; 王涛等, 2010)。早期通常认为阿尔泰花岗岩形成于晚古生代, 然而近年来随着高精度锆石年代学的发展, 揭示出阿尔泰造山带发育有连续的花岗质岩浆活动(Cai *et al.*, 2011a, 2011b), 其时代主要为早古生代、晚古生代和中生代, 集中于460 Ma、410 Ma、380 Ma和265 Ma 4个年龄峰值(如Wang *et al.*, 2006; 童英等, 2007; 曾乔松等, 2007; 杨富全等, 2008; 李会军等, 2010; 董连慧等, 2012)。其中泥盆纪花岗岩是阿尔泰花岗岩最主要的时期, 其形成于后碰撞还是活动大陆边缘环境仍是需要关注的问题(如童英等, 2007; 李会军等, 2010; Cai *et al.*, 2011a, 2011b)。此外, 阿尔泰造山带中寒武纪花岗岩的报道一直较少, 对其产出形态及其岩石成因更是缺少认识。

本文在阿尔泰造山带青河县以南识别出寒武纪末以及早泥盆世的花岗岩, 通过精细的年代学与地球化学研究, 探讨了它们的岩石成因及地质意义, 为确定阿尔泰花岗岩年代学格架以及地球动力学演化提供了进一步的信息。

1 区域地质背景和岩体特征

中国阿尔泰造山带位于西伯利亚板块与哈萨克斯坦-准噶尔板块之间, 呈北西-南东向延伸, 向东可至蒙古境内, 向西至哈萨克斯坦与俄罗斯境内(Windley *et al.*, 2002; 孙敏等, 2009)。Windley 等

(2002)根据出露的地层、岩石组合及变质变形等特征将阿尔泰造山带分为6个以断裂为界线的地体。而相对简化的构造划分方案, 则以红山嘴-诺尔特断裂、阿巴宫-库尔提断裂和额尔齐斯断裂带为界, 分为北、中、南阿尔泰3个块体(图1, 如Li *et al.*, 2003; Xiao *et al.*, 2004)。北阿尔泰主要由泥盆纪-石炭纪碎屑沉积岩、火山碎屑岩及晚古生代侵入岩组成。中阿尔泰主要由震旦纪-早古生代深变质沉积岩系以及奥陶纪-二叠纪侵入岩组成, 并可能有前寒武纪基底(Hu *et al.*, 2000; 李会军等, 2006)。南阿尔泰主要由一些变质程度较高的片麻岩、古生代(志留纪-石炭纪)火山-沉积岩系及奥陶纪-二叠纪侵入岩组成(柴凤梅等, 2009; 王涛等, 2010)。

本次研究的敖包特花岗岩位于青河县西南方向约13 km处, 位于中阿尔泰块体的南部边缘。该岩体出露面积较大, 延伸方向与区内NW-SE向构造线方向一致(图2), 片麻理走向也平行于该方向。在1:25万青河县幅地质报告^①中该岩体被认为是中元古代的片麻状英云闪长岩岩体, 然而本次研究通过野外地质调查与LA-ICP-MS锆石U-Pb定年, 显示该岩体主体为泥盆纪的片麻状黑云二长花岗岩, 其中发育寒武纪末期的片麻状英云闪长岩捕虏体(详见后述)(图3a)。捕虏体块体较大, 外形呈块状或不规则状, 长可至数米到数十米, 颜色较寄主岩暗, 且二者之间可见截然的界线(图3b), 局部可见片麻状黑云二长花岗岩边部发育冷凝边。区域上还分布有苏普特岩群和二叠纪的黑云二长花岗岩岩体, 二叠纪的花岗岩岩体延伸方向也与区域上的构造线方向一致, 且可见其侵入至泥盆纪花岗岩中, 苏普特岩群主体为一套变粒岩、片岩和片麻岩, 以含堇青石、石榴石、红柱石、十字石、矽线石等特征变质矿物为特征, 1:25万青河县幅区域地质调查^①时认为其时代为中元古代, 然而1:20万区域地质调查^②认为其为奥陶纪的哈巴河群。本次研究分别对泥盆纪的片麻状黑云二长花岗岩(BTC-1)和其中的捕虏体片麻状英云闪长岩(BTC-2)进行了采样(图2)。

其中片麻状黑云二长花岗岩(BTC-1)呈灰白色,

① 新疆维吾尔自治区地质调查院. 2012. 新疆1:25万青河县幅(L46C002001)区域地质调查报告.

② 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1979. 德柳、青河幅(L-46-Ⅰ、Ⅶ)1:20万区域地质调查报告.

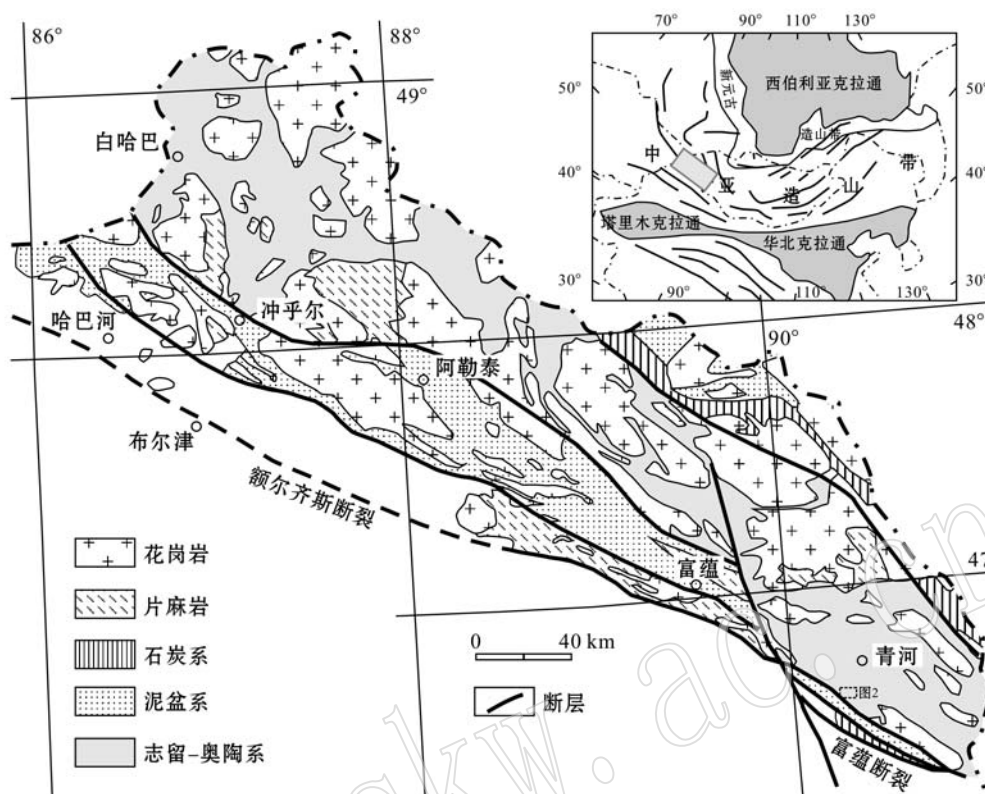


图 1 阿尔泰山造山带地质简图(据 Windley *et al.*, 2002; 孙敏等, 2009)

Fig. 1 Geological sketch map of China's Altay orogenic belt (after Windley *et al.*, 2002; Sun Min *et al.*, 2009)

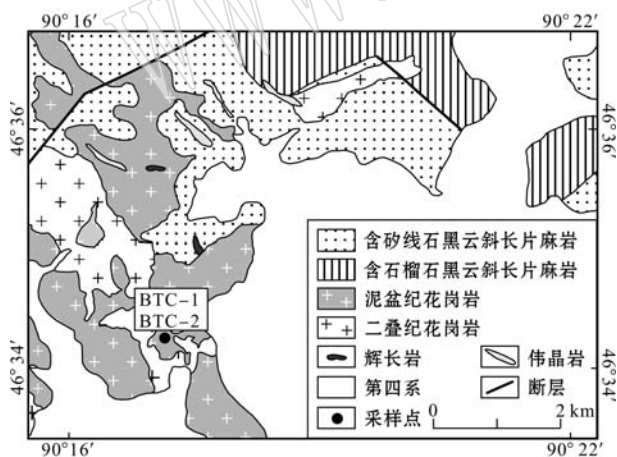


图 2 青河地区敖包特花岗岩地质简图

Fig. 2 Geological sketch map of the Aobaote granite pluton in the Qinghe area

细粒结构,块状-弱片麻状构造。主要矿物组成为斜长石(30%~36%)、碱性长石(28%~34%)、石英(18%~22%)和黑云母(15%~20%)(图 3c)。斜长石矿物晶体呈透镜状或拉长粒状,粒径大小约 0.5~2 mm,碱性长石为微斜长石,呈眼球状、透镜状或拉

长粒状,粒径大小约 0.5~2 mm,两种长石晶体均沿其长轴方向呈定向分布。个别斜长石晶体有轻度的绢云母化与绿帘石化。黑云母呈片状,常呈不连续的片状集合体与长英质矿物相间定向排列分布。少量黑云母晶体被绿泥石或白云母交代。

片麻状英云闪长岩(BTC-2)呈深灰色,中细粒结构,弱片麻状构造。主要矿物组成为斜长石(40%~50%)、石英(30%~38%)和黑云母(17%~25%),副矿物为磷灰石和锆石,次生矿物是白云母,可能为斜长石蚀变的产物(图 3d)。斜长石矿物晶体常呈眼球状或透镜状,粒径大小约 0.3~2 mm,局部可见一些细小粒状长石与石英晶体呈镶嵌状集合体。片状矿物黑云母常呈不连续片状集合体与长英质矿物相间定向排列,但其分布不均匀。

2 测试方法

样品的全岩主微量元素测试均在西安地质矿产研究所实验测试中心完成。主量元素利用 Xios 4.0kwX 型荧光光谱仪分析,分析误差低于 5%,其

中 FeO 和烧失量(LOI)采用标准湿化学法分析。稀土和微量元素利用 Series II 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析,分析精度高于 10%。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年在西安地质矿产研究所实验测试中心完成。激光剥蚀系统为

Coherent Geolas Pro, 剥蚀孔径为 24 μm , 激光频率为 7 Hz。等离子质谱仪为 Agilent 7700X。锆石 U-Pb 年龄计算采用标样 91500 为外标, 数据处理采用 Glitter 完成。绘制谐和图和计算加权平均年龄采用 Isoplot 完成(Ludwig, 2001)。

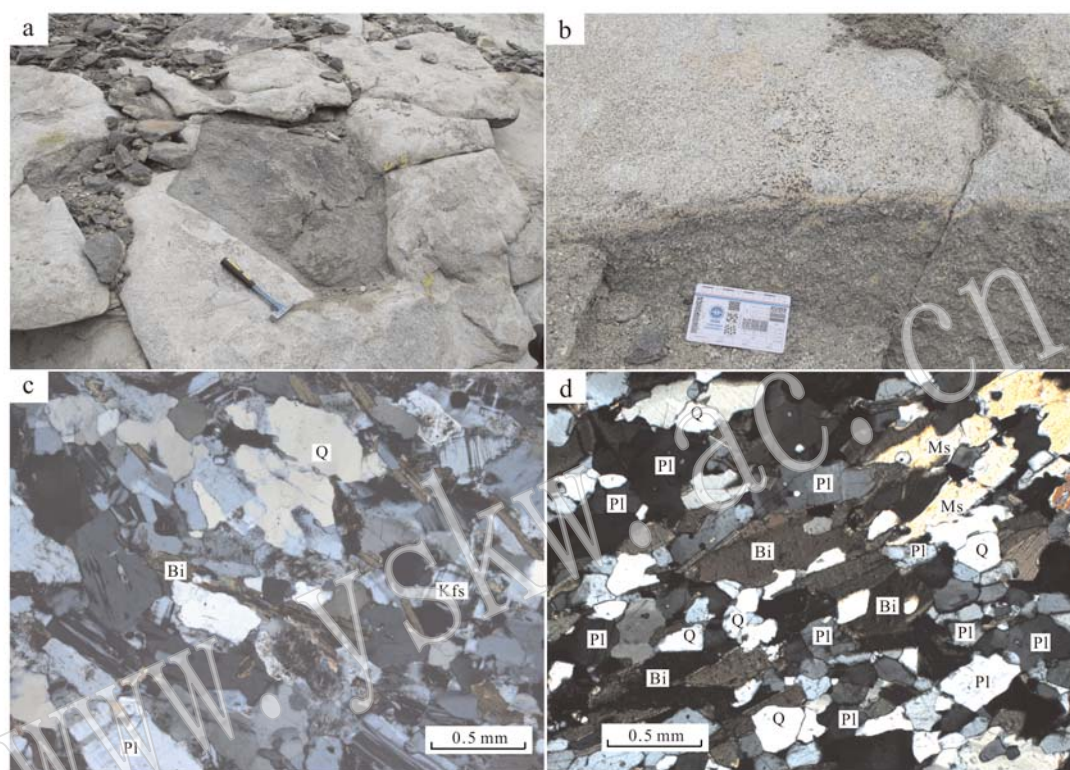


图 3 片麻状黑云二长花岗岩与片麻状英云闪长岩的野外与结构特征

Fig. 3 Field photos and photomicrographs of the gneissic granite and gneissic tonalite

a—片麻状黑云二长花岗岩中的片麻状英云闪长岩捕掳体; b—片麻状黑云二长花岗岩与片麻状英云闪长岩截然的界线; c—片麻状黑云二长花岗岩的矿物组成(+); d—片麻状英云闪长岩的矿物组成(+); Pl—斜长石; Q—石英; Bi—黑云母; Ms—白云母; Kfs—钾长石

a—gneissic tonalite xenolith in the gneissic granite; b—obvious boundary between gneissic granite and gneissic tonalite; c—photomicrograph of gneissic granite(+); d—photomicrograph of gneissic tonalite(+); Pl—plagioclase; Q—quartz; Bi—biotite; Ms—muscovite; Kfs—K-feldspar

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

片麻状黑云二长花岗岩中的锆石多为半自形—自形的长柱状或短柱状,长度多集中于 100~150 μm ,长宽比约 2:1~3:1。CL 图像显示大部分锆石为单一的具有振荡环带的岩浆锆石(图 4a),个别锆石具有暗色均一的窄边,或者显示残留的具有振荡环带的核部。

对该片麻状黑云二长花岗岩进行锆石 U-Pb 年

代学分析,分析点都位于具有振荡环带的锆石部位,其中 15 个分析点谐和度较高且具有较一致的年龄(表 1),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $407 \pm 3 \text{ Ma}$ (图 5a),代表片麻状花岗岩的结晶年龄。另外,还获得了约 1.0 Ga 和 1.4 Ga 的核部较老的年龄,其与锆石边部明显为两个世代,代表捕获锆石的年龄。

片麻状英云闪长岩中的锆石形态较复杂,多为短柱状或长柱状,个别锆石的形态有一定程度的圆化。锆石长度多集中于 100~150 μm ,长宽比约 1:1~2:1。CL 图像显示锆石具有明显的岩浆锆石的振荡环带,其多数发育较窄的边部,可见微弱的振荡环

带,个别锆石内部可见残留的岩浆锆石核(图 4b)。

对该片麻状英云闪长岩进行锆石 U-Pb 年代学分析,分析点都位于具有振荡环带的锆石部位,其中 20 个分析点谐和度较高且具有较一致的年龄(表

1),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $491 \pm 3 \text{ Ma}$ (图 5b),代表片麻状英云闪长岩的结晶年龄。另外,还获得了约 0.9 Ga 和 1.5 Ga 的捕获锆石的年龄。

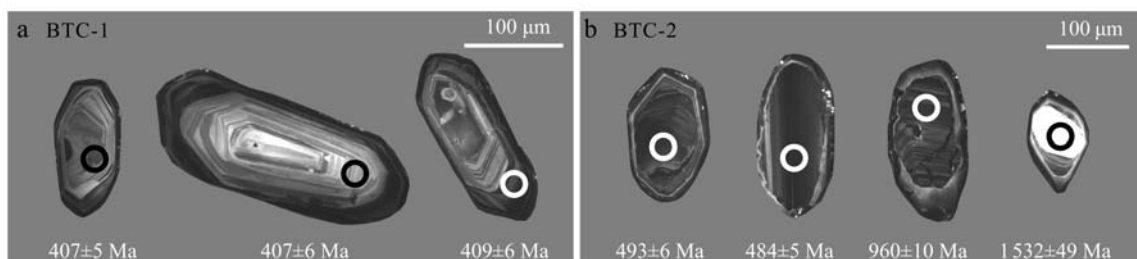


图 4 片麻状黑云二长花岗岩(a)和片麻状英云闪长岩(b)的代表性锆石 CL 图像

Fig. 4 CL images of representative zircons: gneissic granite (a) and gneissic tonalite (b)

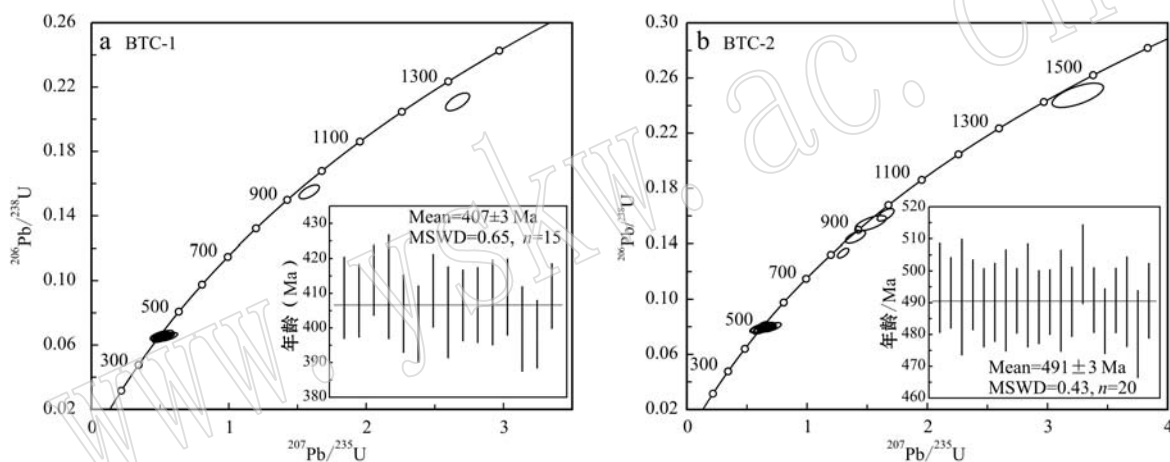


图 5 片麻状黑云二长花岗岩(a)和片麻状英云闪长岩(b)的锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagrams of gneissic granite (a) and gneissic tonalite (b)

3.2 岩石地球化学

片麻状黑云二长花岗岩和片麻状英云闪长岩的地球化学分析数据见表 2。其中片麻状黑云二长花岗岩的 SiO_2 含量为 72.5%~73.44%,全碱含量为 8.14%~8.72%,在 TAS 投图上落入亚碱性的花岗岩区域(图 6a)。其 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 1.82~2.22,相对富钾。 A/CNK 比值为 0.98~1.08,表现为准铝质-过铝质的特征(图 6b)。在 SiO_2 -($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$)图解上,表现为钙碱性-碱钙性的特点(图 6c);在 SiO_2 - $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO})$ 图解上,显示镁质花岗岩的特征,且所有的点都落入科迪勒拉花岗岩岩基的地球化学区域(图 6d)。

总稀土含量较高, ΣREE 约为 $208.71 \times 10^{-6} \sim 292.78 \times 10^{-6}$ 。在球粒陨石标准化的稀土分布模式

图解上,显示明显的轻稀土富集[(La/Yb) $_{\text{N}}=10.03 \sim 13.7$]的右倾曲线型式和 Eu 的负异常($\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.39 \sim 0.46$)(图 7a)。在原始地幔标准化的微量元素蜘蛛图解上,显示明显的 Ba、Nb、Ta、Sr、P 和 Ti 的负异常,其中 Ti 的负异常显著,另外可见 Rb 和 Pb 的正异常(图 7b)。

片麻状英云闪长岩具有较低的 SiO_2 含量(60.28%~64.01%),变化范围较大的 CaO 含量(1.57%~3.96%)及较高的烧失量(1.25%~1.90%),在烧失量-CaO 图解上,显示较低的烧失量有较高的 CaO 含量(图 8a)。该岩石 Na_2O 含量为 2.37%~2.93%, K_2O 含量为 2.68%~4.35%,且在烧失量- Na_2O 图解和烧失量- K_2O 图解上,分别显示较低的烧失量有较高的 Na_2O 含量和较低的

表 1 青河地区片麻状黑云二长花岗岩与片麻状英云闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of the gneissic granite and gneissic tonalite in Qinghe

分析点	U-Pb 同位素比值										年龄/Ma			谐和度/%			
	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$					$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$					$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$						
	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$				
BTC-1-01	0.054 9	0.002 6	0.495 1	0.022 8	0.065 5	0.001 0	0.020 8	0.000 8	407	101	408	16	409	6	417	15	100
BTC-1-02	0.061 0	0.002 2	0.549 3	0.019 8	0.065 3	0.000 9	0.020 3	0.000 6	640	77	445	13	408	5	407	13	109
BTC-1-03	0.055 0	0.001 8	0.502 8	0.016 3	0.066 3	0.000 8	0.022 0	0.000 6	413	71	414	11	414	5	440	12	100
BTC-1-04	0.055 5	0.003 8	0.504 9	0.034 4	0.066 0	0.001 2	0.020 9	0.000 8	433	147	415	23	412	8	419	16	101
BTC-1-05	0.056 4	0.002 6	0.502 5	0.022 8	0.064 7	0.000 9	0.021 1	0.000 6	466	99	413	15	404	6	421	11	102
BTC-1-06	0.055 9	0.002 5	0.494 8	0.021 9	0.064 2	0.000 9	0.019 7	0.000 7	448	97	408	15	401	6	395	13	102
BTC-1-07	0.056 8	0.002 2	0.514 8	0.019 3	0.065 8	0.000 9	0.022 1	0.000 7	482	82	422	13	411	5	442	14	103
BTC-1-08	0.060 9	0.003 5	0.543 9	0.030 7	0.064 8	0.001 1	0.019 1	0.000 9	637	119	441	20	405	7	383	17	109
BTC-1-09	0.074 1	0.001 4	1.578 8	0.030 6	0.154 6	0.001 8	0.049 2	0.001 1	1 044	38	962	12	927	10	970	20	104
BTC-1-10	0.056 5	0.002 1	0.507 1	0.018 5	0.065 1	0.000 9	0.020 1	0.000 7	472	80	417	12	407	5	402	14	102
BTC-1-11	0.057 7	0.002 4	0.518 1	0.021 1	0.065 1	0.000 9	0.021 2	0.000 7	519	88	424	14	407	5	425	14	104
BTC-1-12	0.053 3	0.002 8	0.479 2	0.024 7	0.065 2	0.001 0	0.020 6	0.000 9	341	114	398	17	407	6	413	18	98
BTC-1-13	0.058 2	0.002 4	0.525 1	0.021 7	0.065 5	0.000 9	0.022 9	0.000 7	535	90	429	14	409	6	458	14	105
BTC-1-14	0.056 9	0.003 2	0.502 1	0.028 2	0.064 0	0.001 0	0.021 1	0.000 9	489	121	413	19	400	6	422	17	103
BTC-1-15	0.054 9	0.001 8	0.482 6	0.015 9	0.063 7	0.000 8	0.020 4	0.000 6	410	72	400	11	398	5	408	11	100
BTC-1-16	0.060 9	0.001 6	0.549 9	0.014 0	0.065 5	0.000 8	0.022 3	0.000 5	635	54	445	9	409	5	446	10	109
BTC-1-17	0.091 6	0.001 2	2.659 6	0.035 4	0.210 5	0.002 3	0.077 8	0.001 2	1 460	25	1 317	10	1 232	12	1 514	23	119
BTC-2-01	0.059 0	0.002 5	0.648 8	0.027 2	0.079 8	0.001 2	0.026 9	0.000 8	567	90	508	17	495	7	537	16	103
BTC-2-02	0.058 3	0.001 5	0.639 5	0.015 9	0.079 5	0.000 9	0.025 7	0.000 7	542	54	502	10	493	6	513	13	102
BTC-2-03	0.057 0	0.004 1	0.623 3	0.044 3	0.079 3	0.001 5	0.028 8	0.001 8	493	152	492	28	492	9	573	36	100
BTC-2-04	0.059 1	0.001 4	0.646 4	0.015 7	0.079 4	0.000 9	0.028 3	0.000 8	569	52	506	10	493	6	564	16	103
BTC-2-05	0.071 4	0.002 5	1.521 5	0.053 2	0.154 5	0.002 3	0.053 3	0.001 4	969	70	939	21	926	13	1 049	27	101
BTC-2-06	0.058 3	0.002 0	0.633 2	0.021 5	0.078 7	0.001 0	0.023 8	0.000 8	542	74	498	13	488	6	475	16	102
BTC-2-07	0.062 2	0.002 1	0.677 1	0.022 8	0.079 0	0.001 0	0.025 4	0.001 0	680	71	525	14	490	6	507	20	107
BTC-2-08	0.056 1	0.003 4	0.611 5	0.036 6	0.079 1	0.001 4	0.025 9	0.000 9	455	129	485	23	491	8	517	17	99
BTC-2-09	0.061 1	0.001 1	0.666 2	0.011 5	0.079 1	0.000 9	0.022 5	0.000 4	643	37	518	7	491	5	449	9	106

续表 1
Continued Table 1

分析点	U-Pb 同位素比值						年龄/Ma						谐和度/%				
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$\pm 1\sigma$		
BTC-2-10	0.070 3	0.001 0	1.292 7	0.019 2	0.133 4	0.001 4	0.023 2	0.000 4	937	30	843	8	807	8	464	8	104
BTC-2-12	0.062 9	0.003 4	0.688 0	0.036 4	0.079 3	0.001 4	0.027 7	0.002 1	704	110	532	22	492	8	551	41	108
BTC-2-13	0.063 5	0.001 7	0.689 3	0.018 6	0.078 7	0.001 0	0.023 5	0.000 7	725	57	532	11	489	6	470	13	109
BTC-2-16	0.057 9	0.001 0	0.630 5	0.011 2	0.079 0	0.000 9	0.025 0	0.000 5	525	39	496	7	490	5	499	10	101
BTC-2-17	0.055 9	0.003 3	0.609 5	0.035 5	0.079 1	0.001 4	0.024 5	0.001 0	448	126	483	22	491	8	489	20	99
BTC-2-18	0.058 8	0.001 4	0.640 4	0.015 1	0.079 0	0.000 9	0.025 0	0.000 6	559	51	503	9	490	6	499	12	103
BTC-2-21	0.070 1	0.001 7	1.397 1	0.034 1	0.144 6	0.001 8	0.050 4	0.001 4	930	49	888	14	871	10	994	26	102
BTC-2-22	0.074 4	0.001 3	1.646 7	0.028 2	0.160 6	0.001 8	0.054 3	0.001 1	1 052	34	988	11	960	10	1 069	21	103
BTC-2-23	0.055 8	0.001 8	0.623 4	0.020 2	0.081 0	0.001 1	0.027 1	0.000 7	445	71	492	13	502	6	540	13	98
BTC-2-24	0.058 7	0.001 0	0.640 5	0.011 0	0.079 1	0.000 9	0.024 2	0.000 4	557	37	503	7	491	5	484	8	102
BTC-2-25	0.095 2	0.002 5	3.246 6	0.087 8	0.247 3	0.003 6	0.076 1	0.002 7	1 532	49	1 468	21	1 425	18	1 483	50	108
BTC-2-26	0.058 0	0.001 1	0.624 2	0.012 0	0.078 0	0.000 9	0.024 8	0.000 4	531	42	493	7	484	5	495	7	102
BTC-2-27	0.057 9	0.001 0	0.631 0	0.010 7	0.079 1	0.000 9	0.024 3	0.000 5	524	37	497	7	491	5	486	9	101
BTC-2-28	0.057 0	0.002 7	0.620 8	0.028 9	0.079 0	0.001 2	0.024 8	0.001 1	490	101	490	18	490	7	495	21	100
BTC-2-29	0.056 9	0.002 6	0.606 3	0.027 0	0.077 3	0.001 2	0.024 7	0.000 9	486	97	481	17	480	7	492	18	100
BTC-2-30	0.058 2	0.001 7	0.635 0	0.018 7	0.079 1	0.001 0	0.026 7	0.000 6	538	64	499	12	491	6	533	12	102

表 2 青河地区片麻状黑云二长花岗岩与片麻状英云闪长岩的主量($w_B/\%$)、微量($w_B/10^{-6}$)分析数据

Table 2 Major elements ($w_B/\%$), trace elements and rare earth elements($w_B/10^{-6}$) of the gneissic granite and gneissic tonalite in Qinghe

元素	片麻状黑云二长花岗岩										片麻状英云闪长岩						
	BTC-1-1	BTC-1-2	BTC-1-3	BTC-1-4	BTC-1-5	BTC-1-6	BTC-1-7	BTC-2-1	BTC-2-2	BTC-2-3	BTC-2-4	BTC-2-5	BTC-2-6	BTC-2-7			
SiO ₂	73.44	72.75	72.50	72.87	72.61	72.95	72.60	63.69	61.40	63.20	62.69	61.16	64.01	60.28			
TiO ₂	0.26	0.29	0.28	0.26	0.27	0.24	0.29	0.72	0.82	0.78	0.79	0.84	0.76	1.64			
Al ₂ O ₃	13.47	13.43	13.55	13.59	13.53	13.44	13.67	16.16	16.45	15.85	16.28	16.35	15.64	15.13			
Fe ₂ O ₃	0.34	0.54	0.19	0.32	0.59	0.25	0.44	1.00	1.28	1.07	1.11	1.32	0.93	2.65			
FeO	1.47	1.61	1.87	1.50	1.43	1.61	1.76	4.91	5.49	5.28	5.24	5.66	5.16	5.38			
MnO	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.12	0.13	0.12	0.13	0.14	0.12	0.13			
MgO	0.52	0.71	0.69	0.56	0.64	0.60	0.68	3.46	3.94	3.69	3.73	4.13	3.59	3.06			
CaO	1.45	1.46	1.53	1.55	1.49	1.50	1.39	1.61	1.60	1.57	1.66	1.58	1.57	3.96			
Na ₂ O	2.72	2.89	2.92	3.07	2.91	2.88	2.51	2.49	2.37	2.41	2.49	2.44	2.42	2.93			
K ₂ O	5.46	5.57	5.57	5.59	5.73	5.80	5.56	3.75	4.22	4.05	3.76	4.35	3.88	2.68			
P ₂ O ₅	0.20	0.22	0.22	0.24	0.24	0.24	0.20	0.14	0.14	0.14	0.14	0.16	0.12	0.76			
烧失量	0.62	0.66	0.77	0.6	0.67	0.63	0.74	1.86	1.82	1.75	1.90	1.71	1.69	1.25			
H ₂ O ⁺	0.22	0.24	0.33	0.19	0.25	0.17	0.24	0.45	0.52	0.34	0.57	0.47	0.37	0.35			
总量	99.98	100.17	100.12	100.18	100.14	100.17	99.87	99.91	99.66	99.91	99.92	99.84	99.89	99.85			
Cu	5.36	8.08	5.90	4.32	4.20	4.45	6.12	31.00	35.50	34.80	35.10	37.40	30.80	37.00			
Pb	38.8	47.3	44.4	44.8	40.5	46.4	44.3	19.3	18.5	31.6	17.4	16.4	17.8	11.7			
Zn	25.1	43.4	37.4	33.6	32.1	43.2	36.9	83.3	96.2	120.0	89.9	92.2	85.7	93.7			
Cr	5.03	12.30	9.61	3.98	6.33	5.22	10.30	108.00	135.00	127.00	122.00	136.00	118.00	36.40			
Ni	3.36	6.24	5.02	2.55	3.64	3.38	5.81	55.30	64.10	62.30	62.30	64.50	59.10	19.60			
Co	3.01	4.14	3.52	2.92	3.24	2.93	3.75	18.20	20.20	19.40	20.40	20.20	18.20	20.80			
Li	9.29	15.80	12.80	9.68	12.50	12.30	13.80	34.30	40.20	38.10	35.90	40.80	36.20	35.00			
Rb	168	187	141	159	115	156	180	188	237	199	136	156	171	138			
Cs	2.21	2.70	2.31	2.63	2.29	2.14	2.56	6.58	8.27	7.62	5.95	7.04	7.02	6.18			
Sr	161	167	134	163	98	151	163	205	196	190	170	172	183	264			
Ba	801	781	681	812	666	756	769	359	381	352	241	301	316	378			
V	23.8	30.4	26.9	24.0	25.8	24.7	29.1	126.0	145.0	138.0	142.0	142.0	133.0	174.0			
Sc	10.10	10.20	7.10	9.55	6.22	8.74	9.93	21.20	22.10	22.30	19.10	17.60	20.30	21.00			
Nb	5.78	10.60	8.72	8.97	8.05	7.34	9.14	13.80	15.60	14.80	14.10	14.20	13.50	17.50			
Ta	0.46	0.84	0.70	0.72	0.62	0.58	0.72	1.12	1.26	1.12	1.15	1.23	1.10	1.36			
Zr	317.0	148.0	210.0	61.9	95.9	89.6	89.0	99.1	94.5	103.0	38.8	40.3	49.4	37.6			
Hf	7.68	4.29	5.56	2.40	3.30	2.98	2.96	3.26	3.00	3.30	1.57	1.51	1.74	1.50			
Be	4.64	5.19	5.21	1.96	1.37	1.54	1.48	1.64	1.63	1.66	1.19	1.38	1.21	1.19			

续表 2
Continued Table 2

	片麻状黑云二长花岗岩										片麻状英云闪长岩						
	BTC-1-1	BTC-1-2	BTC-1-3	BTC-1-4	BTC-1-5	BTC-1-6	BTC-1-7	BTC-2-1	BTC-2-2	BTC-2-3	BTC-2-4	BTC-2-5	BTC-2-6	BTC-2-7			
Ga	18.5	18.6	18.3	13.5	13.1	12.7	12.0	13.2	12.2	11.9	20.5	20.6	20.6	22.0			
Ge	1.42	1.62	1.52	1.02	1.03	0.87	0.95	0.94	0.93	1.16	1.58	1.60	1.61	1.71			
U	2.34	4.00	3.12	5.92	1.95	3.87	3.44	4.03	3.23	1.84	0.89	0.91	0.94	0.90			
Th	17.70	27.00	23.50	13.60	10.90	10.20	11.40	10.40	9.41	11.40	4.63	4.48	2.93	4.15			
La	60.4	59.0	45.7	65.3	45.9	54.1	61.4	28.2	33.9	31.1	28.1	28.4	29.7	38.6			
Ce	122.0	118.0	89.9	132.0	90.0	107.0	124.0	58.6	69.1	65.2	55.9	57.2	61.2	91.8			
Pr	13.50	12.70	9.98	13.80	10.10	11.70	13.10	6.72	7.96	7.43	6.35	6.60	7.10	11.70			
Nd	46.3	44.1	35.2	47	35.3	40.8	45.5	25.9	29.8	28.9	24.8	24.9	25.8	46.7			
Sm	8.36	8.31	6.56	8.58	6.68	7.57	8.52	5.06	5.99	5.66	4.96	5.04	5.29	11.00			
Eu	1.19	1.25	0.94	1.25	0.84	1.05	1.17	1.15	1.21	1.17	1.02	0.96	1.07	2.11			
Gd	7.26	8.45	6.57	8.22	6.44	7.13	8.40	5.13	5.61	5.39	4.99	4.93	5.20	11.90			
Tb	1.09	1.24	0.97	1.18	0.91	1.05	1.20	0.74	0.79	0.77	0.75	0.69	0.74	1.79			
Dy	5.86	7.22	5.52	6.48	5.13	6.08	7.01	4.35	4.22	4.20	4.28	3.86	4.14	10.10			
Ho	1.15	1.45	1.12	1.31	1.02	1.20	1.41	0.88	0.82	0.82	0.84	0.78	0.83	1.93			
Er	3.05	4.16	3.11	3.46	2.80	3.34	3.95	2.40	2.21	2.22	2.35	2.18	2.22	5.20			
Tm	0.45	0.62	0.48	0.51	0.43	0.50	0.59	0.36	0.33	0.33	0.36	0.32	0.33	0.74			
Yb	3.08	3.92	3.08	3.22	2.76	3.32	3.92	2.32	2.15	2.16	2.31	2.12	2.16	4.52			
Lu	0.44	0.58	0.47	0.47	0.40	0.48	0.58	0.33	0.32	0.32	0.35	0.32	0.33	0.67			
Y	37.8	38.7	29.9	34.5	27.2	32.3	40.5	23.6	21.6	22.1	22.8	20.4	20.9	53.0			
ΣREE	274.13	271.00	209.60	292.78	208.71	245.32	280.75	142.14	164.41	155.67	137.36	138.30	146.11	238.76			

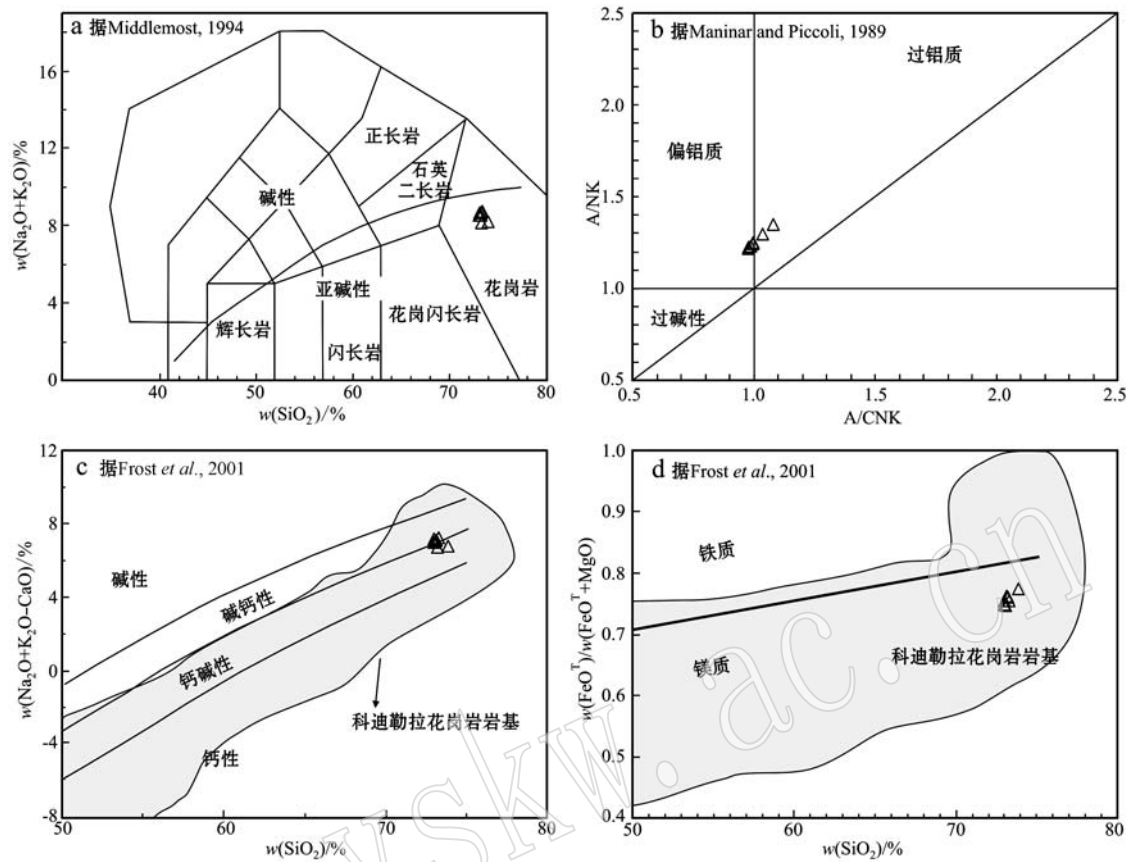


图 6 片麻状黑云二长花岗岩(BTC-1)的分类图解
Fig. 6 Classification diagrams of the gneissic granite (BTC-1)

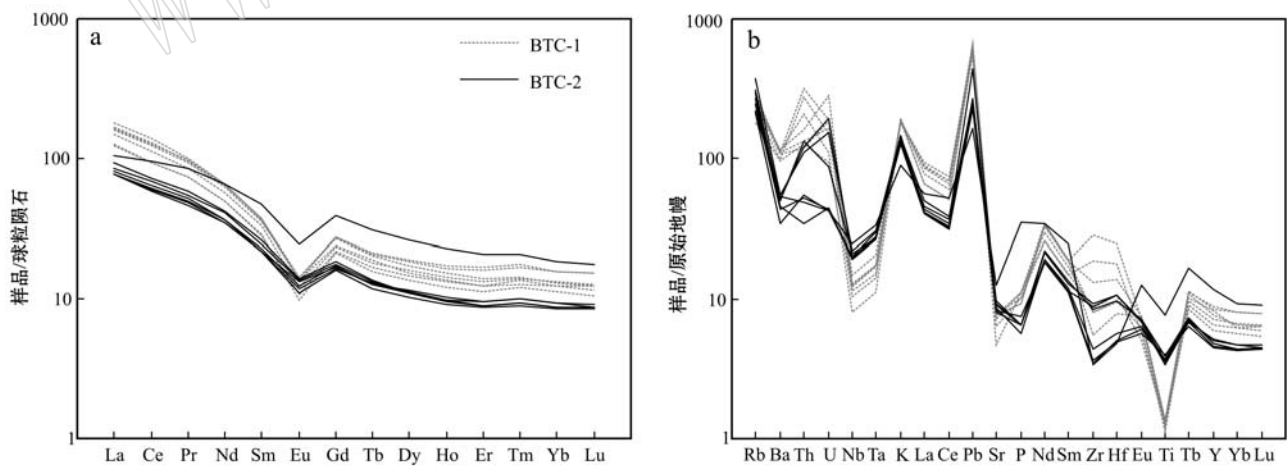


图 7 片麻状黑云二长花岗岩(BTC-1)与片麻状英云闪长岩(BTC-2)的球粒陨石标准化稀土元素图解和原始地幔标准化蜘蛛图[球粒陨石标准值引自 Taylor and McLennan (1985); 原始地幔标准值引自 Sun and McDonough (1989)]
Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element diagrams of the gneissic granite and gneissic tonalite [chondrite values after Taylor and McLennan (1985); primitive mantle values after Sun and McDonough (1989)]

K_2O 含量(图 8b,图 8c)。结合该岩石中发育次生矿物白云母,暗示少量斜长石被交代蚀变为白云母。 烧失量较大的样品 A/CNK 比值集中在 1.41 ~ 1.46,为强烈过铝质,可能与次生白云母的形成相关,

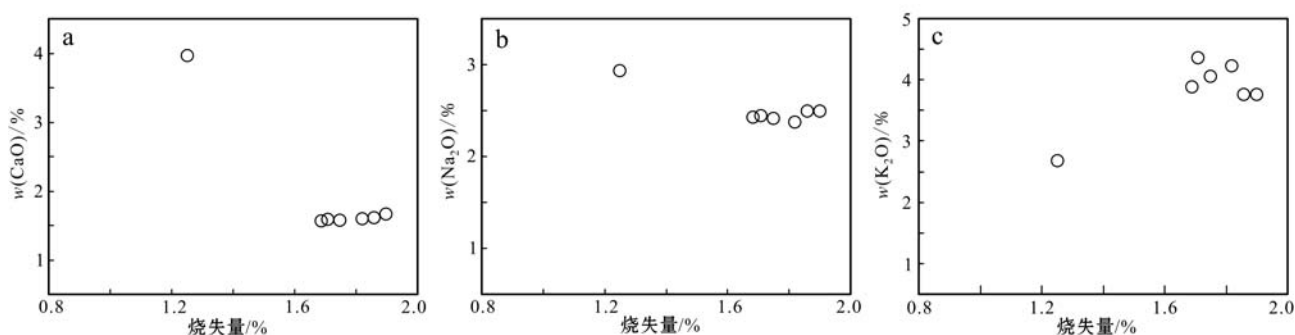


图 8 片麻状英云闪长岩(BTC-2)的部分主量元素对烧失量的协变图

Fig. 8 The covariance plots of some major elements versus LOI for gneissic tonalite (BTC-2)

而烧失量最小的样品 A/CNK 比值为 1.01, 为准铝质-弱过铝质, 可能更接近未蚀变原岩的地球化学特征。

在球粒陨石标准化的稀土分布模式图解上, 显示明显的轻稀土富集 [$(La/Yb)_N = 5.77 \sim 10.65$] 的右倾曲线型式和 Eu 的负异常 ($Eu/Eu^* = 0.56 \sim 0.68$) (图 7a); 在原始地幔标准化的微量元素蜘蛛图解上, 显示明显的 Ba、Nb、Ta、Sr、P 和 Ti 的负异常, Rb 和 Pb 的正异常 (图 7b), 与片麻状黑云二长花岗岩的分布型式一致。

4 讨论

4.1 岩石成因与源区特征

根据花岗岩源区与形成机制的不同, 其在成因上可分为 M-、I-、S-和 A 型 (Chappell and White, 1974, 2001; Collins *et al.*, 1982; Chappell, 1999; Frost *et al.*, 2001)。片麻状黑云二长花岗岩的 $Ga/Al \times 10^4$ 为 1.64~2.60, 主体上小于 A 型花岗岩, 在 $10^4 Ga/Al - Nb$ 图上都落入 M-、I-、S-型花岗岩的区域 (图 9a)。它们的 $Zr + Nb + Ce + Y$ 值为 $221 \times 10^{-6} \sim 483 \times 10^{-6}$, 在 $Zr + Nb + Ce + Y - FeO^T/MgO$ 图上也落入 M-、I-、S-型花岗岩的区域 (图 9b)。片麻状黑云二长花岗岩样品的 A/CNK 比值为 0.98~1.08, 表现为准铝质-弱过铝质的特征, 其 CIPW 标准刚玉分子数主体小于 1 (主体为 0.25~0.92, 1 个样品点为 1.49)。另外片麻状黑云二长花岗岩样品有较高的 Y 含量 ($27.2 \times 10^{-6} \sim 40.5 \times 10^{-6}$) 和 Th 含量 ($10.2 \times 10^{-6} \sim 27 \times 10^{-6}$), 且它们随着 Rb 含量的增加都显示逐渐增加的趋势 (图 9c 和图 9d), 均表现出 I 型花岗岩的趋势, 片麻状黑云二长花岗岩较

高的锆石饱和温度 ($703 \sim 850^\circ C$) 也与对它的岩石成因类型的判别一致。通常认为 I 型花岗岩为壳内变中基性火成岩部分熔融而来, 而 S 型花岗岩则来源于中上地壳变沉积岩的部分熔融 (Chappell and White, 1974; Chappell, 1999; Clemens, 2003)。本文的早泥盆世花岗岩为 I 型花岗岩, 显示准铝质-弱过铝质的特征, 结合其较高的 SiO_2 含量 ($72.5\% \sim 73.44\%$) 和较低的 MgO 含量 ($0.52\% \sim 0.71\%$), 暗示其来源于变质基性岩和角闪岩类矿物在中等地壳压力范围内的脱水熔融 (Beard and Lofgran, 1991; Rapp and Watson, 1995)。

寒武纪末的片麻状英云闪长岩具有较低的 SiO_2 含量 ($60.28\% \sim 64.01\%$)。前已述及, 样品过高的 A/CNK 值可能是由于后期交代蚀变所导致, 并不代表岩石的初始成分为强过铝质。相反, 未遭受显著蚀变、具有较低烧失量的样品的 A/CNK 比值为 1.01, 暗示母岩浆为准铝质-弱过铝质。其 $Zr + Nb + Ce + Y$ 值为 $132 \times 10^{-6} \sim 205 \times 10^{-6}$, $Ga/Al \times 10^4$ 值为 1.37~2.71, 主体上均小于 A 型花岗岩的界限值 ($Zr + Nb + Ce + Y$ 为 350×10^{-6} , $10^4 Ga/Al \times 10^4$ 为 2.6)。且其球粒陨石标准化的 REE 分布模式和原始地幔标准化的微量元素蜘蛛图与片麻状黑云二长花岗岩的较一致, 进一步暗示其应为 I 型花岗岩成因。

4.2 构造意义

阿尔泰造山带的古生代构造格局长期以来一直有较大争议, 尤其是早古生代的构造环境, 存在以下认识: 岛弧 (如 Sengör *et al.*, 1993)、被动大陆边缘 (如何国琦等, 1990)、前寒武纪微陆块 (如李会军等, 2006, 2010)。近年来随着奥陶纪-志留纪花岗岩体的陆续报道, 多认为它们形成于活动大陆边缘 (孙敏等, 2009; 王涛等, 2010; 董连慧等, 2012)。然而, 在

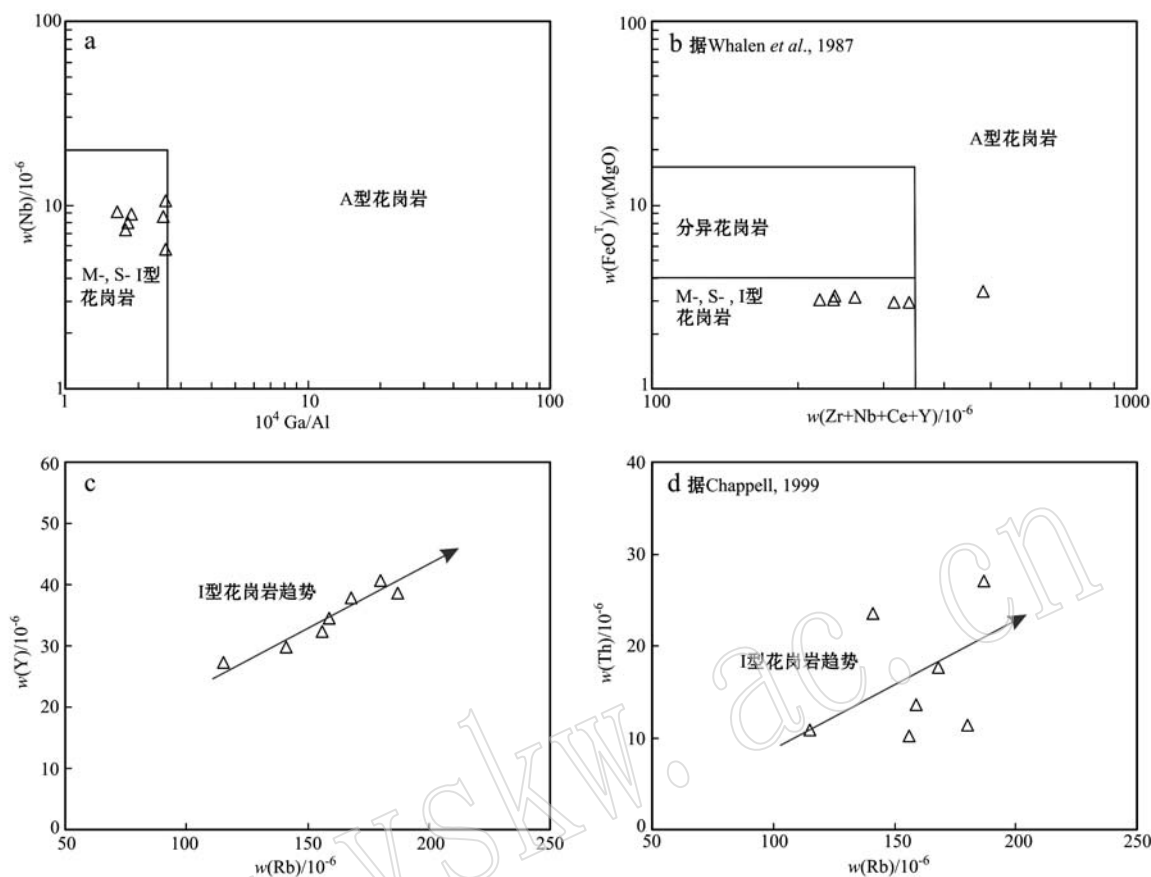


图9 片麻状黑云二长花岗岩(BTC-1)的岩石成因类型判别图解

Fig. 9 Genetic types of the gneissic granite (BTC-1)

阿尔泰造山带,早古生代中寒武纪的年代学信息多见于碎屑锆石和继承锆石年龄(如 Long *et al.*, 2010; He *et al.*, 2015),相关的岩体年代学和地球化学数据少见报道(王涛等,2010)。前人报导的数据仅在富蕴县库尔提地区有 496 ± 6 Ma 的变质花岗岩类的原岩年龄(张亚峰等,2015)。本文在青河地区敖包特花岗岩中获得了 491 ± 3 Ma 的寒武纪末片麻状英云闪长岩的年龄,且该英云闪长岩属于 I 型花岗岩。在原始地幔标准化的微量元素蜘蛛图解上,显示大离子亲石元素(如 Rb、K 和 Th)富集,高场强元素(如 Nb、Ta 和 Ti)亏损的弧花岗岩的特征(图 7b; Pearce and Peate, 1995),与张亚峰等(2015)对库尔提地区寒武纪末花岗岩的认识一致。另外 Windley 等(2002)在阿尔泰识别出 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 锆石主体年龄为 505 ± 2 Ma 的酸性岛弧岩浆岩,王涛等(2010)也认为在寒武纪-奥陶纪(500~470 Ma),阿尔泰古陆块南缘发生俯冲,形成活动陆缘环境。综上所述,认为本文的寒武纪末片麻状英云闪长岩形

成于活动大陆边缘的构造环境,暗示阿尔泰造山带南缘寒武纪末已发育北向的俯冲活动。

本文的片麻状黑云二长花岗岩获得了 407 ± 3 Ma 的年龄,为早泥盆世。早泥盆世的花岗岩在阿尔泰造山带非常发育,遍布整个阿尔泰,有几十个岩体,岩石类型主要为黑云母花岗闪长岩、二长花岗岩等,发育不同程度的片麻状构造,岩石类型以钙碱性系列为主,少量为高钾钙碱性,是阿尔泰花岗岩最主要的时期(如童英等,2007; Yuan *et al.*, 2007; 王涛等,2010; 张亚峰等,2014)。通过对本文的早泥盆世片麻状黑云二长花岗岩进行地球化学分析,其在 $\text{SiO}_2 - \text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO})$ 图解和 $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO})$ 图解上,都落入到科迪勒拉花岗岩岩基的地球化学范围(图 6c, 6d),且在原始地幔标准化的微量元素蜘蛛图解上,亦显示大离子亲石元素(如 Rb、K 和 Th)富集,高场强元素(如 Nb、Ta 和 Ti)亏损的弧花岗岩的特征(图 7b; Pearce and Peate, 1995)。另外阿舍勒、冲乎尔、克朗和麦兹等盆地中

的中酸性火山岩(如陈汉林等, 2006; Chai *et al.*, 2009; 柴凤梅等, 2009, 2012; 刘伟等, 2010), 可可托海、库卫地区的中基性侵入岩(如 Wang *et al.*, 2006; Cai *et al.*, 2012; Ye *et al.*, 2015) 及高 Mg 英安岩(He *et al.*, 2015) 等也都为早泥盆世, 对它们的研究都显示早泥盆世为俯冲相关的构造环境。龙晓平等(2008)对泥盆系康布铁堡组和阿爾泰组的浅变质碎屑沉积岩的研究也说明其沉积于活动大陆边缘的大陆岛弧相关环境。综上所述, 认为本文报道的早泥盆世花岗岩形成于俯冲相关的构造环境。

5 结论

(1) 通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 显示阿爾泰造山带青河地区敖包特花岗岩年龄为 407 ± 3 Ma, 为早泥盆世, 其中的片麻状英云闪长岩捕掳体的年龄为 491 ± 3 Ma, 为寒武纪末。

(2) 片麻状黑云二长花岗岩和片麻状英云闪长岩都属于 I 型花岗岩成因。

(3) 寒武纪末的片麻状英云闪长岩形成于俯冲环境; 早泥盆世的片麻状黑云二长花岗岩也形成于俯冲环境, 且该时期为阿爾泰岩浆最活跃的时期。

致谢 在成文过程中感谢中国地质科学院地质研究所黄河和贺振宇副研究员给予的宝贵建议。感谢审稿人提出的详细的修改意见。

References

- Beard J S and Lofgren G E. 1991. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3 and 6.9 kb[J]. *Journal of Petrology*, 32: 365~401.
- Cai Keda, Sun Min, Yuan Chao, *et al.* 2011a. Geochronology, petrogenesis and tectonic significance of peraluminous granites from the Chinese Altai, NW China[J]. *Lithos*, 127: 261~281.
- Cai Keda, Sun Min, Yuan Chao, *et al.* 2011b. Prolonged magmatism, juvenile nature and tectonic evolution of the Chinese Altai, NW China: Evidence from zircon U-Pb and Hf isotopic study of Paleozoic granitoids[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42: 949~968.
- Cai Keda, Sun Min, Yuan Chao, *et al.* 2012. Keketuohai mafic-ultramafic complex in the Chinese Altai, NW China: Petrogenesis and geodynamic significance[J]. *Chemical Geology*, 294~295: 26~41.
- Chai Fengmei, Mao Jingwen, Dong Lianhui, *et al.* 2009. Geochronology and genesis of the meta-rhyolites in the Kangbutiebao Formation from the Kelang basin at the southern margin of the Altay, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1 403~1 415(in Chinese with English abstract).
- Chai Fengmei, Mao Jingwen, Dong Lianhui, *et al.* 2009. Geochronology of metarhyolites from the Kangbutiebao Formation in the Kelang basin, Altay Mountains, Xinjiang: Implications for the tectonic evolution and metallogeny[J]. *Gondwana Research*, 16: 189~200.
- Chai Fengmei, Yang Fuquan, Liu Feng, *et al.* 2012. Geochronology and Genesis of Meta-felsic Volcanic Rocks from the Kangbutiebao Formation in Chonghuer Basin on Southern Margin of Altay, Xinjiang[J]. *Geological Review*, 58(6): 1 023~1 037(in Chinese with English abstract).
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 46: 535~551.
- Chappell B W and White A J R. 1974. Two contrasting granite types[J]. *Pacific Geology*, 8: 173~174.
- Chappell B W and White A J R. 2001. Two contrasting granite types: 25 years later[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48: 489~499.
- Chen Hanlin, Yang Shufeng, Li Zilong, *et al.* 2006. Geochemistry and tectonic setting of Early Late Paleozoic felsic volcanic rocks from the Altai Orogenic Belt, North Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 38~42(in Chinese with English abstract).
- Clemens J D. 2003. S-type granitic magmas-petrogenetic issues, models and evidence[J]. *Earth-Science Reviews*, 61: 1~18.
- Collins W J, Beams S D, White A J R, *et al.* 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80: 189~200.
- Dong Lianhui, Qu Xun, Zhao Tongyang, *et al.* 2012. Magmatic sequence of Early Palaeozoic granitic intrusions and its tectonic implications in north Altay orogen, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2 307~2 316(in Chinese with English abstract).
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, *et al.* 2001. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42: 2 033~2 048.
- He Guoqi, Han Baofu, Yue Yongjun, *et al.* 1990. Tectonic Division and Crustal Evolution of Altay Orogenic Belt in China[M]. *Geoscience of Xinjiang*, (2): 9~20(in Chinese).
- He Yulin, Sun Min, Cai Keda, *et al.* 2015. Petrogenesis of the Devonian high-Mg rock association and its tectonic implication for the Chinese Altai orogenic belt, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 61~74.

- Hu Aiqin, Jahn B M, Zhang Guoxin, *et al.* 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence. Part I. Isotopic characterization of basement rocks[J]. *Tectonophysics*, 328: 15~51.
- Li Huijun, He Guoqi, Wu Tairan, *et al.* 2006. Confirmation of Altai-Mongolia microcontinent and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1369~1379(in Chinese with English abstract).
- Li Huijun, He Guoqi, Wu Tairan, *et al.* 2010. Discovery of the Early Paleozoic post-collisional granite in Altay, China and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2445~2451(in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Xiao Wenjiao, Wang Kezhao, *et al.* 2003. Neoproterozoic-Paleozoic tectonostratigraphy, magmatic activities and tectonic evolution of eastern Xinjiang, NW China[A]. Mao J W, Goldfarb R J, Seltman R, *et al.* Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan[C]. IAGOD Guidebook Series 10: CER-CAMS/NHM London, 31~74.
- Liu Wei, Liu Lijuan, Liu Xiujin, *et al.* 2010. Age of the early Devonian Kangbutiebao Formation along the southern Altay Mountains and its northeastern extension[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 387~400(in Chinese with English abstract).
- Long Xiaoping, Yuan Chao, Sun Min, *et al.* 2008. Geochemical characteristics and sedimentary environments of Devonian low metamorphic clastic sedimentary rocks in the southern margin of the Chinese Altai, North Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24: 718~732(in Chinese with English abstract).
- Long Xiaoping, Yuan Chao, Sun Min, *et al.* 2010. Detrital zircon ages and Hf isotopes of the early Paleozoic flysch sequence in the Chinese Altai, NW China: New constraints on depositional age, provenance and tectonic evolution[J]. *Tectonophysics*, 480: 213~231.
- Ludwig K R. 2001. Users Manual for Isoplot/Ex (rev. 2.49): a geochronological toolkit for microsoft excel [A]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication[C]. No. 1a, 55.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America*, 101(5): 635~643.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37: 215~224.
- Pearce J A and Peate D W. 1995. Tectonic implications of the compositions of volcanic arc magmas[J]. *Annals Reviews Earth and Planetary Science*, 23: 251~285.
- Rapp R P and Watson E B. 1995. Dehydration of metabasalt at 8~32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 36: 891~931.
- Sengör A M C, Natal'in B A and Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 364: 299~307.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42: 313~345.
- Sun Min, Long Xiaoping, Cai Keda, *et al.* 2009. Early Paleozoic ridge subduction in the Chinese Altai: Insight from the abrupt change in zircon Hf isotopic compositions[J]. *Science China Earth Sciences*, 52(9): 1345~1358.
- Sun Min, Yuan Chao, Xiao Wenjiao, *et al.* 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of gneissic rocks from the Chinese Altai: Progressive accretionary history in the early to middle Palaeozoic[J]. *Chemical Geology*, 247: 352~383.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Blackwell, London.
- Tong Ying, Wang Tao, Hong Dawei, *et al.* 2006. Pb isotopic composition of granitoids from the Altay Orogen (China): Evidence for mantle-derived origin and continental growth[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(4): 517~528(in Chinese with English abstract).
- Tong Ying, Wang Tao, Hong Dawei, *et al.* 2007. Ages and origin of the early Devonian granites from the north part of Chinese Altai Mountains and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1933~1944(in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407~419.
- Wang Tao, Hong Dawei, Jahn B M, *et al.* 2006. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of Paleozoic syn-orogenic intrusions from the Chinese Altai: implications for subduction-accretion processes[J]. *Journal of Geology*, 114: 735~751.
- Wang Tao, Hong Dawei, Tong Ying, *et al.* 2005. Zircon U-Pb SHRIMP age and origin of post-orogenic Lamazhao granitic pluton from Altai orogen: Its implications for vertical continental growth[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 640~650(in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Jahn B M, Kovach V P, *et al.* 2009. Nd-Sr isotopic mapping of the Chinese Altai and implications for continental growth in the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 110: 359~372.
- Wang Tao, Tong Ying, Li Shan, *et al.* 2010. Spatial and temporal variations of granitoids in the Altay orogen and their implications for tectonic setting and crustal growth: perspectives from Chinese Altay[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 595~618(in Chinese with English abstract).
- Windley B F, Kröner A, Guo J H, *et al.* 2002. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai orogen, NW China: new zircon age data and tectonic evolution[J]. *The Journal of Geology*, 110: 719~739.

- Xiao Wenjiao, Windley B F, Badarch G, *et al.* 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: implications for the growth of Central Asia[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 161: 339~342.
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Yan Shenhao, *et al.* 2008. Geochronology, geochemistry and geological implications of the Mengku synorogenic plagiogranite pluton in Altay, Xinjiang[J]. *Acta Geological Sinica*, 82(4): 485~499(in Chinese with English abstract).
- Ye Xiantao, Zhang Chuanlin, Zou Haibo, *et al.* 2015. Devonian Alaskan-type ultramafic-mafic intrusions and silicic igneous rocks along the southern Altai orogen: Implications on the Phanerozoic continental growth of the Altai orogen of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 75~89.
- Yuan Chao, Sun Min, Xiao Wenjiao, *et al.* 2007. Accretionary orogenesis of the Chinese Altai: Insights from Paleozoic granitoids[J]. *Chemical Geology*, 242: 22~39.
- Zeng Qiaosong, Chen Guanghao, Wang He, *et al.* 2007. Geochemical characteristic, SHRIMP zircon U-Pb dating and tectonic implication for granitoids in Chonghuer basin, Altai, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1 921~1 932(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yafeng, Lin Xinwang, Guo Qiming, *et al.* 2014. LA-ICP-MS U-Pb geochronology and petrogenesis of Erchangfang plutons in Koktokay area of southern Altay and their geological implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(1): 13~28(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yafeng, Lin Xinwang, Wang Yu, *et al.* 2015. Discovery and geological significance of Cambrian metamorphic intrusions of Kuerti region in Southern Altay Orogenic Belt[J]. *Northwestern Geology*, 48(3): 271~279(in Chinese with English abstract).
- Zou Tianren, Cao Huizhi and Wu Baiqing. 1988. Orogenic and anorogenic granitoids of the Altay Mountains, Xinjiang and their discrimination criteria[J]. *Acta Geological Sinica*, 3: 228~245(in Chinese with English abstract).
- 董连慧, 屈 迅, 赵同阳, 等. 2012. 新疆北阿尔泰造山带早古生代花岗岩类侵入序列及其构造意义[J]. *岩石学报*, 28(8): 2 307~2 316.
- 何国琦, 韩宝福, 岳永君, 等. 1990. 中国阿尔泰造山带的构造分区和地壳演化[M]. *新疆地质科学*, (2)9~20.
- 李会军, 何国琦, 吴泰然, 等. 2006. 阿尔泰-蒙古微大陆的确定及其意义[J]. *岩石学报*, 22(5): 1 369~1 379.
- 李会军, 何国琦, 吴泰然, 等. 2010. 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*, 26(8): 2 445~2 451.
- 刘 伟, 刘丽娟, 刘秀金, 等. 2010. 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*, 26(2): 387~400.
- 龙晓平, 袁 超, 孙 敏, 等. 2008. 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*, 24(4): 718~732.
- 孙 敏, 龙晓平, 蔡克大, 等. 2009. 阿尔泰早古生代末期洋中脊俯冲: 锆石 Hf 同位素组成突变的启示[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 39(7): 935~948.
- 童 英, 王 涛, 洪大卫, 等. 2006. 中国阿尔泰造山带花岗岩 Pb 同位素组成特征: 幔源成因佐证及陆壳生长意义[J]. *地质学报*, 80(4): 517~528.
- 童 英, 王 涛, 洪大卫, 等. 2007. 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*, 23(8): 1 933~1 944.
- 王 涛, 洪大卫, 童 英, 等. 2005. 中国阿尔泰造山带后造山喇嘛昭花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄、成因及陆壳垂向生长意义[J]. *岩石学报*, 21(3): 640~650.
- 王 涛, 童 英, 李 舫, 等. 2010. 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*, 29(6): 595~618.
- 杨富全, 毛景文, 闫升好, 等. 2008. 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*, 82(4): 485~499.
- 曾乔松, 陈广浩, 王 核, 等. 2007. 阿尔泰冲乎尔盆地花岗质岩类的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义[J]. *岩石学报*, 23(8): 1 921~1 932.
- 张亚峰, 蔺新望, 郭岐明, 等. 2014. 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*, 33(1): 13~28.
- 张亚峰, 蔺新望, 王 煜, 等. 2015. 阿尔泰造山带南缘库提地区寒武纪变质侵入体的发现及地质意义[J]. *西北地质*, 48(3): 271~279.
- 邹天人, 曹惠志, 吴柏青. 1988. 新疆阿尔泰造山花岗岩和非造山花岗岩及其判别标志[J]. *地质学报*, 3: 228~245.

附中文参考文献

- 柴凤梅, 毛景文, 董连慧, 等. 2009. 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*, 25(6): 1 403~1 415.
- 柴凤梅, 杨富全, 刘 锋, 等. 2012. 阿尔泰南缘冲乎尔盆地康布铁堡组变质酸性火山岩年龄及岩石成因[J]. *地质论评*, 58(6): 1 023~1 037.
- 陈汉林, 杨树锋, 厉子龙, 等. 2006. 阿尔泰晚古生代早期长英质火山岩的地球化学特征及构造背景[J]. *地质学报*, 80(1): 38~