

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.02.008

新疆青河县阿克布拉克花岗闪长岩年代学、地球化学特征及其构造意义

王硕^{1,2}, 魏均启², 郭花利³, 李睿华^{4,5}

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 国土资源部稀土稀有稀散矿产重点实验室, 湖北 武汉 430034; 3. 中化地质矿山总局陕西地质勘查院, 陕西 西安 710065; 4. 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 5. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘 要:阿克布拉克岩体位于新疆阿尔泰造山带中段青河县大青格里河昆格依特西南, 岩性主要为花岗闪长岩。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果表明其形成于早泥盆世(397.6 ± 5.2) Ma, 为阿尔泰造山带晚古生代早期大规模岩浆活动的产物。地球化学分析结果表明, 该岩体 SiO_2 含量为 69.17%~74.70%, A/CNK 值为 0.97~1.09, 属准铝质钙碱性-高钾钙碱性系列岩石。岩体富集 K、Rb、Th、La、Ce、Nd 等元素, 相对亏损 Ba、Nb、Ta、Ti、Sr 等, 微量元素蛛网图与稀土元素配分曲线均显示为明显的右倾型, 正/负 Eu 异常均可见($\delta\text{Eu}=0.58\sim1.23$), 其中花岗闪长岩多为负 Eu 异常, 黑云母花岗闪长岩则全部为正 Eu 异常, 应为岩浆结晶分异不同阶段的结果, 与岛弧岩浆岩特征一致。结合前人研究成果, 笔者认为阿尔泰造山带南缘早泥盆世阿克布拉克岩体形成于古亚洲洋俯冲背景下的陆缘弧构造环境, 岩体中的暗色微粒包体及地球化学属性推断其为幔源性岩浆底侵加热下地壳使之熔融, 形成的混合岩浆分异演化的产物。

关键词:阿尔泰; 阿克布拉克; 花岗闪长岩; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年; 构造意义

中图分类号: P595

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2020)02-0147-16

Geochronology, Geochemistry and Tectonic Interpretation of Akebulake Plutons in Qinghe County, Northern Xinjiang

WANG Shuo^{1,2}, WEI Junqi², GUO Huali³, LI Ruihua^{4,5}

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Rare Mineral, Ministry of Land and Resources, Wuhan 430034, Hubei, China; 3. China Chemical Geology and Mine Bureau Shaanxi Geological Prospecting Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 4. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 5. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The Akebulake plutons, outcropped in Qingeli River in Qinghe County of southern margin of Altay orogenic belt, are mainly granodiorite. LA-ICP-MS zircon U-Pb indicates

收稿日期: 2019-09-18; **修回日期:** 2019-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目“西秦岭北缘李子园-太阳寺构造带变形特征与成矿作用关系研究”(41872219), 中国地质调查局区域地质调查项目“吉黑东部区域成矿规律综合研究”(1212011085485), 中国地质调查局项目“东天山昌吉-双沟山地区区域地质调查”(2019-003)联合资助

作者简介: 王硕(1984-), 讲师, 主要从事成矿作用研究工作。E-mail: iamsure1984@163.com

that the plutons were formed in the early Devonian (397.6 ± 5.2 Ma), which is a large scale magmatic event in the Altay orogenic belt in Devonian. The SiO_2 contents range from 69.17% to 74.70% and A/CNK from 0.97 to 1.09, indicating that the plutons are metaluminous, mid-high K calc-alkaline series rock. In addition, the plutons are enriched in K, Rb, Th, La, Ce and Nd, obvious negative anomaly in Ba, Nb, Ta, Ti, Sr and Eu ($\delta\text{Eu}=0.58-1.23$), which are consistent with the characteristics of granitoid rocks formed in island-arc. Based on the previous studies, this paper suggests that the Akebulake plutons were generated from the tectonic environments of continental margin arc by the subduction of the Paleo-Asian Ocean plate. Dark-coloured inclusion bodies in the rocks and the geochemical properties suggest that the plutons are the mixing and differentiation of the mantle magma melting the lower crust.

Keywords: Altay; Akebulake; granodiorite; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; tectonic interpretation

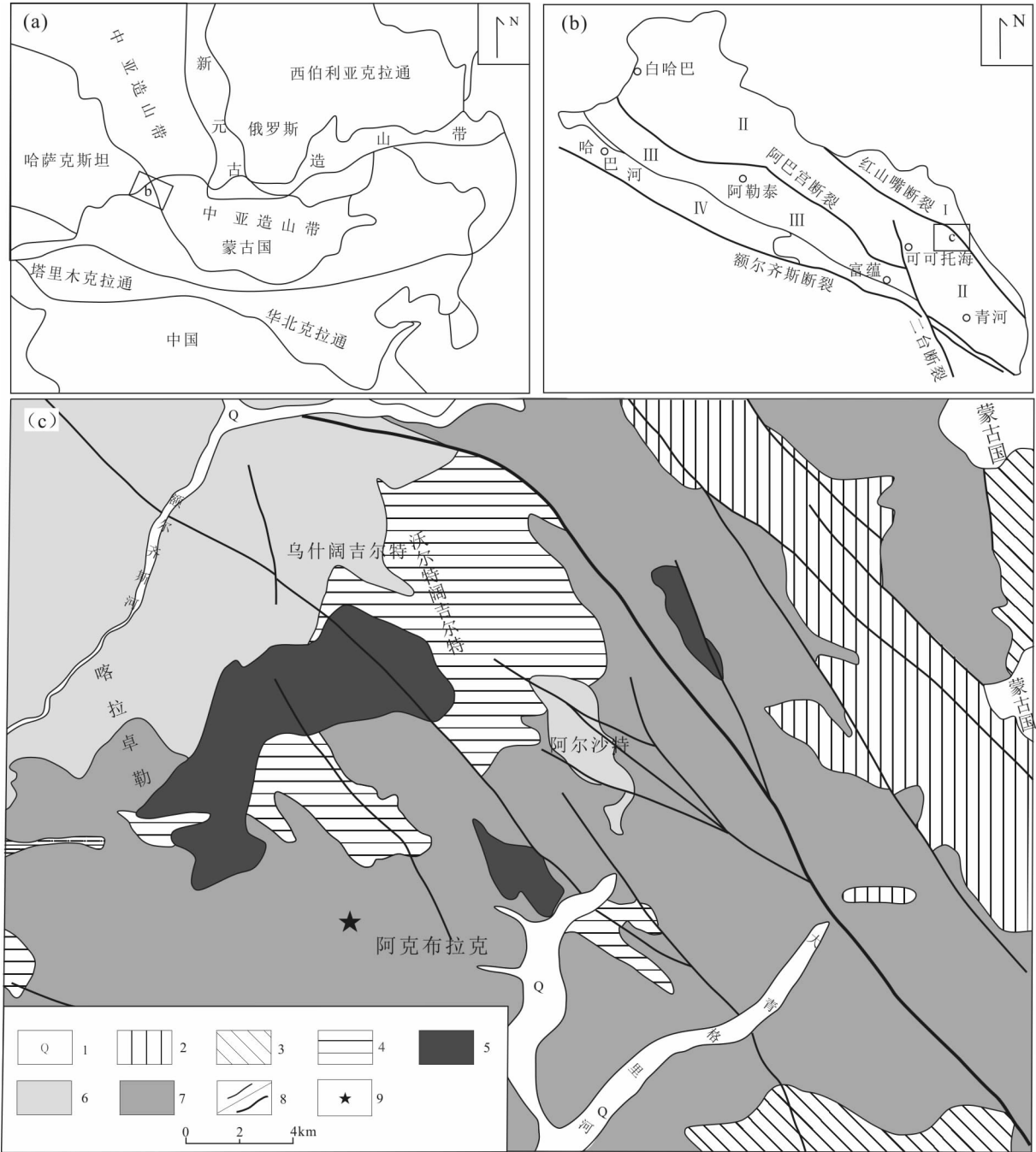
阿尔泰造山系地处中亚造山带西南,由一系列微陆块、岛弧和其间的增生杂岩带等组成,沿 NW—SE 向依次展布于哈、中、俄、蒙 4 国,是构成中亚造山带的重要地质单元(图 1a)(SENGÖR et al., 1993;XIAO et al., 2004;曹小红等,2018;裴国栋等,2018)。中国新疆北部的阿尔泰造山带属于该造山系南缘,该区发生过多期强烈的岩浆活动,活动峰期约为 460 Ma、408 Ma、375 Ma 和 265 Ma(WANG et al., 2006;曾乔松等,2007)。前人对这些岩浆活动的时间、构造背景及岩浆源区等方面进行了大量研究,结果显示其具有多类型、多成因和多物源等特征(刘伟,1990;袁峰等,2001)。其中早泥盆世(400Ma±)的岩浆活动最为强烈,分布最为广泛,对区域成矿作用也有很大贡献(朱伯鹏等,2014;郭旭吉等,2014)。目前,对于该时期的岩浆活动,前人主要得出以下认识:①与俯冲有关的岛弧或弧后盆地环境(牛贺才等,1999;WINDLEY et al., 2002;XIAO et al., 2004;万博等,2006;周刚等,2007)。②活动大陆边缘的陆弧环境(张海洋等,2004;王涛等,2010)。③活动大陆边缘的伸展环境(YUAN et al., 2007)。因此,深入开展阿尔泰造山带泥盆纪岩浆作用及其成因研究,对于确定该时期构造属性及成矿动力学均具有重要意义。

本次工作获得阿克布拉克岩体锆石 U-Pb 年龄为 397 Ma,与阿尔泰造山带广布的晚志留—早泥盆世岩浆活动时限一致(425~390 Ma,王涛等,2010)。鉴于前人对该时期岩浆活动的构造背景等问题仍存在如岛弧/弧后(牛贺才等,1999;WINDLEY et al., 2002;XIAO et al., 2004;万博等,

2006;周刚等,2007)、活动陆缘弧(张海洋等,2004;王涛等,2010)及陆缘伸展环境(YUAN et al., 2007)等争议,笔者以阿克布拉克花岗闪长岩体为研究对象,通过详细的地质特征、岩石学、岩石地球化学和锆石 U-Pb 年代学等研究,结合前人成果探讨其岩石成因、构造环境,从而为阿尔泰造山带泥盆纪构造演化提供新的信息。

1 区域地质背景

中国阿尔泰造山带位于新疆北部,大地构造位置属西伯利亚板块南缘,以额尔齐斯-玛因鄂博构造带与哈萨克斯坦-准噶尔板块北缘相邻(何国琦等,1990;尚海军等,2017)。前人根据阿尔泰造山带地质特征,以红山嘴-诺尔特断裂和阿巴宫-库尔特断裂为界将阿尔泰造山带自北向南划分为北阿尔泰、中阿尔泰和南阿尔泰 3 个块体(LI et al., 2003;XIAO et al., 2004)(图 1b)。北阿尔泰块体主体由震旦系—寒武系、晚泥盆系—早石炭系火山-沉积岩组成,并发育有加里东晚期花岗岩;中阿尔泰块体主体由震旦系—早古生界深变质岩系组成,主要地层为震旦纪—中奥陶世哈巴河群浅变质巨厚陆源复理石建造、晚奥陶世火山-磨拉石及陆源碎屑岩建造以及中—晚志留世变砂岩。前寒武纪基底发育其中(HU et al., 2000),显示出微陆块的属性(WINDLEY et al., 2002;LI et al., 2003;XIAO et al., 2004;WANG et al., 2006)。该区奥陶纪—二叠纪侵入岩发育,以泥盆纪花岗质岩石分布最为广泛;南阿尔泰块体主要由元古界片麻岩、下泥盆统康布铁



1. 第四系;2. 下石炭统红山嘴组;3. 震旦系—寒武系喀纳斯群;4. 中元古界苏普特岩群;5. 侏罗纪花岗岩;6. 三叠纪花岗岩;
7. 泥盆纪花岗岩;8. 地质界线/断层;9. 采样点;I. 北阿尔泰构造带;II. 中阿尔泰构造带;III. 南阿尔泰构造带;
IV. 额尔齐斯构造带

图 1 (a)阿尔泰造山带构造位置图(据何国琦等,1990)、(b)构造分区图(据 WINDLEY et al. ,2002)及(c)阿克布拉克岩体位置图(据陕西省地质调查院,2015 改绘)

Fig. 1 (a)Tectonic position and (b)Tectonic division and (c)simplified geological map of Aqbulake plutons of Altay orogenic belt

堡组及中泥盆统阿勒泰组变质火山-沉积岩系组成(张亚峰等,2014,2015),其次是石炭系火山-沉积岩系和中—上志留统变质岩系。南阿尔泰变质火山-沉积岩系主要分布在 NW 向 4 个斜列的火山沉积

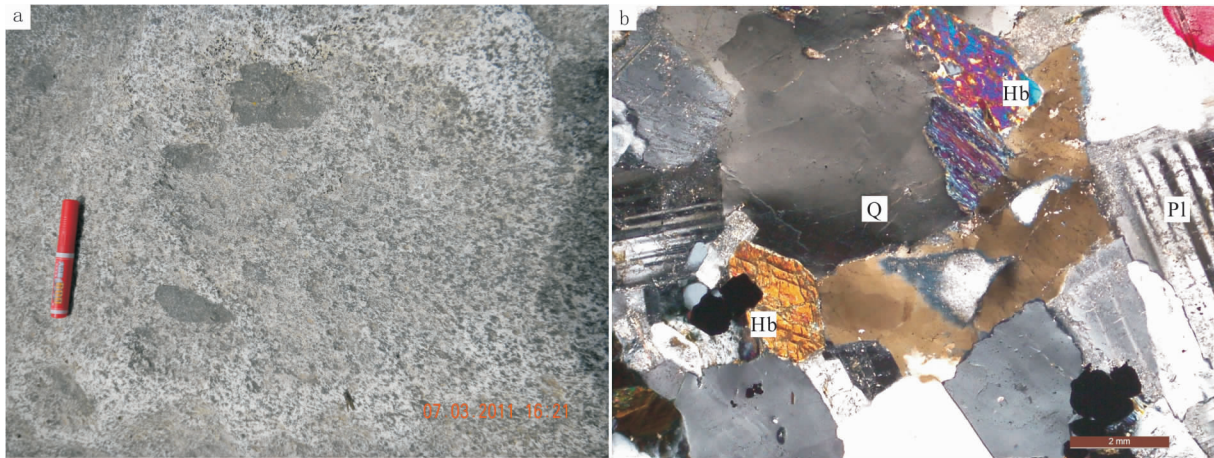
盆地中,从 NW 至 SE 依次为阿舍勒盆地、冲乎尔盆地、克兰盆地和麦兹盆地,与火山岩系有关的铁、铜、锌、铅、金矿分布在这些盆地内,其中泥盆纪康布铁堡组是重要的赋矿层位。

2 岩体地质特征

阿克布拉克岩体出露于中阿尔泰大青格里河上游阿尔沙特西南一带(图 1c),研究区地层为中元古界苏普特岩群片岩、片麻岩、混合岩和变粒岩等岩石组合,震旦系—寒武系喀纳斯群绿片岩相巨厚复理石建造和石炭系红山嘴组碎屑岩和火山岩组合。研究区花岗质岩石出露广泛,时代集中于早泥盆世,岩性为英云闪长岩和花岗闪长岩等,另有石炭纪黑云母花岗岩和黑云母二长花岗岩,三叠纪斑状黑云母二长花岗岩,以及侏罗纪细粒正长花岗岩和二云母

花岗岩在区内出露。

阿克布拉克岩体主要岩性为花岗闪长岩,北东端与阿尔沙特岩体沿红山嘴断裂相隔,至曹克列塔斯一带侵位于中元古界苏普特岩群中,南西端被石炭纪花岗岩体侵入,其余部位被第四系覆盖。岩体表现为灰色,中粒花岗结构、块状构造,其中暗色细粒包体发育,且与寄主岩石界线明显(图 2a),说明岩浆混合作用的存在。主要造岩矿物有斜长石(47%~48%),呈半自形柱状;石英(20%~21%),他形填隙粒状,粒径为 0.15~0.25 mm;角闪石(14%~15%),呈浅褐色半自形片状产出(图 2b);另有少量榍石、磷灰石等副矿物,少量斜长石呈弱绿帘石化现象。在阿克布拉克一带,岩石中黑云母含量增高,岩相转变为黑云母花岗闪长岩,粒度相对较粗,和同期塔依特岩体呈侵入接触关系。



Hb. 角闪石;Pl. 斜长石;Q. 石英

图 2 (a)阿克布拉克花岗闪长岩野外和(b)镜下照片

Fig. 2 (a)Field photographs and (b)photomicrograph of Akebulake granodiorite

3 样品分析方法

3.1 地球化学分析方法

本次研究选取阿克布拉克岩体地表不同岩性段的新鲜花岗闪长岩与黑云母花岗闪长岩进行地球化学测试,测试单位为咸阳核工业二〇三研究所分析测试中心。常量元素用常规湿法、容量法分析,其中烧失量用重量法分析,微量元素用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)分析,稀土元素用电感

耦合等离子体质谱法。常量元素的分析精度(相对标准差)一般小于 1%,微量元素和稀土元素分析精度优于 5%,所测结果列于表 1。

3.2 锆石 U-Pb 同位素分析方法

将野外采集的约 12 kg 花岗闪长岩样品送至河北省廊坊区域地质调查研究所实验室利用标准重矿物分离技术进行分选。锆石 U-Th-Pb 同位素年龄测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室的 LA-ICP-MS 仪器上进行。分析仪器为 Agilent7500a 型四极杆质谱仪和 Geolas200M 型激光

表 1 阿克布拉克岩体主量(%)、微量(10^{-6})和稀土元素(10^{-6})组成表

Tab. 1 Whole-rock major (%), trace (10^{-6}) elements and REE (10^{-6}) compositions of the Akebulake plutons

样号	Jan - 31	Jan - 35	Jan - 39	Jan - 53	Jan - 51	Feb - 51	Mar - 51
岩性	花岗闪长岩				黑云母花岗闪长岩		
SiO ₂	70.66	69.18	70.24	69.17	74.70	73.21	71.72
TiO ₂	0.47	0.52	0.49	0.52	0.37	0.32	0.41
Al ₂ O ₃	14.02	14.25	13.80	13.66	12.55	13.47	14.28
Fe ₂ O ₃	1.12	1.17	1.08	1.14	0.76	0.85	0.58
FeO	2.57	2.41	2.69	2.76	2.29	2.01	2.60
MnO	0.06	0.09	0.07	0.07	0.05	0.05	0.06
MgO	1.16	1.23	1.28	1.54	0.90	0.77	0.94
CaO	3.11	3.14	3.82	3.17	3.01	2.92	3.26
Na ₂ O	3.44	3.50	3.31	2.68	2.43	2.60	2.78
K ₂ O	1.83	2.91	1.36	3.65	1.85	2.67	2.48
P ₂ O ₅	0.09	0.12	0.09	0.10	0.08	0.05	0.10
LOI	1.28	1.33	1.56	1.32	0.92	0.97	0.63
A/CNK	1.05	0.97	0.99	0.97	1.09	1.08	1.08
A/NK	1.83	1.60	1.99	1.63	2.09	1.88	1.97
Mg [#]	36	39	38	42	35	33	35
Ce	95.4	52.7	76.0	62.8	28.9	38.6	46.6
Pr	8.86	5.28	7.11	7.20	2.84	3.95	4.69
Nd	33.3	21.6	26.7	30.1	11.6	16.0	19.2
Sm	4.42	3.75	3.53	5.63	1.94	2.52	3.16
Eu	1.18	0.96	1.25	1.08	0.95	1.01	1.16
Gd	3.92	3.73	3.31	5.64	1.90	2.43	3.20
Tb	0.45	0.52	0.34	0.81	0.27	0.30	0.44
Dy	2.33	3.19	1.78	5.06	1.61	1.66	2.69
Ho	0.46	0.63	0.35	1.02	0.32	0.30	0.51
Er	1.37	1.95	0.95	3.01	0.92	0.85	1.44
Tm	0.18	0.30	0.12	0.42	0.14	0.12	0.20
Yb	1.30	2.03	0.79	2.79	0.86	0.76	1.36
Lu	0.21	0.31	0.12	0.40	0.13	0.11	0.19
δEu	0.85	0.78	1.10	0.58	1.50	1.23	1.10
δCe	1.02	1.02	1.00	0.97	0.97	0.98	1.02
(La/Yb) _N	25.0	8.52	33.7	7.34	11.9	17.3	11.1
ΣREE	215	142	171	186	76.7	97.0	122
Cu	6.80	8.00	4.30	13.1	5.70	14.6	4.80
Zn	50.7	50.6	48.2	51.1	28.4	45.4	26.0

续表 1

样号	Jan - 31	Jan - 35	Jan - 39	Jan - 53	Jan - 51	Feb - 51	Mar - 51
岩性	花岗闪长岩				黑云母花岗闪长岩		
Co	9.00	7.90	6.90	10.0	5.30	6.90	5.00
Ni	8.80	3.80	6.50	10.4	6.20	8.60	6.60
Cr	19.1	9.60	14.1	20.1	11.9	18.0	13.2
V	46.6	37.2	34.2	45.8	35.5	33.4	33.1
Sc	4.20	5.50	4.80	9.70	8.20	4.90	6.40
Ga	20.1	18.3	18.6	18.6	15.9	17.9	16.3
Sr	262	233	221	174	153	166	166
Ti	2 820	3 120	2 940	3 120	2 220	1 920	2 460
Ba	452	477	476	474	486	392	535
U	0.90	2.60	1.50	3.00	1.30	1.30	1.30
Th	37.6	24.7	26.3	22.4	14.9	24.3	25.4
Cs	2.10	4.80	5.30	7.80	4.60	4.10	4.40
Y	13.5	19.4	9.40	29.8	9.20	8.90	14.5
Rb	67.7	116	93.9	151	115	102	107
Nb	7.10	11.4	14.0	10.3	17.3	8.70	10.8
Ta	0.60	0.80	0.50	0.90	1.10	1.10	0.60
Zr	169	149	157	146	142	179	142
Hf	0.71	1.28	0.80	1.10	0.38	0.39	0.30
K	15 185	24 147	11 285	30 287	15 351	22 155	20 579
P	443	486	383	423	386	271	243

注:测试单位为咸阳核工业二〇三研究所分析测试中心,2018。

剥蚀系统,激光器为 193 nm ArF 准分子激光器。激光剥蚀斑束直径为 20 μm,样品剥蚀深度约 20~40 μm。年龄计算采用标准锆石 91500 作为外标,元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM610 作为外标,29Si 作为内标元素进行校正。测得的同位素比值及元素含量数据处理采用 GLITTER(ver4.0, Macquarie University)程序,并用 Andersen 软件(ANDERSON,2002)对数据进行普通铅校正,年龄计算及谐和图绘制采用 ISOPLOT(2.49 版)软件(LUDWIG,2003)完成(YUAN et al.,2004)。

4 测试结果

4.1 主量元素特征

阿克布拉克岩体地球化学测试结果列于表 1,

所测样品富 Si(SiO₂ = 69.17%~74.70%) 和 Al(Al₂O₃ = 12.55%~14.28%),碱金属含量中等(K₂O+Na₂O = 4.28%~6.41%),相对富 Na(2.43%~3.50%),贫 Mg(MgO = 0.77%~1.54%)、Fe(TFeO=2.77%~3.7%)和 P(P₂O₅ = 0.05%~0.12%)。CaO 含量在 2.92~3.82,TiO₂ 含量为 0.32%~0.52%。铝饱和指数 A/CNK = 0.97~1.09,样品投影点均未越过后铝质花岗岩划分标准线(图 3a)。在 SiO₂-(K₂O+NaO)(图 3b)及 SiO₂-K₂O(图 3c)图解中,样品表现出亚碱性系列岩石中由钙碱性系列向高钾钙碱性系列变化的趋势,与样品中 K₂O 含量变化较大有关。

4.2 稀土及微量元素特征

阿克布拉克岩体稀土与微量元素含量列于表 1。其中,稀土元素元素总量变化较大(ΣREE = 76.73~214.98),轻稀土元素明显富集,重稀土元素

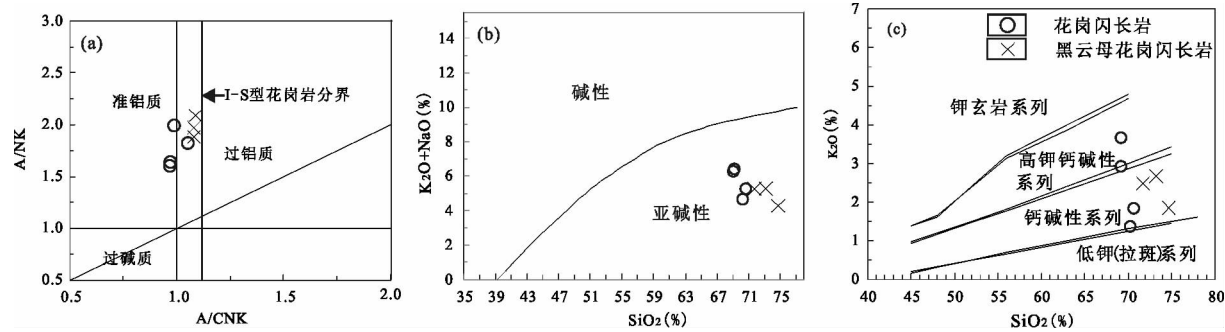


图 3 (a)阿克布拉克岩体 A/NK - A/CNK 图(据 RICKWOOD,1989)、(b)K₂O+Na₂O-SiO₂ 图(据 MIDDLEMOST, 1994)和(c)K₂O-SiO₂ (据 MANIAR et al. ,1989)图

Fig. 3 (a)A/CNK diagram, (b)K₂O+Na₂O-SiO₂ diagram and (c)K₂O-SiO₂ diagram of Akebulake plutons

相对亏损, $(La/Yb)_N = 8.52 \sim 33.7$; 轻稀土元素内部分馏较强, $(La/Sm)_N = 3.47 \sim 7.21$; 重稀土内部则较为平缓, $(Gd/Yb)_N = 1.52 \sim 3.47$ 。各稀土元素配分曲线型式一致, 具有明显右倾的特征(图 4a), 显示为同源岩浆的产物。 $\delta Eu = 0.58 \sim 1.23$, Eu 的正负异常均有出现, 负 Eu 异常多见于花岗闪长岩样品中, 正 Eu 异常则全部为黑云母花岗闪长岩样品, 可能与岩浆演化过程中斜长石的分离结晶作用有关。

由微量元素含量结合原始地幔标准化蛛网图可见(图 4b), K、Rb、Th、La、Ce、Nd 等元素相对富集, Ba、Nb、Ta、Ti、Sr 等元素相对亏损, 总体显示出左高右低的右倾型曲线展布型式。其中 Ti 与 Hf 元素含量接近原始地幔值, 高场强元素 Nb、Ta、Ti 的

亏损暗示了与俯冲作用有关的岛弧岩浆岩特征, 而 Sr、Ba 的相对亏损暗示了岩浆活动形成于非碰撞造山阶段。另外, Nb 的亏损反映了斜长石作为残留相或分离结晶相存在, 与稀土元素特征一致。

4.3 锆石 U-Pb 年龄

锆石颗粒多表现为浅粉色, 金刚光泽, 透明, 另有少量锆石颜色为浅褐黄色。锆石晶体较完整, 呈棱角状-次棱角状, 大多数晶体表面粗糙, 有麻点状蚀象, 少部分晶体表面光滑, 粒度中等, 长轴多在 $200 \sim 480 \mu m$, 少量晶体在 $80 \sim 160 \mu m$, 长短轴比为 $2:1 \sim 6:1$ 。阴极发光照片中多数锆石具有清晰的岩浆振荡环带结构(图 5)。23 颗锆石中 24 个测点的 LA-ICP-MS U-Pb 分析数据列于表 2, Th/U 值多大于 0.4, 表现出典型的岩浆锆石的特征, 与其形

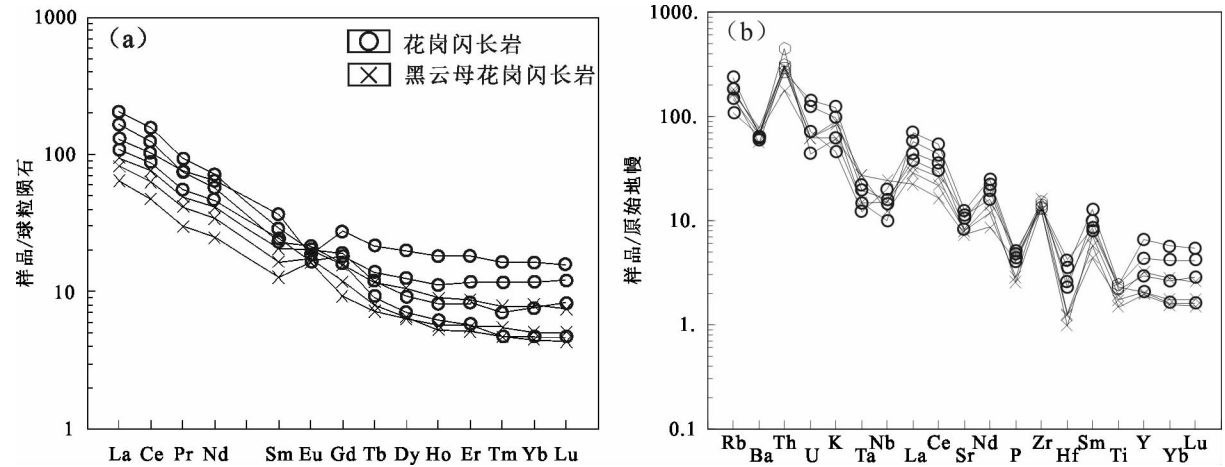


图 4 (a)阿克布拉克岩体稀土元素配分曲线图(球粒陨石标准化数据据 TAYLOR et al. ,1985)和(b)微量元素蛛网图(原始地幔标准化数据据 SUN et al. ,1989)

Fig. 4 (a)Chondrite-normalized REE patterns and (b)primitive mantle-normalized trace element spidergrams for Akebulake plutons

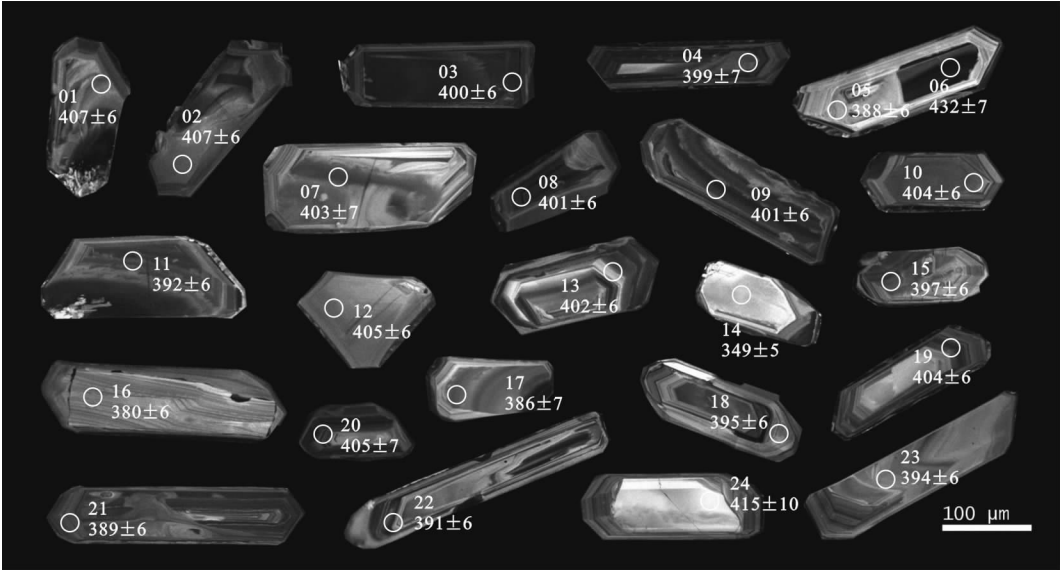


图 5 阿克布拉克花岗闪长岩锆石阴极发光图像及²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄(Ma)

Fig. 5 Zircon CL images and ²⁰⁶Pb/²³⁸U ages (Ma) of the Akebulake granodiorite

态特征相吻合(RUBATTO,2002)。

24 个结果中 22 个年龄分布范围较为集中,在误差范围内表现出一致的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb、²⁰⁶Pb/²³⁸U 和²⁰⁷Pb/²³⁵U,²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为(397.6±5.2)Ma(MSWD=0.41)(图 6),时代为早泥盆世,代表了阿克布拉克花岗闪长岩岩浆结晶年龄。另有 9 和 14 号 2 个测点²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 值明显偏高,在谐和年龄图中偏离谐和线,从 CL 中可以看出打点位置处存在裂隙,因此引起数据不和谐,将其剔除。

5 讨论

5.1 阿尔泰造山带早泥盆世构造背景

关于阿尔泰造山带内花岗岩类的形成时代,前人利用锆石的 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 法等进行大量研究。目前,已识别出到该区花岗质岩浆活动由奥陶纪一直持续到侏罗纪,其中 400 Ma±的早泥盆世岩浆活动分布范围最广,沿区域构造线在

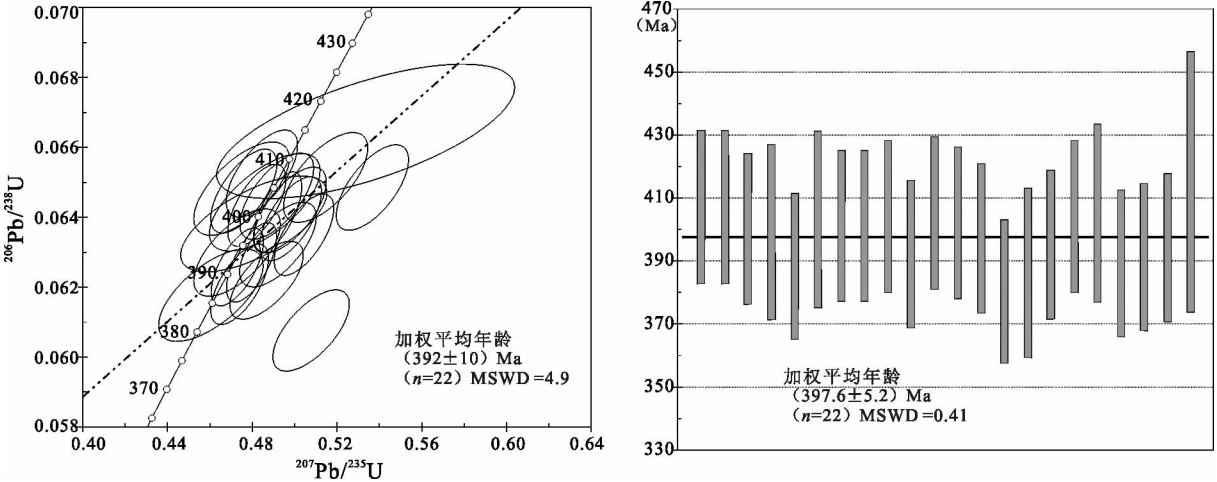


图 6 阿克布拉克花岗闪长岩中锆石 U-Pb 年龄图

Fig. 6 LA-ICP-MS zircon U-Pb diagram of the Akebulake granodiorite

表 2 阿克布拉克花岗闪长岩中锆石的 LA-ICP-MS U-Th-Pb 同位素分析结果表

Tab. 2 The isotopic analysis of LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb of the granodiorite from the Akebulake plutons

测点号	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
		比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ
D4351-1	0.53	0.057 29	0.002 41	0.514 61	0.016 25	0.065 14	0.001 05	502	91.02	421.5	10.89	406.8	6.34
D4351-2	0.32	0.053 85	0.002 14	0.484 54	0.013 76	0.065 25	0.001 02	364.6	86.8	401.2	9.41	407.5	6.18
D4351-3	0.77	0.056 46	0.002 06	0.498 03	0.011 91	0.063 96	0.000 98	469.8	79.52	410.4	8.07	399.7	5.91
D4351-4	0.59	0.058 48	0.002 69	0.517 17	0.018 85	0.064 13	0.001 08	547.9	97.46	423.3	12.62	400.7	6.55
D4351-5	0.48	0.055 37	0.002	0.474 02	0.011 13	0.062 08	0.000 94	427.1	78.49	394	7.66	388.3	5.72
D4351-6	0.63	0.056 42	0.002 42	0.539 54	0.017 6	0.069 35	0.001 13	468.3	92.96	438.1	11.61	432.2	6.79
D4351-7	0.68	0.054 69	0.002 86	0.485 88	0.021 33	0.064 43	0.001 14	400.1	112.15	402.1	14.58	402.5	6.88
D4351-8	0.35	0.055 62	0.001 85	0.491 96	0.009 29	0.064 15	0.000 94	437	72.16	406.2	6.32	400.8	5.71
D4351-9	0.58	0.056 23	0.002 21	0.497 8	0.013 95	0.064 21	0.001	460.8	85.67	410.2	9.46	401.1	6.07
D4351-10	0.44	0.055 19	0.002 21	0.491 57	0.014 23	0.064 6	0.001 01	419.6	86.62	406	9.69	403.6	6.11
D4351-11	0.41	0.055 47	0.001 88	0.479 64	0.009 66	0.062 71	0.000 93	431.1	73.69	397.8	6.63	392.1	5.61
D4351-12	0.82	0.060 03	0.002 27	0.536 68	0.013 94	0.064 85	0.001	604.5	79.76	436.2	9.21	405	6.03
D4351-13	0.42	0.054 35	0.001 95	0.482 13	0.011 17	0.064 34	0.000 96	385.3	77.8	399.5	7.65	402	5.82
D4351-14	0.40	0.056 91	0.002 17	0.436 42	0.011 6	0.055 62	0.000 85	487.5	82.75	367.7	8.2	348.9	5.19
D4351-15	0.46	0.057 61	0.002 05	0.504 39	0.011 47	0.063 5	0.000 95	514.7	76.45	414.7	7.74	396.9	5.73
D4351-16	0.58	0.060 61	0.002 42	0.507 75	0.014 74	0.060 76	0.000 95	625.5	83.95	416.9	9.93	380.2	5.77
D4351-17	0.58	0.054 07	0.002 81	0.460 44	0.020 16	0.061 77	0.001 08	373.6	112.61	384.6	14.02	386.4	6.58
D4351-18	0.62	0.056 45	0.002 3	0.492 09	0.014 8	0.063 22	0.000 99	469.5	88.47	406.3	10.07	395.2	6.02
D4351-19	0.44	0.053 31	0.002 04	0.475 95	0.012 74	0.064 75	0.000 98	341.9	84.1	395.3	8.77	404.5	5.94
D4351-20	0.51	0.053 13	0.002 53	0.474 9	0.018 41	0.064 82	0.001 09	334.5	104.39	394.6	12.67	404.8	6.58
D4351-21	0.28	0.059 04	0.002 03	0.507 87	0.010 73	0.062 38	0.000 91	568.6	73.08	417	7.23	390.1	5.54
D4351-22	0.53	0.054 8	0.001 89	0.472 9	0.010 09	0.062 58	0.000 91	404.2	74.7	393.2	6.96	391.3	5.54
D4351-23	0.84	0.054 42	0.002 44	0.472 8	0.016 69	0.062 99	0.001 02	388.6	96.92	393.1	11.5	393.8	6.18
D4351-24	0.73	0.072 85	0.004 97	0.680 58	0.041 77	0.067 74	0.001 51	1 009.7	132.51	527.1	25.24	422.6	9.12

注:测试单位为西北大学大陆动力学国家重点实验室,2018。

北、中、南阿尔泰均有出露。如北阿尔泰块体哈龙-巴利尔岩体(401 Ma)(袁峰等,2001),中阿尔泰块体的铁列克岩体(403±5)Ma(童英等,2005)、蒙库岩体(404~378 Ma)(杨富全等,2008;XU et al. , 2010)、五矿岩体(378±6)Ma(孙敏等,2009)、库尔提岩体(416±5)Ma(WANG et al. , 2006)、372 Ma(ZHANG et al. , 2003)和可可托海岩体(415~399 Ma)(WINDLEY et al. , 2002; WANG et al. , 2006; YUAN et al. , 2007)等,南阿尔泰块体的塔尔浪岩体(412~382 Ma)(YUAN et al. , 2007)、阿维

滩岩体(400±6)Ma(WANG et al. , 2006)、克兰河中游岩体(400±2.3)Ma 和(401±3.3)Ma(刘国仁等,2010)和喀腊萨依岩体(381~376 Ma)(SUN et al. , 2008)等。同时,在阿尔泰南缘也发现了大量的该时期的具有岛弧特征的火山岩(张进红等,2000;陈汉林等,2006;柴凤梅等,2009;刘伟等,2010;于淑艳等,2011;耿新霞等,2012)和基性侵入岩(WANG et al. , 2006)。本次研究对阿克布拉克花岗闪长岩进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年工作,获得的 22 个谐和点构成的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加

权平均值为 $(397.6 \pm 5.2)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.41$),属早泥盆世,与上述的阿尔泰地区广布的早泥盆世花岗岩体及火山岩时代相吻合,是阿尔泰造山带岩浆活动的高峰期的产物。

前人对阿尔泰造山带泥盆纪构造环境存在不同认识,如与俯冲有关的岛弧或弧后盆地环境(牛贺才等,1999; WINDLEY et al., 2002; XIAO et al., 2004; 万博等,2006; 周刚等,2007)、活动大陆边缘的陆弧环境(张海祥等,2004; 王涛等,2010)和活动大陆边缘的伸展环境(YUAN et al., 2007)等。但随着近年来研究的深入,越来越多的学者认同阿尔泰泥盆纪时期处于活动大陆边缘,岩浆活动与板块俯冲作用有关。造山带蛇绿岩作为古洋壳存在的重要证据,在新疆北部阿尔泰及邻区多有发育,自北向南主要为额尔齐斯-玛音鄂博蛇绿混杂岩带、扎河坝-阿尔曼太蛇绿混杂岩带和卡拉拉里蛇绿混杂岩带,其中后2条蛇绿混杂岩带出露良好,蛇绿岩组构完整,研究程度较高,形成时代已被确定为早古生代

(何国琦等,2001; 肖文交等,2006)。最新资料显示,玛音鄂博蛇绿构造混杂岩带中斜长角闪岩的锆石 U-Pb 年龄为 $(437 \pm 12)\text{Ma}$ (张越等,2012),属于早志留世,据有大洋拉斑玄武岩特征(N-MORB 型),反映了阿尔泰地区在早古生代确实存在洋壳的俯冲作用,大致从奥陶纪开始向北俯冲于阿尔泰微陆块之下(XIAO et al., 2004; WINDLEY et al., 2002; WANG et al., 2006; LI et al., 2003)。在 Rb-Yb+Ta 及 Rb-Y+Nb 图解中(图 7),阿克布拉克岩石样品均落入岛弧即洋壳俯冲背景区域中。Zr/Y 值为 4.90~20.09,平均为 12.45,与活动大陆边缘安山岩的范围相近($\text{Zr/Y}=4 \sim 12$, CONDIE, 1989),显示出活动大陆边缘弧的特征。除一个样品外,6 个样品的 La/Nb 值为 2.07~6.77,平均为 3.18,与活动陆缘区 La/Nb 比值普遍大于 2 的特征相符。可见,晚古生代初期,阿尔泰造山系仍处于洋壳俯冲背景控制之下。

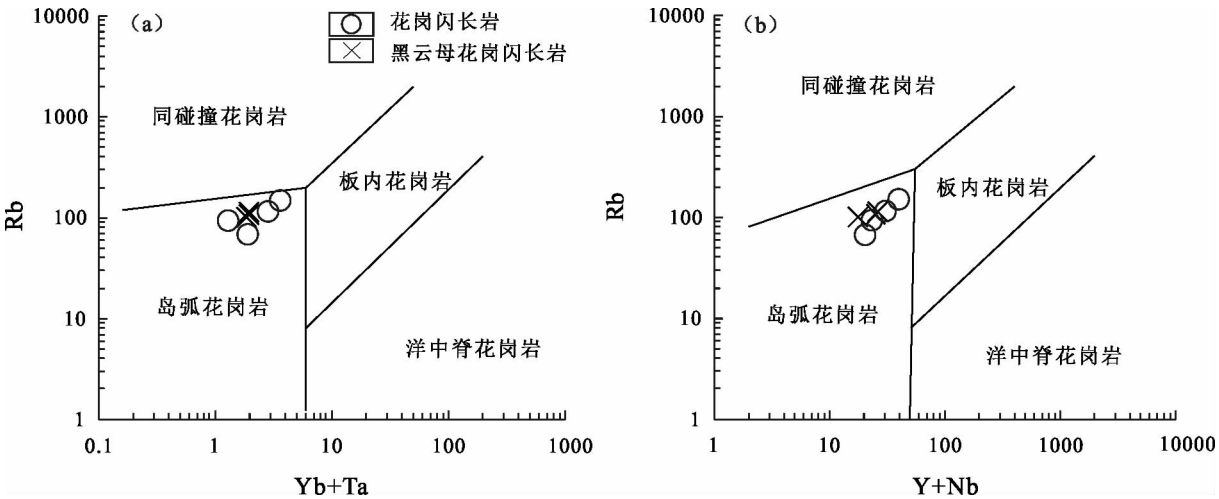


图 7 阿克布拉克岩体构造环境判别图解

Fig. 7 Diagrams of the tectonic setting for the Akebulake pluton

5.2 岩浆源区及岩石成因

岩浆源区及成因是花岗质岩石研究的重点。目前,花岗质岩石源自地壳、地幔及壳幔混源的观点均有学者支持(BARBARIN,1999),其中大多数人认同花岗岩类全都来自地壳(张旗等,2008)或是壳幔相互作用的产物(HUPPERT et al.,1988; BERGANTZ,1989)。阿克布拉克岩体侵入于元古代地层内,岩性以花岗闪长岩为主,岩体中暗色矿物为角闪

石和黑云母,副矿物组合为榍石+磷灰石+锆石,岩石地球化学特征显示为准铝质岩石特征($\text{A/CNK}=0.97 \sim 1.09$), K_2O 含量变化较大($1.36 \sim 3.65$),投影点落入高钾钙碱性-钙碱性系列岩石范围内,镁值较低($\text{Mg}^\# = 33.12 \sim 42.01$), SiO_2 与 P_2O_5 元素含量显示出较好的负相关关系,总体表现为具有壳源特点的 I 型花岗质岩石的特点。阿尔泰地区早一中泥盆世侵入岩出露范围广,在北、中、南阿尔泰地块均

有出露,广泛分布有闪长岩、花岗岩岩体,这些岩体中普遍含有暗色微粒包体,显示出岩浆混合成因的特征(王涛等,2010;张亚峰等,2014a、2014b),阿克布拉克岩体也不例外(图 2a)。此外,在阿尔泰可可托海、库卫等地还存在基性岩,表现出幔源岩浆活动的印迹(王涛等,2010;张亚峰等,2014a)。前人对二厂房早泥盆纪花岗岩岩体中的暗色闪长质包体进行了年龄测试,获得其锆石 U-Pb 年龄分别为 (398.0 ± 3.5) Ma 和 (392.2 ± 3.7) Ma(张亚峰等,2013),证明了暗色包体与寄主岩石形成时代基本一致。因此阿克布拉克岩体中发育的暗色包体及区域岩浆岩特征表明,由区内下地壳来源酸性岩浆在运移过程中

加入了幔源物质。

地球化学方面,阿克布拉克岩体稀土及微量元素曲线型势基本一致,均为明显的右倾曲线,显示出同源岩浆演化的特征。Rb/Sr 值 $(0.26 \sim 0.87)$,平均 0.58),高于上地幔值 (0.034) 与地壳值 (0.35) (TAYLOR et al.,1985),Nb/Ta 值 $(7.91 \sim 28.0)$,平均 15.31)总体低于地幔平均值 17.5 (SUN et al.,1989),具有壳幔混合的特点。岩石富集大离子亲石元素(K、Rb)并亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti),表现了俯冲带岩浆岩的地球化学属性。在 Sr/Y-Y 图解上(图 8a)阿克布拉克岩体样品投影点均落入经典岛弧岩石区内及附近,在微量元素 Nb/Th-Nb

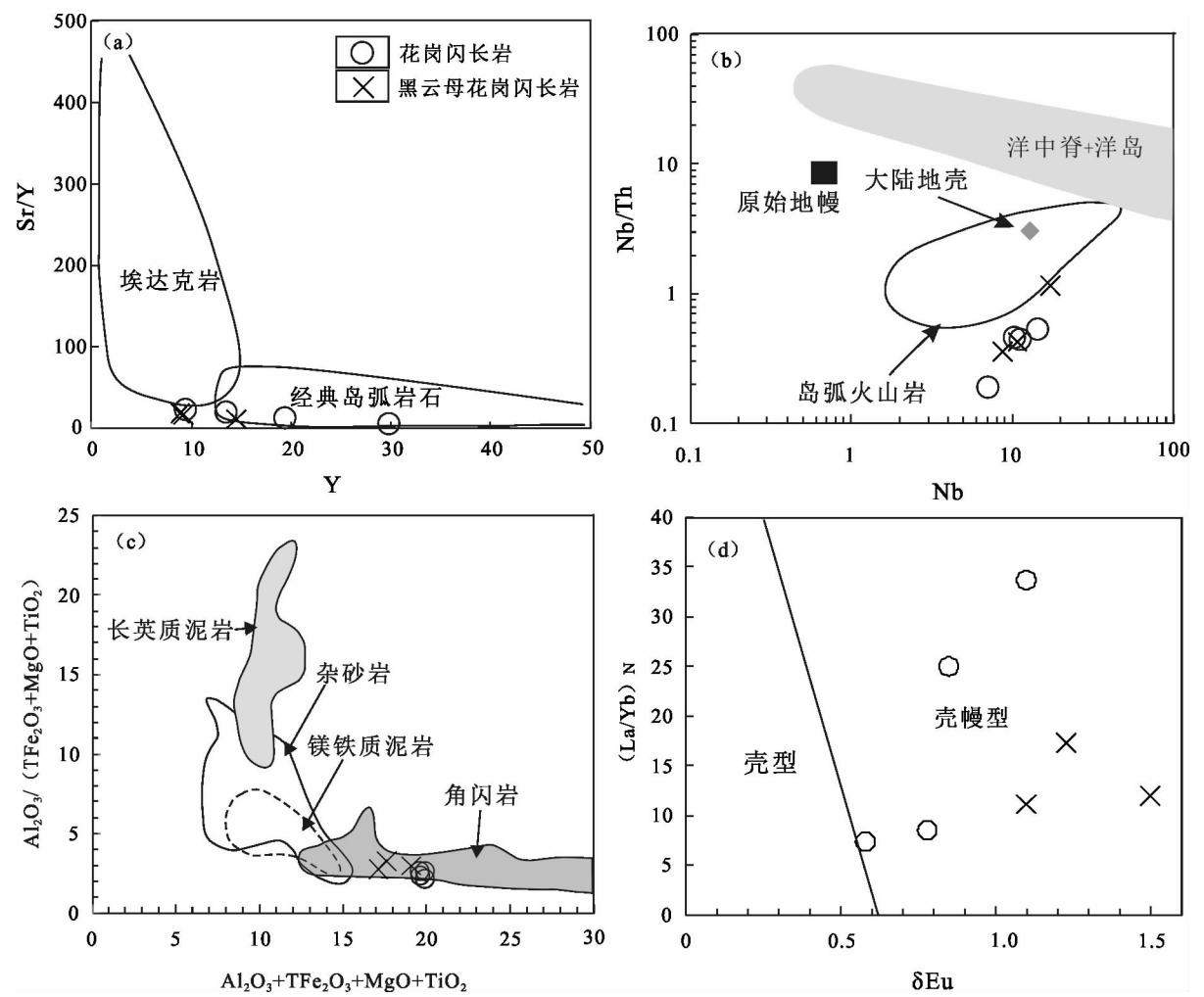


图 8 (a)阿克布拉克岩体 Sr/Y-Y 图、(b)Nb/Th-Nb 图、(c) $Al_2O_3/(TFe_2O_3+MgO+TiO_2)$ - $Al_2O_3+TFe_2O_3+MgO+TiO_2$ 图和 (d) $(La/Yb)_N-\delta Eu$ 图

Fig. 8 (a)Sr/Y-Y diagram、(b)Nb/Th-Nb diagram、(c) $Al_2O_3/(TFe_2O_3+MgO+TiO_2)$ - $Al_2O_3+TFe_2O_3+MgO+TiO_2$ diagram and (d) $(La/Yb)_N-\delta Eu$ diagram of Akebulake plutons

值图解中(图 8b)样品投影也与岛弧火山岩源区相近,显示了阿克布拉克岩体与岛弧岩浆岩的地球化学亲缘性,为活动大陆边缘弧岩浆特点。 $La-La/Yb$ 图解中显示,阿克布拉克岩体样品位于部分熔融演化线上,暗示其可能是俯冲背景下洋壳或地幔楔部分熔融的产物,然而鉴于其相对较高的 SiO_2 含量及明显的轻重稀土分馏,其成岩过程中可能存在有俯冲沉积物加入。实验岩石学证明(PATiÑO Douce,1999),地壳中砂泥质岩的部分熔融通常产生化学成分偏酸性的过铝质花岗岩类(S型),而准铝质 I 型花岗岩类则多来自下地壳玄武质岩石的部分熔融。另外,与变泥质岩与杂砂岩起源的熔体相比,由变质基性岩熔融形成的岩浆具低 $Al_2O_3/T(Fe_2O_3+MgO+TiO_2)$ 、高 $Al_2O_3+TFe_2O_3+MgO+TiO_2$ 的特征(ALTHERR et al., 2000),在源区类型判别图(图 8c)中,阿克布拉克岩体样品投影点落入角闪岩区,显示了该岩体中一部分物质来自基性下地壳,与地球化学图解得出的壳幔混源区域相符(图 8d)。前人利用 Sr-Nd 同位素资料得出新疆阿尔泰造山带早—中古生代花岗岩类的物源为老陆壳和新生幔源物质相混合的结论同样支持这一观点(童英等,2007;杨富全等,2008)。

前已述及,晚古生代初期,阿尔泰造山带仍受古亚洲洋俯冲作用的控制,随着洋壳俯冲的进行,板片俯冲角度会随之减小,导致形成的岩浆弧逐渐向大陆板块内部延伸(BUSBY,2004)。大洋板块可以俯冲到 660km 的地幔过渡带,增压导致的俯冲板片脱水致使地幔部分熔融是火山弧、弧后及板内岩浆活动的源区,随着古亚洲洋持续的向北俯冲作用,俯冲板片及其携带的沉积物发生脱水、变质,形成俯冲带流体,交代地幔发生部分熔融形成基性岩浆上涌,并底侵于下地壳,巨量热能使地壳物质熔融,形成大规模花岗岩质熔体,与幔源基性岩浆混合,形成了阿尔泰地区广布的 415~380 Ma 的中酸性侵入岩(王涛等,2010),阿克布拉克岩体即是此阶段形成的产物。

6 结论

(1)阿尔泰造山带中段阿克布拉克岩体主要由花岗闪长岩组成,另有黑云母花岗闪长岩分布在岩

体东部,属于同一岩浆系统演化的产物,形成时代为 $(397.6 \pm 5.2)Ma$ ($MSWD=0.41$),是阿尔泰造山带早泥盆世大规模岩浆活动的组成部分。

(2)阿克布拉克岩体形成于古亚洲洋北向俯冲背景下活动大陆边缘陆缘弧构造环境,该时期为古亚洲洋在阿尔泰地区俯冲的后期阶段,揭示了该时期俯冲增生的汇聚过程。

(3)阿克布拉克花岗闪长岩为准铝质 I 型花岗岩,来自基性下地壳和新生地幔的混合源区。洋壳俯冲过程中携带的大量流体导致地幔发生部分熔融形成基性岩浆底侵并加热下地壳,受热熔融的下地壳和幔源岩浆混合向地壳浅部运移,最终形成了阿克布拉克岩体。

参考文献(References):

- 陈汉林,杨树锋,厉子龙,等. 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,2006,80(1):38-42.
- CHEN Hanlin, YANG Shufeng, LI Zilong, et al. Geochemistry and tectonic setting of early Late Paleozoic felsic volcanic rocks from the Altai orogenic belt, north Xinjiang [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(1): 38-42.
- 曹小红,韩琼,赵同阳,等. 阿尔泰造山带北部喀拉加特克岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. 西北地质,2018,51(3):67-79.
- CAO Xiaohong, HAN Qiong, ZHAO Tongyang, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of Kalajiareke rock mass in northern Altay orogenic belt and its geological significance[J]. Northwest-ern Geology, 2018, 51(3): 67-79.
- 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.
- CHAI Fengmei, MAO Jingwen, DONG Lianhui, et al. 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, 2009, 25(6): 1403-1415.
- 郭旭吉,黄承科,王永强. 阿尔泰南缘克兰盆地矿化特征及找矿潜力分析[J]. 矿床地质,2014,33(增刊):681-682.

- GUO Xuji, HUANG Chengke, WANG Yongqiang. Mineralization and protential characteristics of Kelang Basin in the south Altay[J]. Mineral Deposits, 2014, 33(suppl.): 681-682.
- 耿新霞, 杨福全, 柴凤梅, 等. 新疆阿尔泰山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.
- GENG Xinxia, YANG Fuquan, CHAI Fengmei, et al. LA-ICP-MS U-Pb dating of volcanic rocks from Dadonggou ore district on southern margin of Altay in Xinjiang and its geological implications[J]. Mineral Deposits, 2012, 31(5): 1119-1131.
- 何国琦, 李茂松. 论新疆东准噶尔蛇绿岩的时代及其意义[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(6): 852-858.
- HE Guoqi, LI Maosong, JIA Jindou, et al. A Discussion on Age and Tectonic Significance of Ophiolite in Eastern Junggar, Xinjiang[J]. Acta Scientiarum Naturalium, 2001, 37(6): 852-858.
- 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-MSU-Pb 年龄及地球化学特征[J]. 地球学报, 2010, 31(4): 519-531.
- LIU Guoren, DONG Lianhui, GAO Fuping, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon dating and geochemistry of the Devonian granites from the middle Kelan river valley of Altay in Xinjiang[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010, 31(4): 519-531.
- 刘伟, 刘丽娟, 刘秀金, 等. 阿尔泰山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.
- LIU Wei, LIU Lijuan, LIU Xiujin, et al. Age of the early Devonian Kangbutiebao Formation along the southern Altay Mountains and its northeastern extension[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(2): 387-400.
- 刘伟. 中国新疆阿尔泰花岗岩的时代及成因类型特征[J]. 大地构造与成矿学, 1990, 14(1): 43-56.
- LIU Wei. Petrogenetic epochs and peculiarities of genetic types of granitoids in the Altai Mts, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1990, 4(1): 43-56.
- 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[J]. 科学通报, 1999, 44(9): 1002-1004.
- NIU Hecai, XU Jifeng, YU Xueyuan, et al. The discovery and geological significance of Mg-rich volcanics in Altay, Xinjiang[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(9): 1002-1004.
- 裴国栋, 弓小平, 马华东, 等. 阿尔泰山带喀纳斯群变质岩地球化学特征及形成环境[J]. 中国地质, 2018, 45(1): 141-154.
- PEI Guodong, GONG Xiaoping, MA Huandong, et al. Geochemical characteristic and formation environments of metamorphic rocks in the Kanas Group of Altay tectonic belt[J]. Geology in China, 2018, 45(1): 141-154.
- 尚海军, 陈维民, 张耀选, 等. 新疆阿尔泰克因布拉克铜锌矿区闪长岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 西北地质, 2017, 50(4): 59-69.
- SHANG Haijun, CHEN Weimin, ZHANG Yaoxuan, et al. Zircon U-Pb dating of diorite from the Keyinbulake Cu-Zn deposit in Altay, Xinjiang and its geological implications[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(4): 59-69.
- 孙敏, 龙晓平, 蔡克大, 等. 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, 2009, 39(7): 935-948.
- SUN Min, LONG Xiaoping, CAI Keda, et al. Early Paleozoic ridge subduction in the Chinese Altai: Insight from the abrupt change in zircon Hf isotopic compositions[J]. Science China, 2009, 39(7): 935-948.
- 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.
- TONG Ying, WANG Tao, HONG Dawei, et al. Ages and origin of the early Devonian granites from the north part of Chinese Altai Mountains and its tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(8): 1933-1944.
- 童英, 王涛, 洪大卫, 等. 阿尔泰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.
- TONG Ying, WANG Tao, HONG Dawei, et al. Zircon U-Pb age of syn-orogenic Tielieke pluton in the western part of Altay Orogenic Belt and its structural implications[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2005, 26(Suppl.): 74-77.

- 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探讨[J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 145-152.
- WAN Bo, ZHANG Lianchang. Sr-Nd-Pb isotope geochemistry and tectonic setting of Devonian polymetallic metallogenic belt on the Southern of Altaid, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(1): 145-152.
- 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.
- WANG Tao, TONG Ying, LI Can, et al. 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, 2010, 29(6): 595-618.
- 肖文交, Windley BF, 闫全人, 等. 北疆地区阿尔曼太蛇绿岩锆石 SHRIMP 年龄及其大地构造意义[J]. 地质学报, 2006, 80(1): 32-37.
- XIAO Wenjiao, WINDLEY BF, YAN Quanren, et al. SHRIMP zircon age of the Aermantai ophiolite in the north Xinjiang area, China and its tectonic implications[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(1): 32-37.
- 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.
- YUAN Feng, ZHOU Taofa, YUE Shucang. The ages and the genetic types of the granites in the Nurtarea, Altay[J]. Xinjiang Geology, 2001, 19(4): 292-296.
- 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.
- YANG Fuquan, MAO Jingwen, YAN Shenghao, et al. Geochronology, geochemistry and geological implications of the Mengku synorogenic plagiogranite pluton in Altay, Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(4): 485-499.
- 于淑艳,许英霞,郭正林,等. 新疆苏普特背斜花岗岩和变安山质凝灰岩 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年代学特征及意义[J]. 西北地质, 2011, 44(2): 15-24.
- YU Shuyan, XU Yingxia, GUO Zhenglin, et al. LA - ICP - MS Zircon U - Pb Dating for Granite and Meta-Andesitic Tuff and Its Geological Significance[J]. Northwestern Geology, 2011, 44(2): 15-24.
- 曾乔松,陈广浩,王核,等. 阿尔泰冲乎尔盆地花岗质岩类的锆石 SHRIMP - Pb 定年及其构造意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(8): 1921-1932.
- ZENG Qiaosong, CHEN Guanghao, WANG He, et al. Geochemical characteristic, SHRIMP zircon U - Pb dating and tectonic implication for granitoids in Chonghuer basin, Altai, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(8): 1921-1932.
- 朱伯鹏,秦纪华,何斌. 新疆阿尔泰南缘萨吾斯铅锌矿地球化学、地球物理特征及潜力分析[J]. 地质论评, 2017, 63(增刊): 240-243.
- ZHU Bopeng, QIN Jihua, HE Bin. Geochemical, geophysical characteristics and potential analysis of the Sawusi Pb - Zn deposit in the southern Altay mountains, Xinjiang[J]. Geological Review, 2017, 63 (Suppl.): 240-243.
- 周刚,张招崇,罗世宾,等. 新疆阿尔泰山南缘玛因鄂博高温型强过铝花岗岩: 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(8): 1909-1920.
- ZHOU Gang, ZHANG Zhaochong, LUO Shibin, et al. Confirmation of high temperature strongly peraluminous Mayin' ebo granites in the south margin of Altay, Xinjiang: age, geochemistry and tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(8): 1909-1920.
- 张海洋,牛贺才, Hiroaki Sato, 等. 新疆北部晚古生代埃达克岩、富铌玄武岩组合: 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.
- ZHANG Haiyang, NIU Hecai, HIROAKI S, et al. Late Paleozoic Adakite and Nb-enriched basalt from Northern Xinjiang: Evidence for the Southward Subduction of the Paleo-Asian Ocean[J]. Geological Journal of China Universities, 2004, 10(1): 106-113.
- 张亚峰, 蔺新望, 王星, 等. 阿尔泰造山带南缘昆格依特岩体 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, 2014a, 28(1): 16-28.
- ZHANG Yafeng, LIN Xinwang, WANG Xing, et al. LA - ICP - MS U - Pb geochronology, petrogenesis and its geological implications of Kungeyite plutons in southern Altay orogenic belt[J]. Geoscience, 2014a, 28(1): 16-28.
- 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, 2014b, 33(1): 13-28.
- ZHANG Yafeng, LIN Xinwang, GUO Qiming, et al. 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, 2014b, 33(1): 13-29.
- 张亚峰, 蔺新望, 郭岐明, 等. 阿尔泰山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.
- ZHANG Yafeng, LIN Xinwang, GUO Qiming, et al. LA - ICP - MS zircon U - Pb dating and geochemistry of Aral granitic plutons in Koktokay area in the southern Altay margin and their source significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(2): 339-354.
- 张旗, 王焰, 潘国强, 等. 花岗岩源岩问题: 关于花岗岩研究的思考之四[J]. 岩石学报, 2008, 24(6): 1193-1204.
- ZHANG Qi, WANG Yan, PAN Guoqiang, et al. Sources of granites: some crucial questions on granite study (4) [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(6): 1193-1204.
- 张进红, 王京彬, 丁汝福. 阿尔泰造山带康布铁堡组变质火山岩锆石特征和铀-铅年龄[J]. 中国区域地质, 2000, 19(3): 281-287.
- ZHANG Hongjin, WANG Jingbin, DING Rufu. Characteristics and U - Pb ages of zircon in metavolcanics from the Kangbutiebao Formation in the Altay orogeny, Xinjiang[J]. Regional Geology of China, 2000, 19(3): 281-287.
- 张越, 徐学义, 陈隽璐, 等. 阿尔泰山地区玛音鄂博蛇绿岩的地质特征及其 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年龄[J]. 地质通报, 2012, 31(6): 834-842.
- ZHANG Yue, XU Xueyi, CHEN Juanlu, et al. 2012. Geological characteristics and LA - ICP - MS zircon U - Pb age of Mayinebo ophiolite in Altay orogenic belt. Geological Bulletin of China, 2012, 31(6): 834-842
- ALTHERR R, HOLL A, HEGNER E, et al. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany)[J]. Lithos, 2000, 50: 51-73.
- ANDERSON T. Correction of common Pb in U - Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1-2): 59-79.
- BUSBY C. Continental growth at convergent margins facing large ocean basins: a case study from Mesozoic convergent-margin basins of Baja California, Mexico [J]. Tectonophysics, 2004, 392(1/4): 241-277.
- BERGANTZ, G. W. Underplating and partial melting: Implications for melt generation and extraction[J]. Science, 1989, 245(4922): 11093-1095.
- BARBARIN, B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. Lithos, 1999, 46(3): 605-626.
- CONDIE K C. Plate tectonics and crustal evolution [M]. Oxford: Pergamon Press, 1989, 1-476.
- HU A Q, HAHN B M, ZHANG G X, et al. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence, Part I. Isotopic characteristics of basement rocks [J]. Tectonophysics, 2000, 328: 15-51.
- HUPPER, H. E., SPARKS, R. S. J. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust [M]. Journal of Petrology, 1988, 29(3): 599-624.
- LUDWIG K R. Isoplot/Ex version 2.49. A geochronological toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 1a, 2003, 1-56.
- LI J Y, XIAO W J, WANG K Z, et al. Neoproterozoic Paleozoic tectonostratigraphic framework of Eastern Xinjiang, NW China [A]. Mao J W, Goldfarb S, Seltnann et al. Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan [C]. London: IACOD, CERAMS, Natural History Museum, 2003, 31-74.
- MIDDLEMOST E A. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. Earth Sci. Rev, 1994, 37: 215-224.
- MANIAR P D and PICCOLI P M. Tectonic discrimination in of granitoids [J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 1: 635-643.
- PATINO DOUCE, A E. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? In: Castro A, Fernandez C, Vigneresse J L (Eds.), Understanding granites: integrating new and classical techniques [J]. Geological

- Society of London Special Publication, 1999, 168: 55-75.
- 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.
- RICKWOOD P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides for major and minor element [J]. Lithos, 1989, 22 : 246-263.
- SUN MIN, YUAN Chao, XIAO WenJiao, et al. 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, 2008, 247: 352-383.
- SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[A]. Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins[C]. London: Geological Society of London, Special Publication, 1989, 42: 313-345.
- SENGOR 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.
- TAYLOR S R, MCLENANN S M. The continental crust: its composition and evolution[M]. Blackwell: Oxford Press, 1985, 1-312.
- WANG T, HONG D W, JAHN B, 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.
- WINDLEY B F, KRNER A, GUO J H, et al. Neoproterozoic to palaeozoic geology of the Altai orogen, NW China: new zircon age data and tectonic evolution[J]. The Journal of Geology, 2002, 110 : 719-737.
- XIAO Wenjiao, WINDLEY B F, BADARCH G, et al. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: implications for the growth of Central Asia [J]. Journal of the Geological Society, 2004, 161: 339-342 .
- XU Lingang, MAO Jingwen, YANG Fuquan, et al. Geology, geochemistry and age constraints on the Mengku skarn iron deposit in Xinjiang Altai, NW China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2010, 39 (5): 423-440.
- 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.
- YUAN H L, GAO S, LIU X M, LI H M, GUNTHER D and WU F Y. 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.
- ZHANG Haixiang, NIU Hecai, TERADAK, et al. Zircon SHRIMP U - Pb dating on plagiogranite from Kuerti ophiolite in Altay, north Xinjiang[J]. China Sci. Bull, 2003, 48(12) : 1350-1354.