

阿尔泰山南缘乌吐布拉克铁矿区 花岗质岩石年代学及成因

张志欣¹⁾, 杨富全¹⁾, 柴凤梅²⁾, 刘锋¹⁾, 耿新霞¹⁾, 吕书君³⁾, 姜丽萍²⁾, 钟天智⁴⁾

- 1) 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开放实验室, 北京, 100037;
- 2) 新疆大学地质与勘查工程学院, 乌鲁木齐, 830046;
- 3) 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京, 100083; 4) 新疆富蕴县金山矿冶公司, 新疆富蕴, 836100

内容提要: 本文对新疆阿尔泰山南缘乌吐布拉克铁矿区斜长花岗岩和黑云母斜长花岗岩进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定, 分别获得了 385.6 ± 2.3 Ma (MSDW=0.13) 和 387.7 ± 2.1 Ma (MSDW=0.23) 的谐和年龄, 两者为中泥盆世早期同源岩浆侵入体。乌吐布拉克铁矿的形成与岩浆侵入活动密切相关, 据此限定铁矿成矿时代略晚于 388~386 Ma, 为中泥盆世早期成矿。乌吐布拉克斜长花岗岩与黑云母斜长花岗岩均具有高硅 ($\text{SiO}_2 = 66.01\% \sim 79.14\%$)、富钠贫钾 ($\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$) 的特点。A/CNK $\{A/CNK = n(\text{Al}_2\text{O}_3) / [n(\text{CaO}) + n(\text{Na}_2\text{O}) + n(\text{K}_2\text{O})]\}$ 值均小于 1.1, 表明两者为准铝质低钾花岗岩。微量元素表现为富集 Th、Ta、Hf 等高场强元素, 亏损 Rb、Ba、K、Sr、P 大离子亲石元素。稀土元素表现为轻稀土相对富集, 轻重稀土元素分馏明显 $[(\text{La}/\text{Yb})_N = 2.46 \sim 7.24]$, 具有中等或强的 Eu 负异常。结合区域地质资料, 认为乌吐布拉克矿区花岗岩形成于与板块俯冲有关的活动大陆边缘的陆缘弧环境中。

关键词: 花岗岩; 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄; 地球化学; 乌吐布拉克; 阿尔泰山; 新疆

阿尔泰山造山带位于新疆北部, 中蒙俄哈交界地区, 是中亚造山带的重要组成部分, 是古生代不同时期增生—碰撞事件和晚期阿尔卑斯—喜马拉雅期变形叠加改造的结果 (Zonenshain et al., 1990; Berzin and Dobretsov, 1994; Berzin et al., 1994; Sengor et al., 1996; Windley et al., 2002; Yakubchuk et al., 2003; Xiao et al., 2004, 2009 李锦轶等, 2004)。阿尔泰山造山带内花岗质岩石广泛分布, 前人对其形成时代、岩石成因、形成环境以及成矿作用等方面进行了大量的研究, 认为区内花岗岩具有多时代、多类型、多成因、多来源, 形成于多种构造环境的特征 (赵振华等, 1993; 王中刚等, 1998; 袁峰等, 2001; 王登红等, 2002; 王涛等, 2005; Wang et al., 2006; Yuan et al., 2007; 周刚等, 2007a, b; 杨富全等, 2008; Sun et al., 2008; 冯京和张招崇, 2009; 刘锋等, 2009, 2010; 柴凤梅等, 2010), 这些成果为阿尔泰山造山带的构造演化及成矿作用研究奠定了基础。

乌吐布拉克矿床位于阿勒泰市南东约 75 km

处, 经详查估算铁矿石资源量 2098.2 万吨[●], 矿床规模为中型, 目前由金山矿冶公司开采。铁矿体呈似层状、透镜状赋存于上志留统一下泥盆统康布铁堡组变质火山—沉积岩系中, 矿体及其周围发育大量的矽卡岩矿物, 与蒙库铁矿床特征较为相似, 已有的研究表明以蒙库铁矿为代表的该类型铁矿形成与岩浆侵入活动有关 (杨富全等, 2007; 徐林刚等, 2007)。由于该铁矿为近年来新发现, 研究程度较低, 其成矿时代、成矿环境及成因类型等问题尚不明确。本文对乌吐布拉克铁矿区的斜长花岗岩和黑云母斜长花岗岩进行岩石学、岩石地球化学及锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年研究, 探讨花岗岩的类型及成因、构造环境及动力学机制问题, 以期限定矿床形成时代和成矿环境, 同时为阿尔泰山南缘晚古生代构造—岩浆热事件及成矿作用提供新的依据。

1 区域地质背景

新疆阿尔泰山造山带位于西伯利亚板块和哈萨克

注: 本文为“十一五”国家科技支撑计划重点项目 (编号 2006BAB07B02-01)、国土资源大调查项目 (编号 1212010786006) 和国家自然科学基金资助项目 (编号 40672065) 的成果。

收稿日期: 2010-08-15; 改回日期: 2011-01-15; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 张志欣, 男, 1984 年生。硕士研究生。矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: ddzhangzhixin@163.com。通讯作者: 杨富全, 电话: 010-68999075; Email: fuquanyang@163.com。

斯坦—准噶尔板块的结合部位(图 1),是哈萨克斯坦阿尔泰的东延部分,长约 500 km,NW 向与哈萨克斯坦的矿区阿尔泰(南部)和俄罗斯的山区阿尔泰(北部)相连,SE 向与蒙古的戈壁阿尔泰相接,SW 向以额尔齐斯断裂为界与准噶尔相隔。带内主体构造格架呈北西—南东向,主要断裂有额尔齐斯断裂、玛尔卡库里断裂、克兹加尔断裂、冲乎尔断裂、阿巴宫—库尔提断裂、巴塞断裂及卡拉先格格尔断裂等。

前人将阿尔泰造山带划分为北阿尔泰、中阿尔泰、南阿尔泰三个地体(Li et al., 2003; Xiao et al., 2004; Zhu et al., 2006)。阿尔泰造山带南缘位于南阿尔泰块体(Li et al., 2003),北以阿巴宫断裂为界,南以克兹加尔断裂为界与额尔齐斯构造带相邻。主要由上志留统一下泥盆统康布铁堡组和中—上泥盆统阿勒泰镇组变质火山—沉积岩系组成,其次是

石炭纪火山—沉积岩系。带内花岗岩分布广泛,主要以早泥盆世花岗岩为主(如琼库尔岩体,399 ± 4Ma,童英等,2007;蒙库岩体,400 ± 6Ma,杨富全等,2008;萨尔布拉克岩体,410 ± 4Ma,刘锋等,2010),岩性为片麻状斜长花岗岩、片麻状花岗岩、片麻状花岗闪长岩及片麻状英云闪长岩等;其次是晚石炭世(如阿舍勒岩体,318 ± 6Ma, Yuan et al., 2007)、二叠纪(如喇嘛昭岩体,276 ± 9Ma,王涛等,2005);少数岩体时代为三叠纪(如将军山岩体,245 Ma,王中刚等,1998)和侏罗纪(如尚可兰岩体,181 ~ 177 Ma,王登红等,2002)。

2 岩体地质概况及岩石学

乌吐布拉克铁矿床位于阿尔泰山南缘成矿带东段的麦兹火山沉积盆地中。麦兹盆地出露地层主要

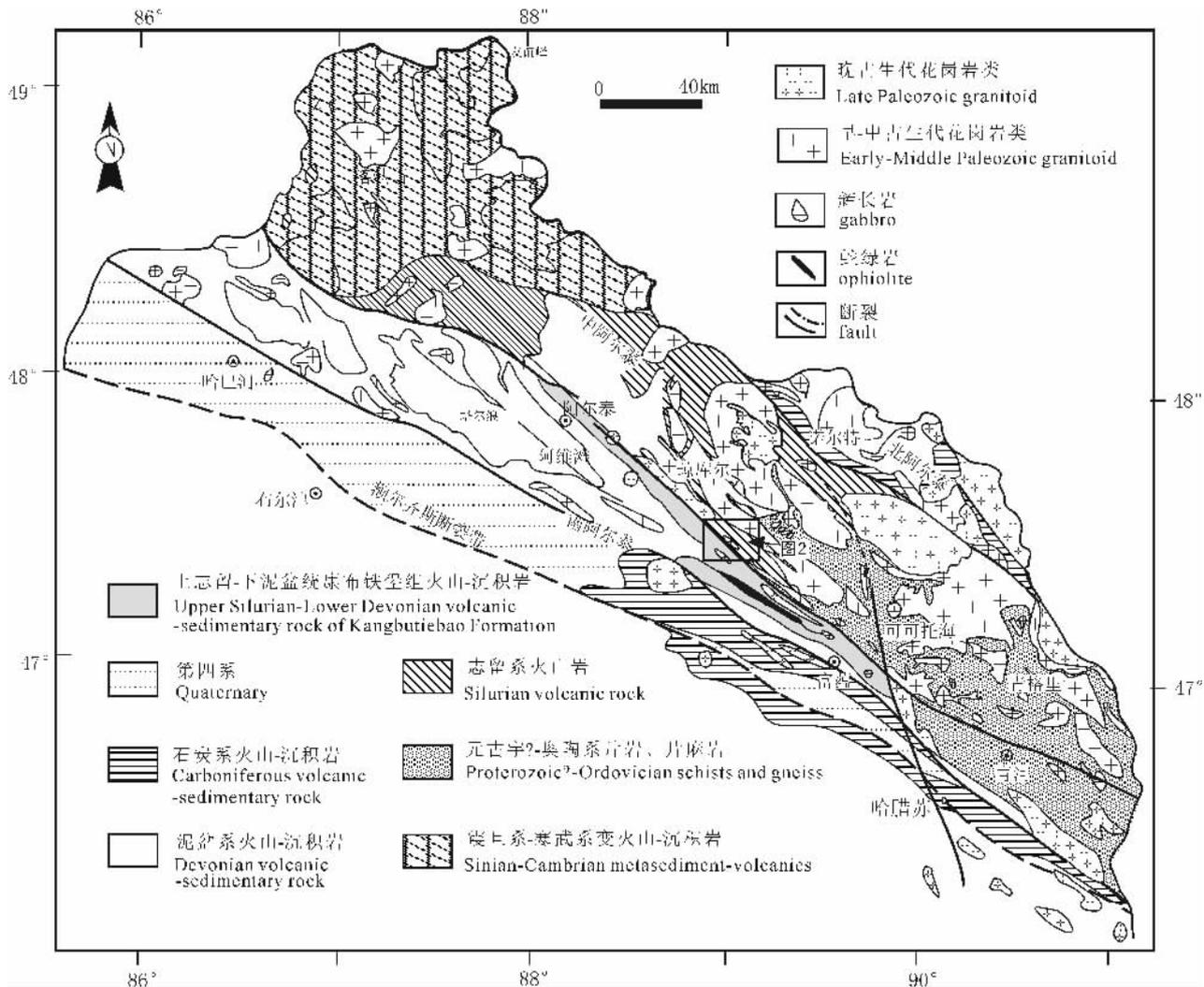


图 1 阿尔泰造山带区域地质图(据 Wang et al., 2006;童英等,2007 修改)

Fig. 1 Regional geological map of the Altay orogenic belt(modified from Wang et al., 2006; Tong et al., 2007)

为上志留统库鲁姆提群、上志留统一下泥盆统康布铁堡组和中—上泥盆统阿勒泰镇组。其中库鲁姆提群为一套中深变质浅海—滨海相碎屑沉积建造,主要由黑云母片麻岩、石英黑云母片岩、黑云石英片岩夹斜长角闪岩组成。康布铁堡组主要由中等变质海相火山熔岩、火山碎屑岩,夹陆源碎屑岩和碳酸盐岩组成。阿勒泰镇组为一套中浅变质浅海相复理石建造,主要由变质含砾砂岩、钙质砂岩、变凝灰质砂岩

和大理岩组成。

麦兹盆地内侵入岩发育,从基性到酸性岩均有出露,以酸性—中酸性侵入岩为主。酸性侵入岩主要沿北西向构造线分布,多呈岩基、岩株状、脉状。岩性主要为似斑状黑云母花岗岩、黑云母花岗岩、斜长花岗岩,少数角闪斜长花岗岩、二云母花岗岩、白云母花岗岩、斜长角闪岩、辉长苏长岩及辉长辉绿岩。蒙库北部琼库尔片麻状似斑状黑云母花岗岩呈

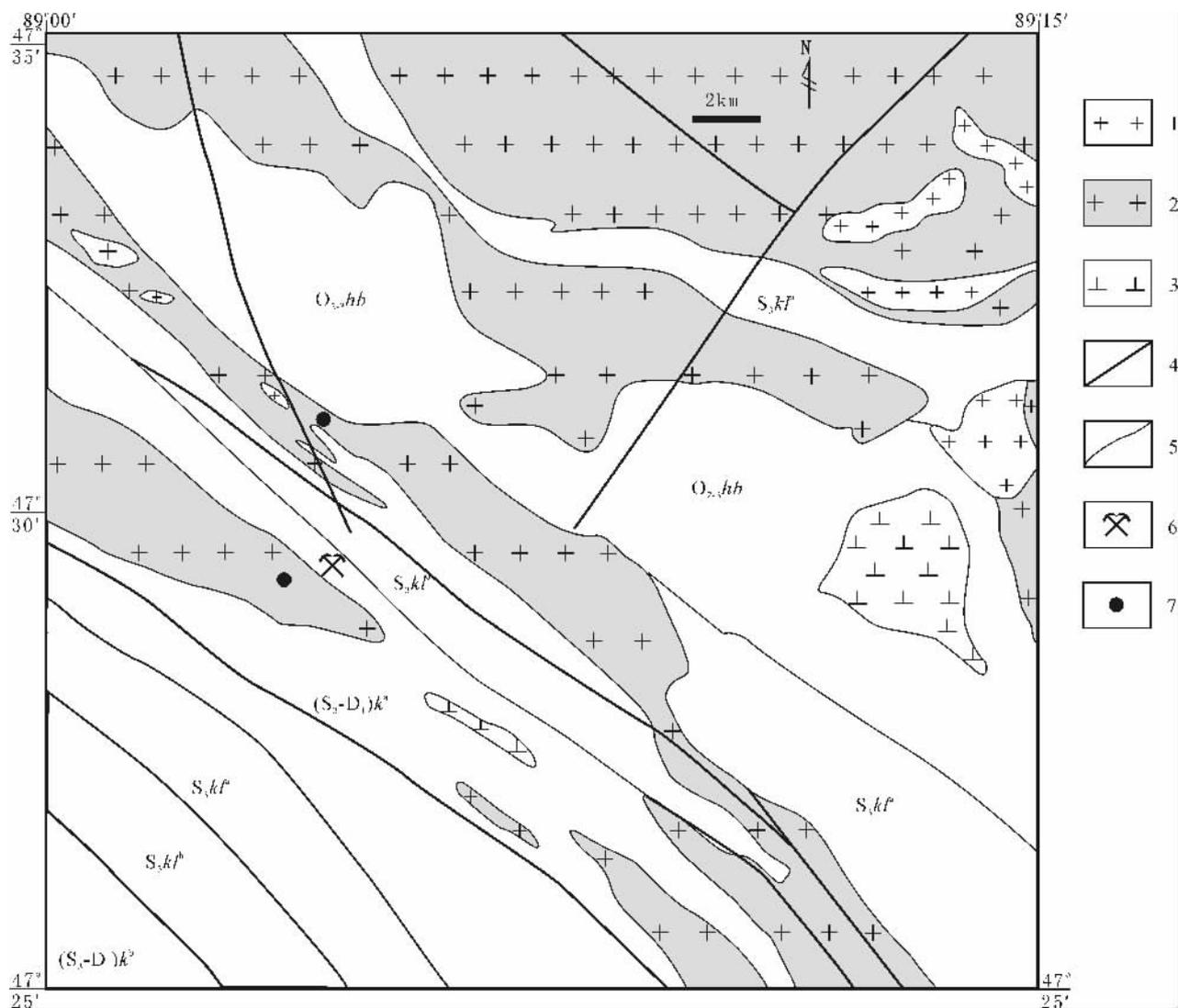


图2 乌吐布拉克一带地质简图[据阿勒泰幅1:20万地质图(新疆维吾尔自治区地质矿产局^①)编绘]

Fig. 2 The geological sketch map of the Wutubulake area [modified from Geological Map of Altay (1:200000) (Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region^①)]

上志留统一下泥盆统康布铁堡组: $(S_3 - D_1)k^b$ —上亚组, $(S_3 - D_1)k^a$ —下亚组; 上志留统库鲁姆提群: S_3kl^b —上亚群, S_3kl^a —下亚群; $O_{2-3}hb$ —中—上奥陶统哈巴河群; 1—细粒黑云母花岗岩; 2—花岗岩; 3—斜长角闪岩, 辉长辉绿岩; 4—断层; 5—地质界线; 6—乌吐布拉克铁矿床位置; 7—采样位置

Upper Silurian—Lower Devonian Kangbutiebao Formation: $(S_3 - D_1)k^b$ —Upper Subformation, $(S_3 - D_1)k^a$ —Lower Subformation; Upper Silurian Kulumuti Group: S_3kl^b —Upper Subgroup, S_3kl^a —Lower Subgroup; $O_{2-3}hb$ —Middle—Upper Ordovician Habahe Group; 1—fine grain biotite granite; 2—granite; 3—plagioclase amphibolite and gabbro—diabase; 4—fault; 5—geological boundary; 6—location of the Wutubulake iron deposit; 7—location of samples

岩基状,出露面积约 450 km²,其锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 399±4Ma(童英等,2007);蒙库矿区片麻状斜长花岗岩岩体呈岩株状产出,出露面积约 10km²,其锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 400±6Ma(杨富全等,2008)。

乌吐布拉克铁矿目前已圈定 Fe1、Fe2、Fe3、Fe4 四个主要铁矿体及多个盲矿体,赋矿层位为上志留统一下泥盆统康布铁堡组下亚组第二岩性段。矿体呈似层状、透镜状及不规则状顺层产出,常见膨大收缩、分枝复合、尖灭等现象。矿石类型为石榴子石磁铁矿矿石、钙铁辉石磁铁矿矿石及块状磁铁矿矿石,局部为磁铁矿—赤铁矿矿石。

乌吐布拉克岩体分布于矿区南北两侧(图 2)。矿区南部岩体呈纺锤状岩株产出,出露于蒙克木背斜的轴部,侵入背斜南东转折端康布铁堡组下亚组层位转折虚脱部位。岩性为斜长花岗岩,具花岗结

构,似片麻状构造,主要矿物成分为斜长石(70%~75%)、石英(20%~25%)、黑云母(3%)、钾长石(2%)(图 3a)。斜长石主要呈半自形板状结构,粒径为 1.2~2.5 mm,聚片双晶发育,个别颗粒聚片双晶发生塑性变形呈 S 形弯曲(图 3b);石英呈它形粒状分布于长石之间,粒径为 1.2 mm±,粒内波状消光;黑云母呈褐色,叶片状,多色性吸收性明显,局部见有绿泥石化现象;钾长石呈它形粒状分布,粒径 0.3~0.5 mm,个别发育卡斯巴双晶;副矿物为锆石、磷灰石、榍石等。北部岩体呈岩基产出,与库鲁木提群黑云母石英片岩—混合岩呈侵入接触关系,岩体中片岩残留体较多,接触界线大体平行片理。岩性为黑云母斜长花岗岩,鳞片粒状变晶结构,片麻状构造,主要矿物成分为斜长石(50%~55%)、石英(25%~30%)、黑云母(10%)、碱性长石(5%)(图 3c)。斜长石主要呈半自形粒状结构,粒径为 1.2~

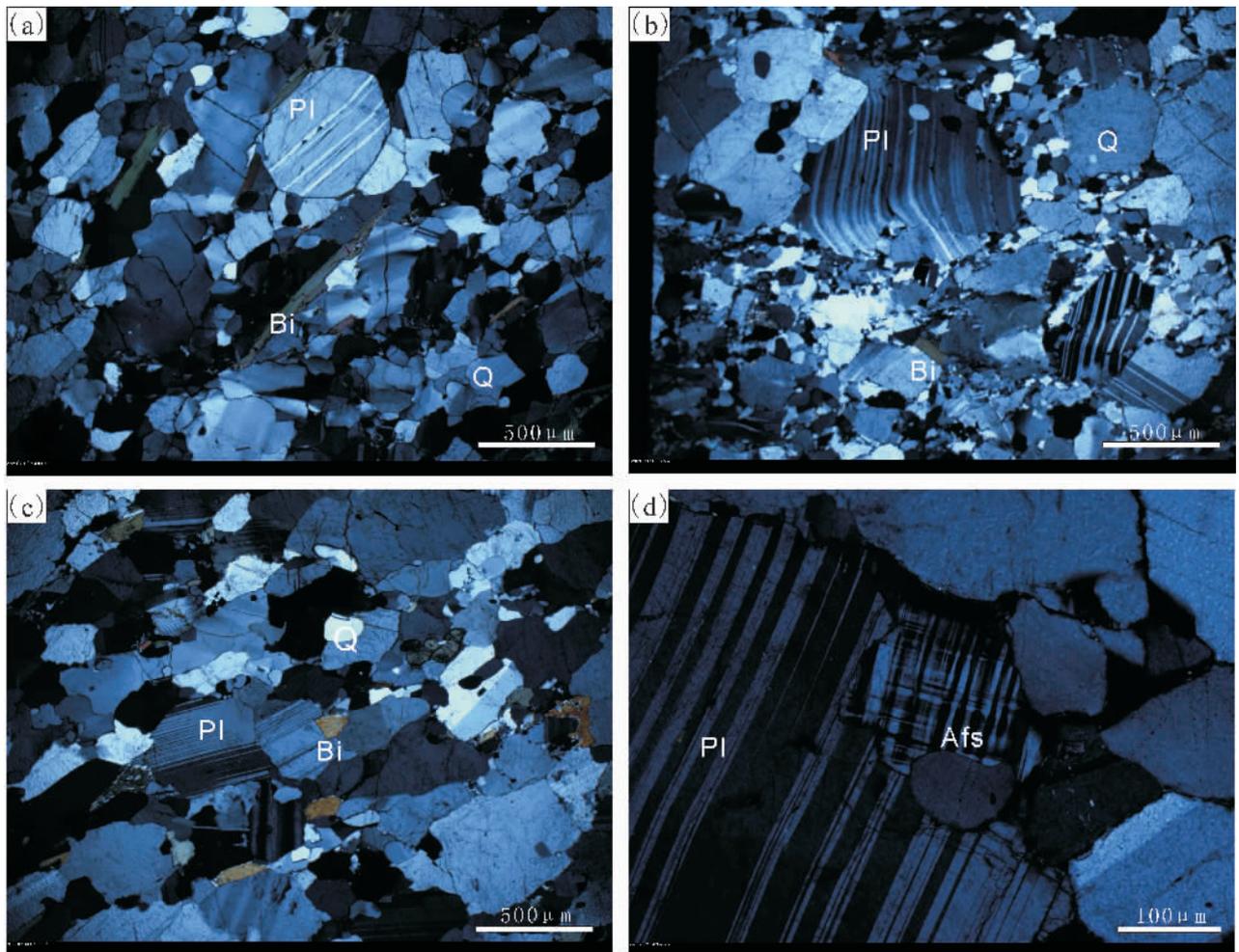


图 3 乌吐布拉克矿区花岗岩显微结构照片(具体说明见正文)

Fig. 3 Microstructure photographs of granite from the Wutubulake district
(geological significance of each figure is seen in text)

2.3 mm, 聚片双晶发育, 部分发生弯曲; 石英呈它形粒状分布于长石之间, 粒径为 0.75~1.2 mm, 粒内波状消光; 黑云母呈褐色, 叶片状, 片径为 0.7~1.2 mm, 多色性吸收性明显, 长轴定向排列; 碱性长石呈自形板状结构, 粒径 0.5~0.8 mm, 发育格子双晶(图 3d); 副矿物为锆石、磷灰石、榍石、磁铁矿等。

3 样品及分析方法

本次用于测年样品分别采自乌吐布拉克铁矿南北两个岩体 WT93(N47°29'32", E89°03'35") 和 WT96(N47°30'05", E89°04'04")。13 件新鲜未蚀变样品采自矿体附近不同位置。

锆石样品靶的制作和锆石阴极发光照像在北京离子探针中心完成。锆石 U-Pb 测年在中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室完成, 所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。锆石测年激光剥蚀所用斑束直径为 25 μm , 频率为 10 Hz, 能量密度约为 2.5 J/cm², 以 He 为载气。信号较小

的 ²⁰⁷Pb、²⁰⁶Pb、²⁰⁴Pb(+²⁰⁴Hg) 和 ²⁰²Hg 用离子计数器接收, ²⁰⁸Pb、²³²Th、²³⁸U 信号用法拉第杯接收, 实现了所有目标同位素信号的同时接收, 且不同质量数的峰基本上都是平坦的, 进而可以获得高精度的数据, 均匀锆石颗粒 $n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$ 、 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 、 $n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$ 的测试精度(2 σ)均为 2% 左右, 对锆石标准的定年精度和准确度在 1%(2 σ) 左右。LA-MC-ICP-MS 激光剥蚀采用单点剥蚀的方式, 数据分析前用锆石 GJ-1 进行调试仪器, 使之达到最优状态, 锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标, U、Th 含量以锆石 M127(U 923 $\times 10^{-6}$ 、Th 439 $\times 10^{-6}$ 、Th/U 0.475, Nasdala et al., 2008) 为外标进行校正。在测试过程中每测定 10 个样品点后, 前后重复测定 3 个锆石标样(2 个 GJ-1 和 1 个 Plesovice) 进行校正, 观察仪器的状态以保证测试精度。数据处理采用 ICPMADDataCa 4.3 程序(Liu et al., 2008), 测试过程中绝大多数分析点 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb}) > 1000$, 未进行普通铅校正, ²⁰⁴Pb 由离子计数器检测, ²⁰⁴Pb 含量异常高的分析点可能受包体等

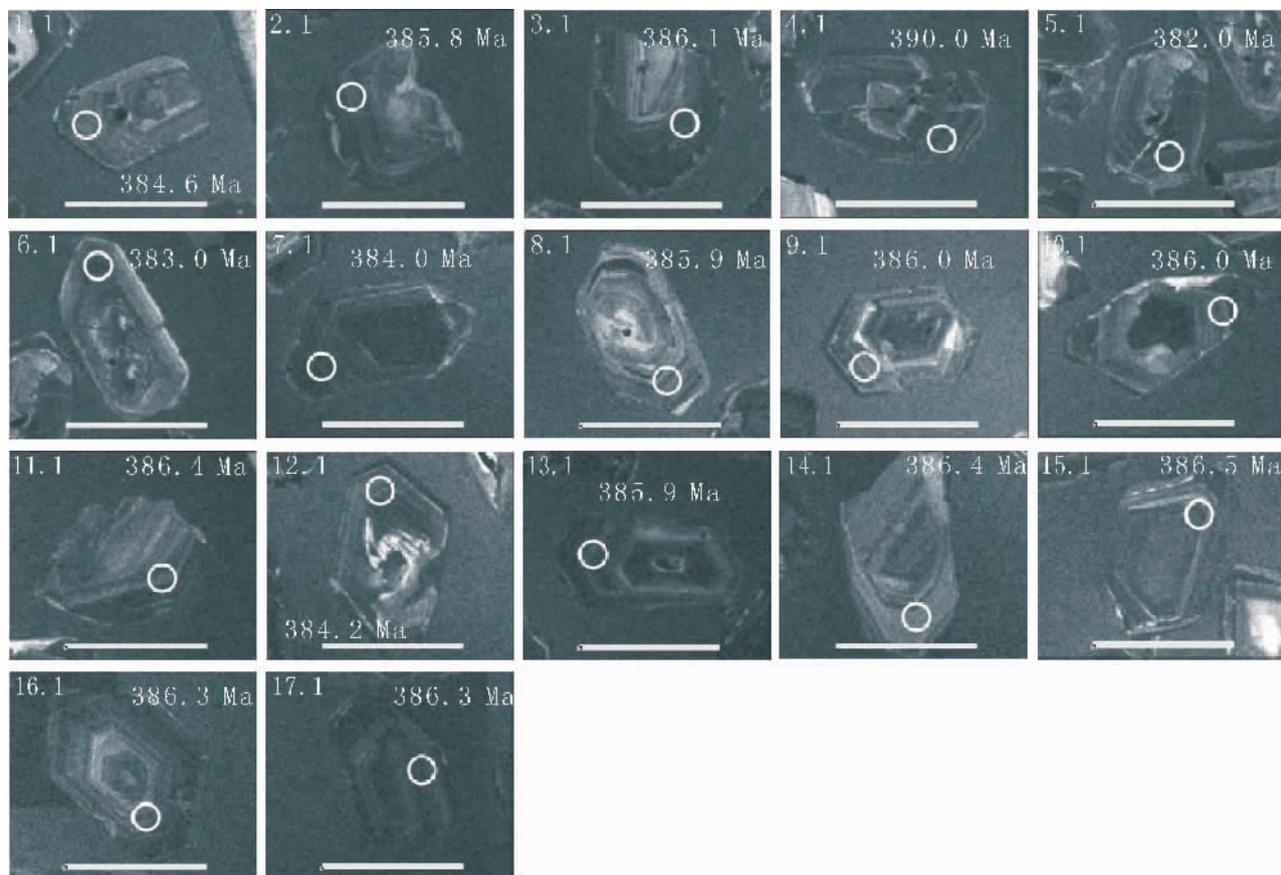


图 4 乌吐布拉克矿区斜长花岗岩中代表性锆石的阴极发光图(图中比例尺为 100 μm)

Fig. 4 Cathode light images of the representative zircons from the plagiogranite in Wutubulake district (Scale in figure is 100 μm)

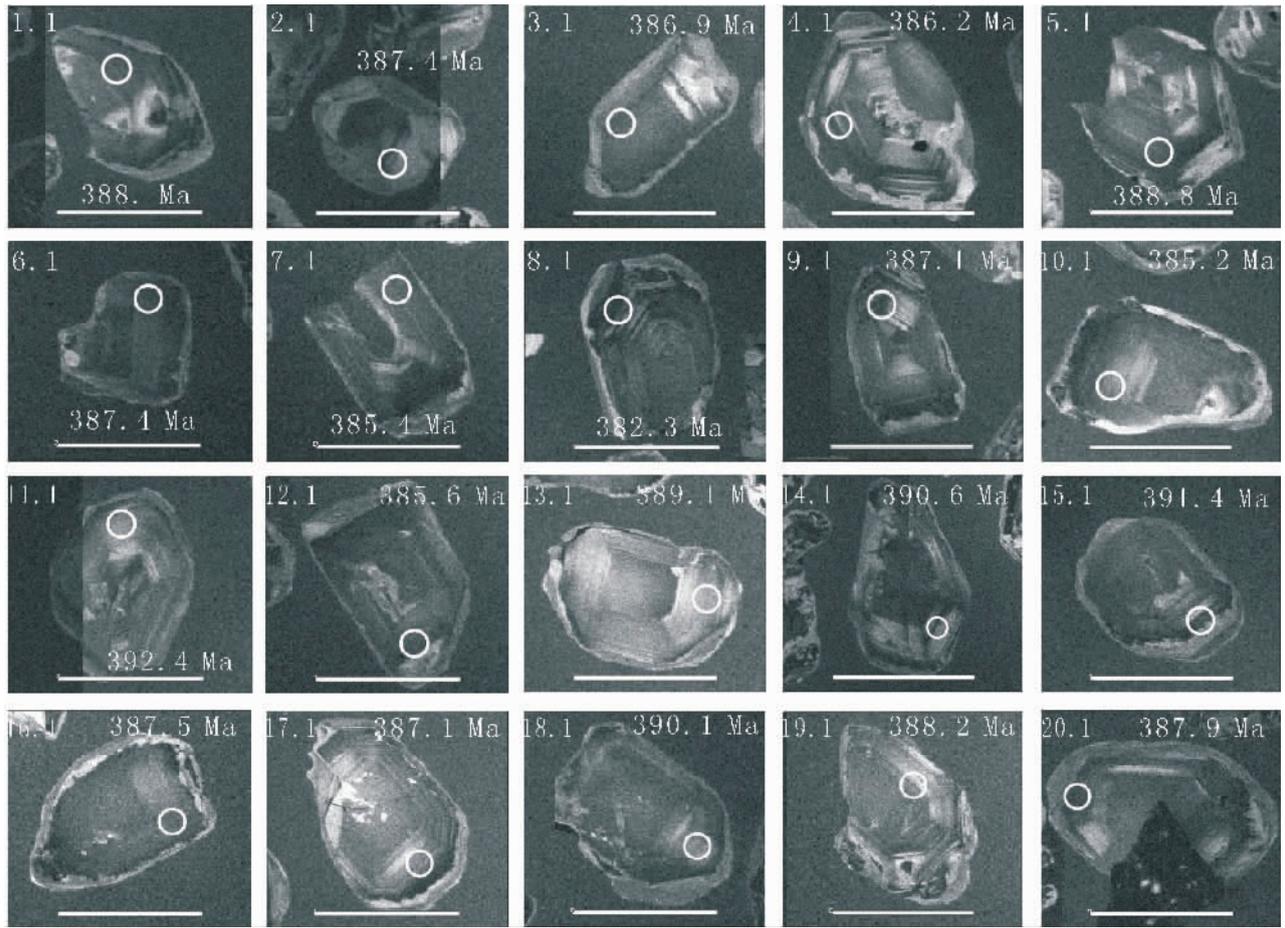


图 5 乌吐布拉克矿区黑云母斜长花岗岩中代表性锆石的阴极发光图(图中比例尺为 $100\mu\text{m}$)

Fig. 5 Cathode light images of the representative zircons from the biotite plagiogranite in Wutubulake district(Scale in figure is $100\mu\text{m}$)

普通铅的影响,对 ^{204}Pb 含量异常高的分析点在计算式剔除,锆石年龄谱和图用 Isoplot 3.0 程序获得,表达式中所列单个数据点的误差均为 1σ ,加权平均年龄具 95% 的置信度。详细实验测试过程参见侯可军等(2009)。

岩石地球化学样品无污染破碎由河北省廊坊市科大技术服务公司完成。主量元素测试在中国科学院地质与地球物理研究所国家重点实验室完成,采用熔片 XRF 方法(国家标准 GB/T 14506.28-1993 监控)在 X 荧光光谱仪 3080E 上测定;微量和稀土元素分析在国家地质实验测试中心完成,采用 ICP-MS 方法分析,含量 $>10 \times 10^{-6}$ 的元素分析精度优于 5%,含量 $<10 \times 10^{-6}$ 的元素分析精度优于 10%。

4 测试结果

4.1 年代学

两件样品中锆石颗粒在透射光下多数为无色或

浅黄褐色,颗粒自形程度较好,多呈短柱状、柱状,少数呈板状,长轴变化于 $100 \sim 250 \mu\text{m}$ 之间,长短轴变化于 $1:1 \sim 2.5:1$ 之间。在阴极发光图像中,大多数锆石均发育较好的振荡环带结构(图 4、图 5),显示了岩浆锆石的特点。通过对透射光、反射光和阴极发光图像研究,分别在两个样品中选择了 17 颗和 20 颗锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 分析,分析结果列于表 1。

乌吐布拉克铁矿斜长花岗岩中锆石 U 含量变化于 $318 \sim 2142 \mu\text{g/g}$, Th 含量 $242 \sim 1154 \mu\text{g/g}$, Th/U 值为 $0.48 \sim 0.76$;黑云母斜长花岗岩中锆石 U 含量变化于 $200 \sim 967 \mu\text{g/g}$, Th 含量 $134 \sim 1498 \mu\text{g/g}$, Th/U 值为 $0.34 \sim 1.55$ 。二者 Th、U 之间正相关性良好,表明了岩浆锆石的特点(Claesson et al., 2000; Belousova et al., 2002; Rubatto, 2002)。二者测点分析数据变化范围较小,在误差范围内有一致的 $n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$ 、 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 和

$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$ 值,在年龄谱和图上集中成群分布(图6)。斜长花岗岩和黑云母斜长花岗岩谱和年龄分别为 $385.6 \pm 2.3 \text{ Ma}$ ($\text{MSDW} = 0.13$) 和 $387.7 \pm 2.1 \text{ Ma}$ ($\text{MSDW} = 0.23$);斜长花岗岩和黑云母斜长花岗岩 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $387.6 \pm 0.99 \text{ Ma}$ ($\text{MSDW} = 0.13$) 和 $388.8 \pm 0.95 \text{ Ma}$ ($\text{MSDW} = 0.23$)。谱和年龄和加权平均年龄基本一致, $388 \sim 386 \text{ Ma}$ 的谱和年龄可以代表岩体的形成时代。

4.2 主量元素

岩石化学分析结果(表2)显示,斜长花岗岩各

主量元素含量均变化不大,具有高硅($\text{SiO}_2 = 76.31\% \sim 79.14\%$),富钠($\text{Na}_2\text{O} = 5.09\% \sim 6.86\%$),贫钾($\text{K}_2\text{O} = 0.39\% \sim 0.82\%$,除 WT96-6 中 $\text{K}_2\text{O} = 2.79\%$),中等全碱含量($7.05\% \sim 7.88\%$)的特点;黑云母斜长花岗岩与相比斜长花岗岩相比, SiO_2 含量较低($66.01\% \sim 69.29\%$),全碱含量较高($7.86\% \sim 9.05\%$),但同样具有富钠($\text{Na}_2\text{O} = 7.15\% \sim 8.89\%$),贫钾($\text{K}_2\text{O} = 0.16\% \sim 0.77\%$)的特点。两者 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值分别变化于 $1.83 \sim 17.58$ 及 $9.30 \sim 55.56$,在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解上(图7)

表1 乌吐布拉克花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定结果

Table.1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating date of the Wutubulake granite pluton

点号	Pb ($\mu\text{g/g}$)	Th ($\mu\text{g/g}$)	U ($\mu\text{g/g}$)	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄(Ma)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(Ma)
				测值	误差(1 σ)	测值	误差(1 σ)	测值	误差(1 σ)		
WT93-01	55	488	892	0.05369	0.000241	0.45556	0.006104	0.06147	0.000773	381.2 \pm 4.3	384.6 \pm 4.7
WT93-02	63	514	1167	0.05422	0.000247	0.46126	0.006897	0.06168	0.000898	385.1 \pm 4.8	385.8 \pm 5.5
WT93-03	92	625	1810	0.05577	0.000212	0.47378	0.006226	0.06172	0.000862	393.8 \pm 4.3	386.1 \pm 5.2
WT93-04	98	800	1487	0.05481	0.000202	0.47187	0.006261	0.06237	0.000798	392.5 \pm 4.3	390 \pm 4.8
WT93-05	69	547	1276	0.05490	0.000210	0.46221	0.005689	0.06105	0.000749	385.8 \pm 4.0	382 \pm 4.6
WT93-06	70	754	879	0.05472	0.000269	0.46215	0.006015	0.06121	0.000741	385.8 \pm 4.2	383 \pm 4.5
WT93-07	128	1154	2142	0.05609	0.000202	0.47535	0.005945	0.06137	0.000723	394.9 \pm 4.1	384 \pm 4.4
WT93-08	51	427	869	0.05493	0.000262	0.46691	0.006930	0.06168	0.000921	389.1 \pm 4.8	385.9 \pm 5.6
WT93-09	60	494	1004	0.05523	0.000265	0.47041	0.006412	0.06171	0.000807	391.5 \pm 4.4	386 \pm 4.9
WT93-10	72	596	1244	0.05488	0.000223	0.46753	0.005976	0.06170	0.000749	389.5 \pm 4.1	386 \pm 4.5
WT93-11	44	452	849	0.05436	0.000242	0.46351	0.006775	0.06177	0.000867	386.7 \pm 4.7	386.4 \pm 5.3
WT93-12	89	845	1282	0.05473	0.000201	0.46639	0.005105	0.06174	0.000656	388.7 \pm 3.5	386.2 \pm 4.0
WT93-13	99	876	1487	0.05536	0.000196	0.47142	0.005542	0.06169	0.000714	392.1 \pm 3.8	385.9 \pm 4.3
WT93-14	64	492	1059	0.05721	0.002250	0.48709	0.018453	0.06178	0.000981	402.9 \pm 12.6	386.4 \pm 6.0
WT93-15	29	242	318	0.05478	0.000402	0.46592	0.005817	0.06179	0.000758	388.4 \pm 4.0	386.5 \pm 4.6
WT93-16	68	602	1050	0.05497	0.000249	0.46852	0.005516	0.06175	0.000705	390.2 \pm 3.8	386.3 \pm 4.3
WT93-17	45	360	689	0.05454	0.000289	0.46443	0.006805	0.06176	0.000901	387.3 \pm 4.7	386.3 \pm 5.5
WT96-01	29	328	316	0.05607	0.000406	0.48247	0.007366	0.06215	0.000713	399.8 \pm 5.0	388.7 \pm 4.3
WT96-02	33	371	351	0.05802	0.000712	0.49530	0.008475	0.06193	0.000702	408.5 \pm 5.8	387.4 \pm 4.3
WT96-03	25	278	279	0.05405	0.000366	0.46115	0.006234	0.06186	0.000724	385.1 \pm 4.3	386.9 \pm 4.4
WT96-04	15	139	203	0.05490	0.000443	0.46630	0.005836	0.06175	0.000705	388.6 \pm 4.0	386.2 \pm 4.3
WT96-05	14	134	200	0.05474	0.000435	0.46817	0.005818	0.06215	0.000694	389.9 \pm 4.0	388.7 \pm 4.2
WT96-06	45	532	397	0.05433	0.000307	0.46437	0.006306	0.06194	0.000769	387.3 \pm 4.4	387.4 \pm 4.7
WT96-07	32	347	339	0.05468	0.000340	0.46407	0.006180	0.06161	0.000779	387.1 \pm 4.3	385.4 \pm 4.7
WT96-08	63	428	1271	0.05526	0.000195	0.46566	0.005930	0.06110	0.000772	388.2 \pm 4.1	382.3 \pm 4.7
WT96-09	33	314	364	0.05501	0.000424	0.46834	0.007294	0.06189	0.000937	390.0 \pm 5.0	387.1 \pm 5.7
WT96-10	51	597	465	0.05454	0.000305	0.46333	0.006326	0.06158	0.000789	386.6 \pm 4.4	385.2 \pm 4.8
WT96-11	27	276	293	0.05440	0.000415	0.47079	0.006809	0.06276	0.000811	391.7 \pm 4.7	392.4 \pm 4.9
WT96-12	25	291	242	0.05665	0.000491	0.48278	0.008404	0.06164	0.000842	400.0 \pm 5.8	385.6 \pm 5.1
WT96-13	47	569	415	0.05428	0.000310	0.46596	0.006674	0.06222	0.000836	388.4 \pm 4.6	389.1 \pm 5.1
WT96-14	65	715	720	0.05480	0.000287	0.47247	0.007617	0.06247	0.000947	392.9 \pm 5.3	390.6 \pm 5.7
WT96-15	29	273	329	0.05433	0.000379	0.46905	0.006291	0.06260	0.000753	390.5 \pm 4.3	391.4 \pm 4.6
WT96-16	39	440	406	0.05514	0.000333	0.47209	0.006498	0.06196	0.000705	392.6 \pm 4.5	387.5 \pm 4.3
WT96-17	57	665	479	0.05435	0.000331	0.46374	0.006449	0.06189	0.000809	386.9 \pm 4.5	387.1 \pm 4.9
WT96-18	31	313	334	0.05543	0.000413	0.47897	0.008286	0.06238	0.000849	397.4 \pm 5.7	390.1 \pm 5.2
WT96-19	16	134	200	0.05474	0.000489	0.46696	0.007553	0.06207	0.000952	389.1 \pm 5.2	388.2 \pm 5.8
WT96-20	130	1498	967	0.05471	0.000231	0.46819	0.005390	0.06202	0.000679	389.9 \pm 3.7	387.9 \pm 4.1

注:WT93为斜长花岗岩;WT96为黑云母斜长花岗岩。

样品点均分布在低钾(拉斑玄武质)系列。

斜长花岗岩具有中等的 Al_2O_3 含量,变化于 11.95%~12.55%,铝过饱和指数 $A/CNK \{A/CNK = n(Al_2O_3)/[n(CaO) + n(Na_2O) + n(K_2O)]\}$

均小于 1,变化于 0.95~1.00, $A/NK \{A/NK = n(Al_2O_3)/[n(Na_2O) + n(K_2O)]\}$ 为 1.06~1.10;黑云母斜长花岗岩相比斜长花岗岩具有较高的 Al_2O_3 含量,变化于 14.42%~14.98%,铝过饱和

表 2 乌吐布拉克岩体主量元素(%)、稀土元素($\times 10^{-6}$)和微量元素($\times 10^{-6}$)含量
Table. 2 Contents of major elements (%), rare earth elements ($\times 10^{-6}$) and trace elements ($\times 10^{-6}$) in the Wutubulake pluton

岩性	斜长花岗岩						黑云母斜长花岗岩						
	WT93-1	WT93-2	WT93-3	WT93-4	WT93-5	WT93-6	WT96-1	WT96-2	WT96-3	WT96-4	WT96-5	WT96-6	WT96-7
SiO ₂	79.14	79.01	78.30	77.39	76.86	76.31	69.29	68.82	68.86	66.01	67.34	67.57	67.65
TiO ₂	0.04	0.06	0.14	0.14	0.15	0.14	0.93	1.02	1.03	1.15	0.97	0.97	0.97
Al ₂ O ₃	12.19	12.39	11.95	12.24	12.55	12.35	14.64	14.98	14.96	14.93	14.42	14.51	14.63
FeO	0.34	0.47	1.32	0.88	0.66	0.92	1.31	1.08	1.10	1.84	1.81	1.67	1.61
Fe ₂ O _{3T}	0.55	0.53	1.69	1.69	1.77	1.56	1.83	1.87	1.89	3.76	3.73	3.18	2.87
MnO	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
CaO	0.79	0.50	0.44	0.51	0.93	0.69	2.76	3.37	3.39	3.09	2.59	2.79	2.94
MgO	0.11	0.08	0.43	0.39	0.2	0.24	1.15	1.53	1.5	1.79	1.43	1.57	1.56
K ₂ O	0.54	0.39	0.69	0.64	0.82	2.79	0.33	0.77	0.71	0.16	0.25	0.26	0.29
Na ₂ O	6.60	6.86	6.36	6.62	6.39	5.09	8.65	7.16	7.15	8.89	8.79	8.79	8.76
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.03	0.04	0.03	0.04	0.23	0.29	0.3	0.31	0.25	0.24	0.27
烧失	0.24	0.24	0.30	0.30	0.18	0.18	0.34	0.32	0.32	0.18	0.26	0.16	0.24
总量	100.21	100.07	100.34	99.97	99.90	99.41	100.17	100.17	100.15	100.31	100.05	100.06	100.21
K ₂ O+Na ₂ O	7.14	7.25	7.05	7.26	7.21	7.88	8.98	7.93	7.86	9.05	9.04	9.05	9.05
Na ₂ O/ K ₂ O	12.22	17.58	9.21	10.34	7.79	1.83	26.21	9.30	10.07	55.56	35.16	33.81	30.21
A/CNK	0.95	0.98	1.00	0.98	0.96	0.98	0.75	0.80	0.80	0.73	0.74	0.73	0.73
A/NK	1.07	1.06	1.07	1.06	1.10	1.08	1.00	1.19	1.19	1.01	0.98	0.98	0.99
La	21.4	15.7	37.4	29.7	31.4	35.9	40.9	34.5	31.4	33.8	27.2	29.8	32.3
Ce	30.3	34.8	74.6	63	62.3	72.2	62.6	83.8	78	86.3	75.4	80.7	92.3
Pr	6.15	4.97	9.61	7.81	8.28	9.56	14.4	9.91	9.14	8.68	8.18	8.57	10.4
Nd	24	19.4	36.2	30.2	32.3	36.9	59.5	39.3	37	33.7	34.3	34.1	41.5
Sm	5.26	5.2	7.78	6.39	7.04	8.24	14.2	9.18	8.45	7.75	7.88	7.89	9.32
Eu	0.28	0.2	0.67	0.65	0.78	0.86	2.06	2.35	2.19	1.93	1.57	1.8	2.04
Gd	3.77	5.49	6.62	5.5	6.19	6.96	13	9.02	8.3	8.01	7.91	8.29	8.83
Tb	0.66	1	1.12	0.96	1.02	1.08	2.2	1.55	1.46	1.43	1.35	1.41	1.54
Dy	3.81	6.46	6.29	5.4	6.13	5.89	12.9	9.19	8.8	8.43	8.08	8.57	9.23
Ho	0.82	1.45	1.26	1.09	1.27	1.19	2.67	2.01	1.84	1.79	1.73	1.83	1.94
Er	2.6	4.45	3.85	3.38	3.97	3.47	7.85	5.9	5.7	5.57	5.36	5.65	5.97
Tm	0.38	0.62	0.54	0.47	0.57	0.49	1.11	0.88	0.81	0.79	0.76	0.82	0.84
Yb	2.65	4.32	3.7	3.4	3.94	3.35	7.47	5.89	5.46	5.35	5.19	5.52	5.83
Lu	0.44	0.63	0.56	0.49	0.59	0.55	1.05	0.9	0.86	0.8	0.78	0.78	0.86
ΣREE	102.52	104.69	190.2	158.44	165.78	186.64	241.91	214.38	199.41	204.33	185.69	195.73	222.90
LREE/HREE	5.78	3.29	6.94	6.66	6.00	7.12	4.01	5.07	5.00	5.35	4.96	4.95	5.36
(La/Sm) _N	2.56	1.90	3.03	2.93	2.81	2.74	1.81	2.37	2.34	2.75	2.17	2.38	2.18
(Gd/Yb) _N	1.15	1.03	1.45	1.31	1.27	1.68	1.41	1.24	1.23	1.21	1.24	1.22	1.23
(La/Yb) _N	5.46	2.46	6.83	5.90	5.39	7.24	3.70	3.96	3.89	4.27	3.54	3.65	3.74
δEu	0.18	0.11	0.28	0.33	0.35	0.34	0.46	0.78	0.79	0.74	0.60	0.68	0.68
δCe	0.61	0.92	0.91	0.95	0.89	0.90	0.60	1.05	1.07	1.16	1.18	1.17	1.18
Sr	45.70	48.50	27.10	28.40	43.00	42.80	82.00	69.60	70.30	77.60	54.40	54.30	54.10
Rb	9.43	6.31	12.50	10.10	19.30	71.70	2.29	25.60	26.90	3.66	3.33	2.37	2.35
Ba	151.00	50.80	32.80	32.00	103.00	387.00	51.40	91.30	93.70	31.80	28.30	29.10	30.70
Th	13.1	11.2	14.5	12.7	12.3	14.6	15.3	12.6	12.1	10.9	11.3	11.5	11.7
U	2.29	3.03	2.31	2.11	1.72	1.87	0.08	3.8	3.86	3.7	2.87	3.62	3.81
Cr	0.64	0.42	1.21	1.04	2.86	1.15	0.17	1505	7.53	1.46	1.28	2.61	1.24

(续表 2)

岩性	斜长花岗岩						黑云母斜长花岗岩						
	WT93-1	WT93-2	WT93-3	WT93-4	WT93-5	WT93-6	WT96-1	WT96-2	WT96-3	WT96-4	WT96-5	WT96-6	WT96-7
Ta	1.04	0.63	0.78	0.76	0.75	0.69	0.02	0.76	0.69	0.68	0.68	0.67	0.65
Nb	8.13	10.4	11.9	11.6	12.7	11.3	0.11	13	12	12.7	10.8	11.5	10.8
Zr	118	110	165	172	228	180	19	458	452	246	509	352	430
Hf	7.23	4.53	5.19	5.23	6.13	5.26	0.53	8.56	8.72	5.9	9.77	7.47	8.25
Cu	0.84	1.31	5.35	2.96	3.69	5.09	0.6	55.5	6.78	8.33	5.88	6.98	6.94
Pb	4	2.47	2.2	2.62	2.93	3.28	0.74	9.06	3.8	2.08	2.25	2.88	3.65
Zn	3.1	2	18.5	7.4	8.6	7.6	3.3	18.7	15	24.6	17.2	20.3	18.1
Mo	0.41	<0.05	0.17	0.19	0.05	0.09	<0.05	23.5	0.44	0.31	0.3	0.34	0.34
V	2.13	1.04	5.59	7.18	3.95	4.05	0.22	70.9	65.8	94.3	84	73.2	60.6
Ni	1.1	0.51	1.29	1.14	0.91	0.75	0.88	668	5.28	2.53	2.36	2.9	2.33
Y	22.4	38.0	31.7	28.4	34.9	30.4	66.6	51.7	49.4	48.7	46.0	48.5	50.6
Co	0.77	0.43	1.05	1.95	0.94	1.05	0.52	16.5	4.93	3.78	2.94	3.19	3.14
Ga	17.1	16.7	17.8	18.6	20	18.8	3.45	22.4	21.3	24	21.7	21.7	21.8
Sc	1.88	3.54	4.14	3.73	3.91	3.59	9.4	11.3	10.9	12.3	10.3	9.95	9.58
Sr/Y	2.04	1.28	0.85	1.00	1.23	1.41	1.23	1.35	1.42	1.59	1.18	1.12	1.07
Rb/Sr	0.21	0.13	0.46	0.36	0.45	1.68	0.03	0.37	0.38	0.05	0.06	0.04	0.04

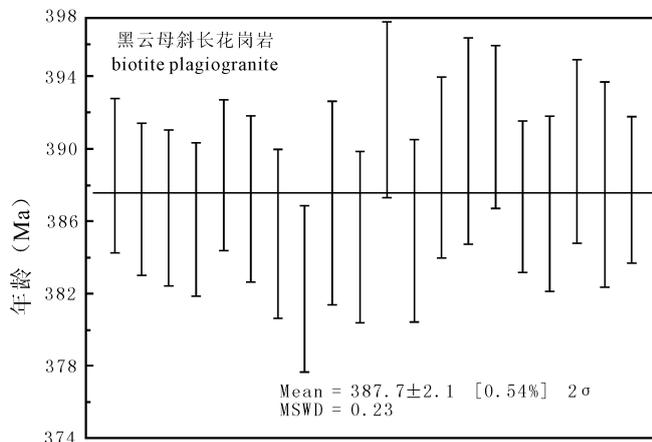
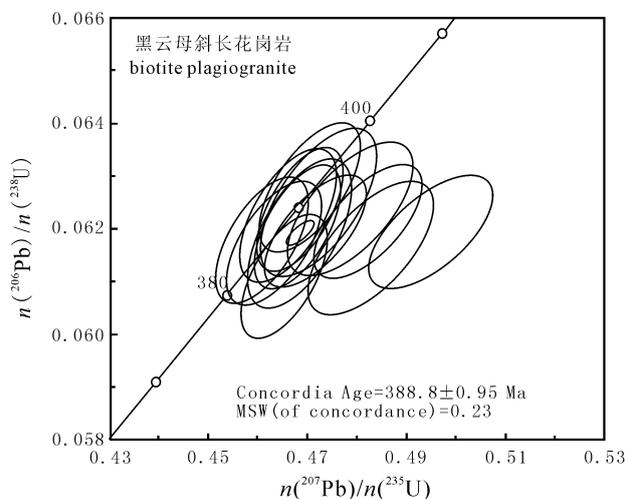
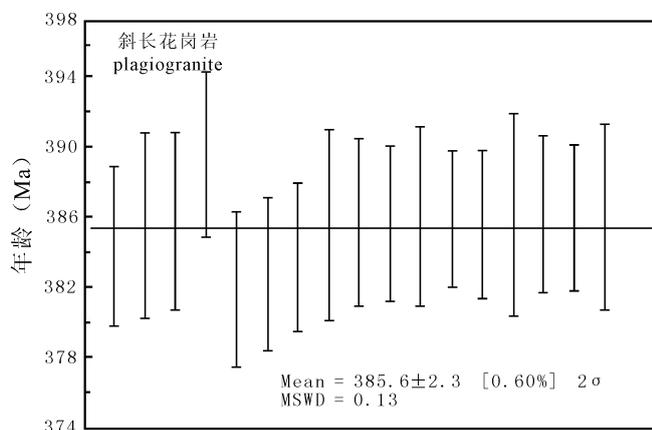
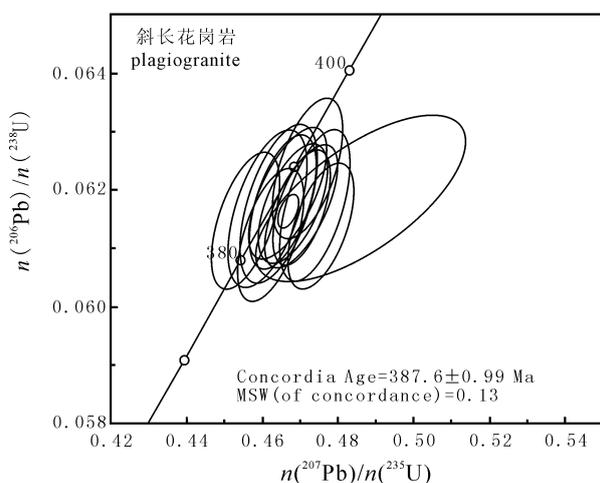


图 6 乌吐布拉克花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谱和图

Fig. 6 Zircon LA-ICP-MS U-Pb concordia diagrams of the Wutubulake granite

指数 A/CNK 均小于 1,变化于 0.73~0.80, A/NK 为 0.98~1.19。两者在 ACNK—ANK 图解(图 8)中,样品点绝大多数分布于准铝质区。

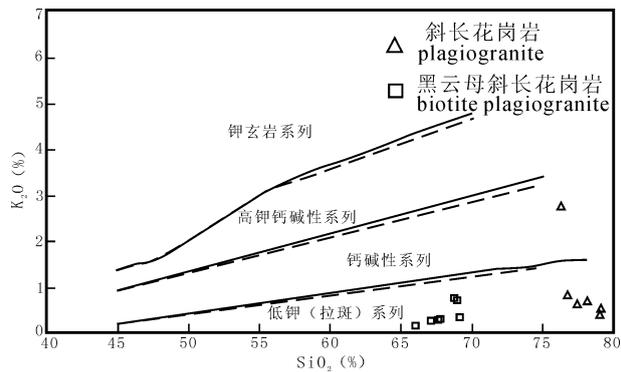


图 7 乌吐布拉克岩体 SiO₂—K₂O 图解
(底图据 Rickwood, 1989)

Fig. 7 Whole-rock SiO₂ versus K₂O diagram of the Wutubulake plutons(after Rickwood, 1989)

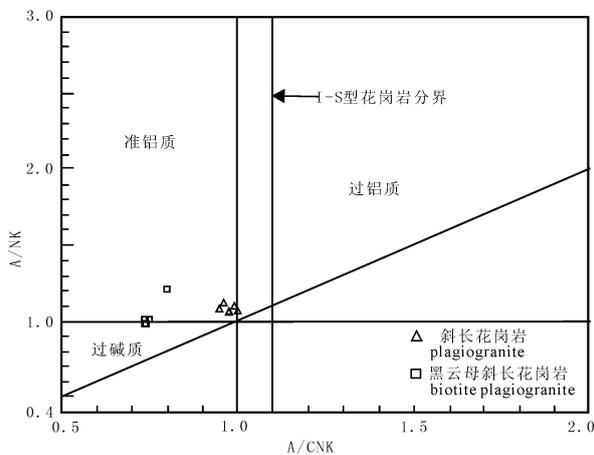


图 8 乌吐布拉克岩体 A/CNK—A/NK 图解
(底图据 Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig. 8 A/CNK—A/NK diagrams of the Wutubulake plutons(after Peccerillo and Taylor, 1976)

$$A/CNK = n(Al_2O_3) / [n(CaO) + n(Na_2O) + n(K_2O)];$$

$$A/NK = n(Al_2O_3) / [n(Na_2O) + n(K_2O)]$$

在 Harker 图解中(图 9),斜长花岗岩中 SiO₂与 TiO₂、P₂O₅、K₂O、FeO 呈明显的负相关,与 Na₂O 呈正相关;黑云母斜长花岗岩中 SiO₂与 TiO₂、MgO、Na₂O、FeO 呈明显的负相关,与 K₂O 呈正相关。

4.3 微量元素

斜长花岗岩稀土总量变化于 102.52×10⁻⁶~190.20×10⁻⁶之间, LREE/HREE=3.29~7.12,

(La/Yb)_N=2.46~7.24, (La/Sm)_N=1.90~3.03, (Gd/Yb)_N=1.03~1.68, δEu=0.11~0.35; 黑云斜长母花岗岩稀土总量较高,变化于 185.69×10⁻⁶~241.91×10⁻⁶之间, LREE/HREE=4.01~5.36, (La/Yb)_N=3.54~4.27, (La/Sm)_N=1.81~2.75, (Gd/Yb)_N=1.21~1.41, δEu=0.46~0.79。两者在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图上(图 10),各样品配分曲线基本一致,均表现出轻稀土相对富集的右倾特征,具有“V”型谷,斜长花岗岩内部轻重稀土元素组分馏程度较弱,负铕异常更加明显。在原始地幔标准化蛛网图中(图 10),斜长花岗岩和黑云母斜长花岗岩样品表现出近乎一致的分布模式,均显示 Th、U、Ta、La、Nd、Hf 相对正异常, Ba、K、Nb、Sr、P、Eu、Ti 相对负异常。

5 讨论

5.1 花岗岩形成时代及其地质意义

近年来许多学者(Windley et al., 2002; 王涛等, 2005; 童英等, 2005, 2007; Sun et al., 2008; Wang et al., 2006; Zhang et al., 2006; 曾乔松等, 2007; 周刚等, 2007a; Yuan et al., 2007; 杨富全等, 2008; 刘锋等, 2009, 2010; 柴凤梅等, 2010)利用锆石 SHRIMP U-Pb 法和锆石 LA-ICPMS U-Pb 法精确测定了阿尔泰山花岗岩类的形成时代, 研究结果表明古生代阿尔泰山岩浆侵入活动存在四个峰值: 460Ma、408 Ma、375 Ma 和 265 Ma(Wang et al., 2006; 曾乔松等, 2007), 特别是早—中生代花岗岩类分布广泛, 多数形成于 400 Ma 左右。阿尔泰山南缘麦兹盆地中花岗岩岩体形成时代主要集中于早泥盆世, 如蒙库岩体(404~400 Ma, SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄)(杨富全等, 2008)、铁列克岩体(403±5Ma, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄)(童英等, 2005)、可可托海岩体(399±2Ma, TIMS 锆石 U-Pb 年龄)和 409±7Ma (SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄)(Wang et al., 2006)。本文获得的乌吐布拉克斜长花岗岩和黑云母斜长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为 385.6±2.3 Ma 和 387.7±2.1 Ma, 二者在误差范围内基本一致, 均代表岩体侵入年龄, 为中泥盆世早期侵入体, 结合相似的矿物组合及地球化学特点, 相同的构造环境, 表明二者具有同源同期的性质。该类岩体相比麦兹盆地中的其它岩体形成时代较晚, 但与东准噶尔北部的岛弧花岗质岩石接近, 如哈腊苏花岗闪长斑岩的时代为 381Ma(张招崇等, 2006), 为晚古生代构造—岩浆活动末期的

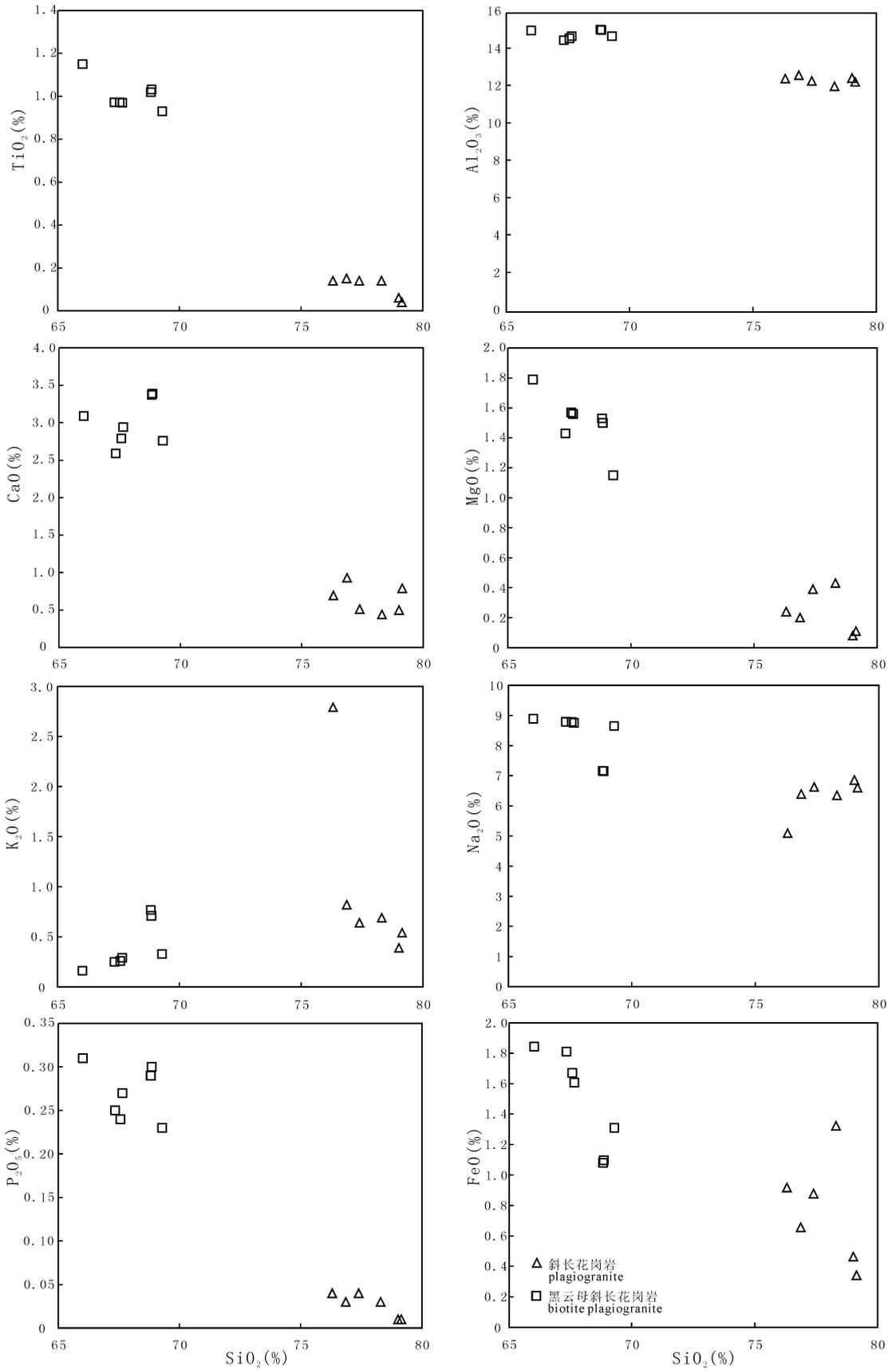


图9 乌吐布拉克岩体 Harker 图解

Fig. 9 Harker diagrams of the Wutubulake plutons

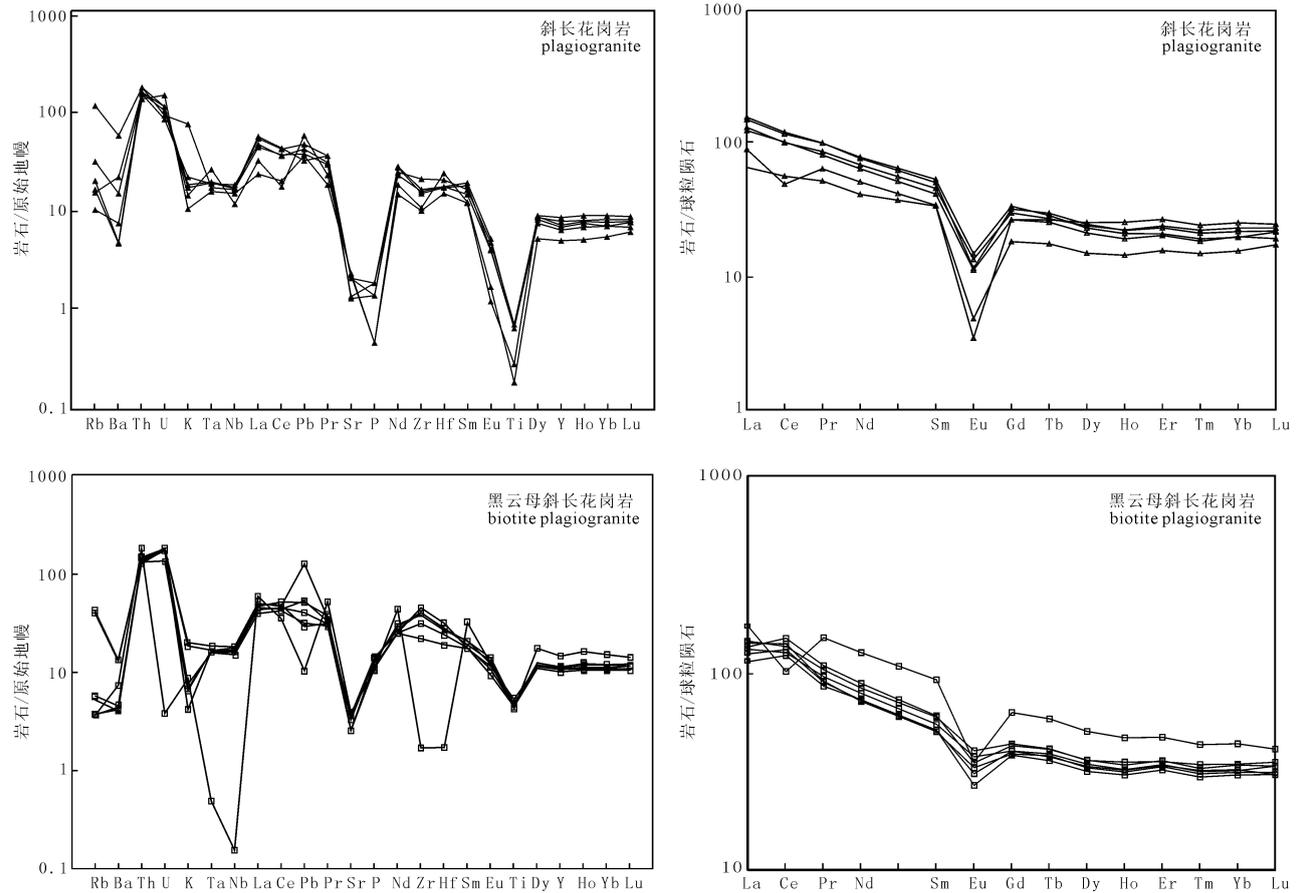


图 10 乌吐布拉克岩体微量元素原始地幔标准化蛛网图及稀土元素球粒陨石标准化图解
(球粒陨石、原始地幔数据取自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 10 Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams and chondrite-normalized REE patterns of the Wutubulake plutons (Primitive mantle and Chondrite content from Sun and McDonough, 1989)

产物。

麦兹盆地中上志留统一下泥盆统康布铁堡组变质火山—沉积岩系中发现了一系列铁矿床(点),如蒙库、乌吐布拉克、巴拉巴克布拉克、巴利尔斯等磁铁矿矿床。这些铁矿床(点)在空间上同属一个成矿带,在地质特征及矿床特征方面表现出相似性,主要表现为铁矿体呈似层状、透镜状赋存于上志留统一下泥盆统康布铁堡组变质火山—沉积岩系中,矿体附近出现片麻状花岗岩,矿体及其周围发育大量的矽卡岩矿物及含浸染状磁铁矿大理岩。结合上述野外地质特征及已有研究资料(杨富全等, 2007, 2008),判定该类铁矿床的形成与岩浆侵入活动密切相关。乌吐布拉克铁矿区斜长花岗岩和黑云母斜长花岗岩侵入时代分别为 $385.6 \pm 2.3 \text{ Ma}$ 和 $387.7 \pm 2.1 \text{ Ma}$,据此限定其成矿时代下限为 $388 \sim 386 \text{ Ma}$,即铁矿形成时间略晚于 $388 \sim 386 \text{ Ma}$,为中泥盆世早期成矿。

5.2 岩石类型及成因

乌吐布拉克斜长花岗岩与黑云斜长母花岗岩均具有高硅 ($\text{SiO}_2 = 66.01\% \sim 79.14\%$)、富钠贫钾 ($\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$)、准铝质 (A/CNK 比值均小于 1.1) 的特点,两者为准铝质低钾花岗岩。微量元素表现为富集 Th、Ta、Hf 等高场强元素,亏损 Rb、Ba、K、Sr、P 大离子亲石元素,尤其出现明显的 K、P、Ti 负异常,指示岩浆在演化过程中发生了钾长石、磷灰石及钛铁矿的分离结晶作用或者部分熔融过程中源区中这些矿物的残留。稀土元素具有轻稀土相对富集的右倾特征,轻重稀土元素分馏明显 [$(\text{La}/\text{Yb})_N = 2.46 \sim 7.24$],各元素组内部出现了一定的分馏,斜长花岗岩 ($\delta\text{Eu} = 0.11 \sim 0.35$) 相比黑云母斜长花岗岩 ($\delta\text{Eu} = 0.46 \sim 0.79$) Eu 负异常更加明显,指示其母岩浆中斜长石的分离结晶作用较强。斜长花岗岩中 Sr 和 Yb 含量分别为 $27.10 \times 10^{-6} \sim 48.50 \times 10^{-6}$ 和 $2.65 \times 10^{-6} \sim 4.32 \times 10^{-6}$,黑云母斜长花岗

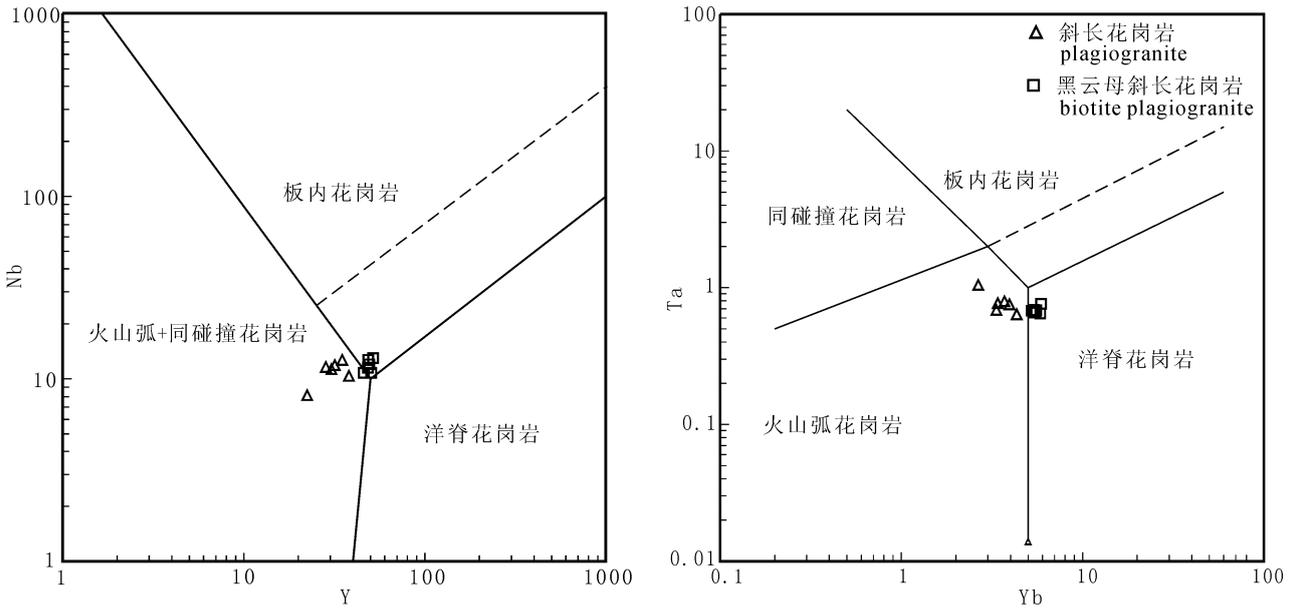


图 11 乌吐布拉克岩体 Nb—Y 和 Ta—Yb 图解(据 Pearce et al. , 1984)
 Fig. 11 Nb—Y and Ta—Yb diagrams of the Wutubulake plutons(after Pearce et al. , 1984)

岩中 Sr 和 Yb 含量分别为 $54.10 \times 10^{-6} \sim 82.00 \times 10^{-6}$ 和 $5.19 \times 10^{-6} \sim 7.47 \times 10^{-6}$ 。以上地球化学特点与张旗等(2006)按照花岗岩地球化学特征及其形成深度关系所划分的非常低 Sr 和高 Yb 型花岗岩($Sr < 100 \times 10^{-6}$, $Yb > 2 \times 10^{-6}$)很相似,研究认为这种类型的花岗岩形成的压力及深度均非常低(压力 < 0.5 GPa, 深度 < 5 km),可能代表了非常低压(和高温)条件下形成的花岗岩(张旗和周国庆, 2001; 张旗等, 2006)。岩石的 Nb/Ta 值(5.5 ~ 18.7)和 Zr/Hf 值(16.3 ~ 53.5)与地壳的相应元素比值 11 和 33 接近; Ti/Zr 值 < 20 , 变化于 2.1 ~ 17.0, 均表明其为典型陆壳岩石部分熔融的产物(Taylor and Mclennan, 1985; Wilson, 1989; Francalanci et al. , 1993)。

5.3 构造环境

花岗岩侵入受构造环境的影响和控制,不同构造环境下花岗岩的矿物组合、主量元素、微量及稀土元素具有不同的特征,尤其是稀土及微量元素特征明显受其成岩的构造环境制约。研究表明,乌吐布拉克花岗岩具有 Th/Nb 值较高, $Th \gg Ta$, $Ta/Yb < 0.5$ 及出现 Eu 负异常的特点($Th/Nb = 0.86 \sim 139.1$, $Ta/Yb = 0.11 \sim 0.39$, $Th/Ta = 12.6 \sim 765$, $\delta Eu = 0.11 \sim 0.79$)。这与俯冲带有关的陆缘弧岩浆岩的地球化学特点一致(Condie, 1986),暗示其形成与俯冲带关系密切。在 Nb—Y 和 Ta—Yb 图解中

(图 11),样品点落在板内、火山弧和洋脊花岗岩三者交界附近,以上特征表明乌吐布拉克花岗岩形成于板块俯冲有关的大陆弧环境。这与前人认为晚志留世—泥盆纪阿尔泰处于活动大陆边缘,岩浆活动与板块俯冲有关(Windley et al. , 2002; Xu et al. , 2003; Xiao et al. , 2004; Wang et al. , 2006; 牛贺才等, 2006; Yuan et al. , 2007; 杨富全等, 2008; 刘锋等, 2010)的观点一致。

区域构造演化研究表明,在早中奥陶世(> 460 Ma)古亚洲洋板块开始向北俯冲于阿尔泰微大陆之下,460~415 Ma 由于板块脱水形成的流体交代交代上覆地幔楔,促使其熔融形成岛弧火山岩(Windley et al. , 2002),伴随形成 460 Ma 的火山弧花岗岩。随着古亚洲洋持续的向北俯冲作用,俯冲板片发生裂离下沉,导致软流圈上涌,加热俯冲板片及沉积物并使之熔融,软流圈地幔与俯冲板片熔体及地幔楔熔体混合底侵于下地壳,导致地壳物质熔融,形成 415~380 Ma 康布铁堡组酸性火山岩及同时代的侵入岩^⑥。乌吐布拉克岩体即为该阶段岩浆活动的产物,其侵入于康布铁堡组下亚组火山岩及灰岩接触带附近,形成了大量矽卡岩矿物,伴随矽卡岩的退化蚀变作用形成了乌吐布拉克、巴利尔斯、巴拉巴克布拉克为代表的磁铁矿矿床。在岩体和矿床形成后,发生了区域变质作用,主要表现为岩体中片麻状构造发育,矽卡岩和矿体均一起发生了较强

的变形。

6 结论

(1) 乌吐布拉克斜长花岗岩和黑云母斜长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 谐和年龄分别为 385.6 ± 2.3 Ma 和 387.7 ± 2.1 Ma, 两者为中泥盆世早期同源岩浆侵入体。乌吐布拉克铁矿区矿体及其周围发育大量的矽卡岩矿物, 铁矿的形成与矽卡岩有关, 矽卡岩的形成与矿区岩浆侵入活动密切相关, 因此, 限定乌吐布拉克铁矿床成矿时代晚于 $388 \sim 386$ Ma, 属于中泥盆世早期成矿。

(2) 乌吐布拉克斜长花岗岩与黑云斜长母花岗岩均具有高硅 ($\text{SiO}_2 = 66.01\% \sim 79.14\%$)、富钠贫钾 ($\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$)、准铝质 $\{A/NK = n(\text{Al}_2\text{O}_3) / [n(\text{Na}_2\text{O}) + n(\text{K}_2\text{O})] < 1.1\}$ 的特点, 两者为准铝质低钾花岗岩。微量元素表现为富集 Th、Ta、Hf 等高场强元素, 亏损 Rb、Ba、K、Sr、P 大离子亲石元素。稀土元素表现为轻稀土相对富集, 轻重稀土元素分馏明显 $[(\text{La}/\text{Yb})_N = 2.46 \sim 7.24]$, 具有中等或强的 Eu 负异常, 与大陆弧花岗岩的地球化学特征一致, 可能形成于与板块俯冲有关的活动大陆边缘的陆缘弧环境中。

致谢: 野外工作期间得到新疆富蕴县金宝矿业公司谢梦华总工程师, 金山矿冶公司黄智丽技术员的大力支持和帮助; 岩石地球化学测试由国家地质实验测试中心罗继荣女士完成, 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测试过程中得到了侯可军先生的大力支持, 在此一并致以衷心的感谢。

注 释 / Notes

- ① 易朝楷等. 2009. 新疆富蕴县蒙库铁矿区乌吐布拉克矿段补充详查及外围普查地质报告.
- ② 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1978. 阿勒泰幅地质图(1:20万).
- ③ 柴凤梅. 2010. 阿尔泰山南缘与铁矿有关的泥盆纪火山岩特征研究. 中国地质科学院博士后研究报告.

参 考 文 献 / References

柴凤梅, 董连慧, 杨富全, 刘锋, 耿新霞, 黄承科. 2010. 阿尔泰山南缘克朗盆地铁木尔特花岗岩年龄、地球化学特征及成因. 岩石学报, 26(2): 377~386.

冯京, 张招崇. 2009. 阿尔泰山南缘中一酸性斑岩的地球化学特征及其岩石成因探讨. 地质论评, 55(1): 11~25.

侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术. 矿床地质, 28(4): 481~492.

李锦铁. 2004. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变. 地质论评, 50(3): 304~322.

刘锋, 杨富全, 李延河, 郭正林, 柴凤梅, 耿新霞, 张志欣. 2010. 新疆

阿尔泰山南缘萨拉克铁矿区花岗岩年代学及地球化学研究. 地质学报, 84(2): 195~205.

刘锋, 杨富全, 毛景文, 柴凤梅, 耿新霞. 2009. 阿尔泰山造山带阿巴宫花岗岩年代学及地球化学研究. 岩石学报, 25(6): 1416~1425.

牛贺才, 于学元, 许继峰, 单强, 陈繁荣, 张海洋, 郑作平. 2006. 中国新疆阿尔泰山晚古生代火山作用及成矿. 北京: 地质出版社, 1~184.

童英, 王涛, 洪大卫, 柳晓明, 韩宝福. 2005. 阿尔泰山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. 地球学报, 26(增刊): 74~77.

童英, 王涛, 洪大卫, 代雅建, 韩宝福, 柳晓明. 2007. 中国阿尔泰山北部山区早泥盆世花岗岩的年龄、成因及构造意义. 岩石学报, 23(8): 1933~1944.

王登红, 陈毓川, 徐志刚, 李天德, 傅旭杰. 2002. 阿尔泰山成矿省的成矿系列及成矿规律. 北京: 原子能出版社, 1~493.

王涛, 洪大卫, 童英, 韩宝福, 石玉若. 2005. 中国阿尔泰山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. 岩石学报, 21(3): 640~650.

王中刚, 赵振华, 邹天人等. 1998. 阿尔泰山花岗岩类地球化学. 北京: 科学出版社, 1~152.

徐林刚, 毛景文, 杨富全, 叶会寿, 郑建民, 李建国, 蔡永彪, 查小玲, 高建京. 2007. 新疆蒙库铁矿床矽卡岩矿物学特征及其意义. 矿床地质, 26(4): 455~463.

杨富全, 毛景文, 徐林刚, 张岩, 刘锋, 黄成林, 周刚, 刘国仁, 代军治. 2007. 新疆蒙库铁矿床稀土元素地球化学及对铁成矿作用的指示. 岩石学报, 23(10): 2443~2456.

杨富全, 毛景文, 闫升好, 刘锋, 柴凤梅, 周刚, 刘国仁, 何立新, 耿新霞, 代军治. 2008. 新疆阿尔泰山蒙库同造山斜长花岗岩年代学、地球化学及其地质意义. 地质学报, 82(4): 485~499.

袁峰, 周涛发, 岳书仑. 2001. 阿尔泰山诺尔特地区花岗岩形成时代及成因类型. 新疆地质, 19(4): 292~296.

曾乔松, 陈广浩, 王核, 单强. 2007. 阿尔泰山冲乎尔盆地花岗岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义. 岩石学报, 23(8): 1921~1932.

张旗, 周国庆. 2001. 中国蛇绿岩. 北京: 科学出版社, 1~182.

张旗, 王焰, 李承东, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义. 岩石学报, 25(9): 2249~2269.

张招崇, 闫升好, 陈柏林, 周刚, 贺永康, 柴凤梅, 何立新, 万渝生. 2006. 新疆东准噶尔北部俯冲花岗岩的 SHRIMP U-Pb 锆石定年. 科学通报, 51: 1565~1574.

赵振华, 王中刚, 邹天人, 增田章. 1993. 阿尔泰山花岗岩类 REE 及 O、Pb、Sr、Nd 同位素组成及成岩模型. 见: 涂光炽, 主编. 新疆北部固体地球科学新进展. 北京: 科学出版社, 239~266.

周刚, 张招崇, 罗世宾, 何斌, 王祥, 应立娟, 赵华, 李爱红, 贺永康. 2007a. 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. 岩石学报, 23(8): 1909~1920.

周刚, 秦纪华, 张招崇, 张立武, 应力娟, 阿合买提·加尼木汗, 毛伟民, 何斌, 邓江, 蔡永彪. 2007b. 新疆富蕴县苏普特一带双峰式火山岩的发现及其地质意义. 地质论评, 53(3): 337~349.

Belousova E A, Griffin W L, O Reilly S Y, et al. 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. Contributions to Mineralogy and Petrology, 143: 602~622.

Berzin N A and Dobretsov N L. 1994. Geodynamic evolution of Southern Siberia in Late Precambrian—Early Paleozoic time. In: Coleman R G. ed. Reconstruction of the Paleo-Asian Ocean. Utrecht, the Netherlands: VSP International Sciences

- Publishers, 53~70.
- Berzin N A, Coleman R G, Dobretsov N L, Zonenshain L P, Xiao X and Chang E Z. 1994. Geodynamic map of the western of the Paleo-Asian Ocean. *Russian Geology and Geophysics*, 35:2~22.
- Claesson S, Vetrin V, Bayanova T et al. 2000. U-Pb zircon age from a Devonian carbonatite dyke, Kola peninsula, Russia?; a record of geological evolution from the Archaean to the Palaeozoic. *Lithos*, 51(1~2):95~108.
- Condie K C. 1986. Geochemistry and tectonic setting of early proterozoic supercrustal rocks in the southwestern United States. *Journal of Geology*, 94: 845~864.
- Franca Lanci L, Taylor S R, Mcculloch M T. 1993. Geochemical and isotopic variations in the calcalkaline rocks of Aeolian arc, southern Tyrrhenian Sea, Italy; constraints on magma genesis. *Contrib Mineral Petrol*, 113: 300~313.
- Li Jinyi, Xiao Wenjiao, Wang Kezhao, Sun Guihua and Gao Liming. 2003. Neoproterozoic—Paleozoic tectonostratigraphy, magmatic activities and tectonic evolution of eastern Xinjiang, NW China. In: Mao Jinwen, Goldfarb R J, Seltman R, Wang Deng Hong, Xiao Wenjiao and Hart C. eds. *Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan*. LAGOD Guidebook series 10; CERCAMS/NHM, London. 31~74.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gunther Detlef, Xu Juan, Gao Changgui, Chen Haihong. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257: 34~43.
- Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett M N and Whitehouse M J. 2008. Plesovice zircon — A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249: 1~35.
- Pearce J A, Harris N B L and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25:956~983.
- Peccerillo R and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contrib Mineral Petrol*, 58: 63~81.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides major and minor elements. *Lithos*, 22:247~263.
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry; Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*, 184:123~138.
- Sengor A M C and Natalin B A. 1996. Paleotectonics of Asia; fragments and synthesis. In: Yin A., Harrison M, eds. *The tectonic evolution of Asia*. Cambridge University Press, 486~640.
- Sun Min, Yuan Chao, Xiao Wenjiao, Long Xiaoping, Zhao Guochun, Lin Shoufa, Wu Fuyuan, Kroner A. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of gneissic rocks from the Chinese Altai; Progressive accretionary history in the Early to Middle Paleozoic. *Chemical Geology*, 247:352~383.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. *Geological Society Special Publication*, 42:313~345.
- Taylor S R and Mclennan S M. 1985. *The continental crust: its composition and evolution*. Blackwell/Oxford Press, 1~312.
- Wang Tao, Hong Dawei, Jahn B M, Tong Ying, Wang Yanbin, Han Baofu, Wang Xiaoxia. 2006. Timing, petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China; implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen. *The Journal of Geology*, 114:735~751.
- Wilson M. 1989. *Igneous petrogenesis*. London: Unwin Hyman Press, 295~323.
- Windley B F, Kroener A, Guo J, Qu G, Li Y and Zhang C. 2002. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai Orogen, NW China; new zircon age data and tectonic evolution. *Journal of Geology*, 110(6):719~737.
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Badarch G, Sun Shu, Li Jiliang, Qin Kezhong and Wang Zongqi. 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids; implications for the growth of Central Asia. *Journal of the Geological Society*, London, 161:339~342.
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Yuan Chao, Sun Min, Han Chunming, Lin Shoufa, Chen Hanlin, Yan Quanren, Liu Dunyi, Qin Kezhong, Li Jiliang, Sun Shu. 2009. Palaeozoic multiple subduction—accretion processes of the southern Altaids. *Journal of Science*, 309:221~270.
- Xu Jifeng, Castillo P R, Chen Fanrong, Niu Hecai, Yu Xueyuan, Zhen Zuoping. 2003. Geochemistry of late Paleozoic mafic igneous rocks from the Kuerti area, Xinjiang, northwest China: implications for backarc mantle evolution. *Chemical Geology*, 193:137~154.
- Yakubchuk A, Seltmann R and Shatov V. 2003. Tectonics and metallogeny of the western part of the Altaid orogenic collage. In: Mao Jinwen, Goldfarb R J, Seltman R, Wang Deng Hong, Xiao Wenjiao and Hart C. eds. *Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan*. Proceedings volume of the international symposium of the IGCP-473 Project in Urumqi and Guidebook of the Filed Excursion in Xinjiang, China; August 9-21, 2003. London: Centre for Russian and Centre Asian Mineral Studies, Natural History Museum, 7~16.
- Yuan C, Sun M, Xiao W J, Li X H, Chen H L, Lin S F, Xi X P and Long X P. 2007. Accretionary orogenesis of the Chinese Altai; Insights from Paleozoic granitoids. *Chemical Geology*, 242:22~39.
- Zhang Zhaochong, Yan Shenhao, Chen Bailin, Zhou Gang, He Yongkang, Chai Fengmei, He Lixin, Wan Yusheng. 2006. SHRIMP zircon U-Pb dating for subduction-related granitic rocks in the northern part of east Junggar, Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 51(8): 952~962.
- Zhu Yongfeng, Zeng Yishan, Gu Libing. 2006. Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite No. 3 vein and related granites in the Keketuohai region, Altay Mountains, northwest China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27:61~77.
- Zonenshain L P, Kuzmin M I and Natapov L M. 1990. *Geology of the USSR: A plate tectonic synthesis*. American Geophysical Union, *Geodynamics Series Monograph*, 21:242.

Study on Chronology and Genesis of Granite in the Wutubulake Iron Deposit District, Southern Margin of Altay

ZHANG Zhixin¹⁾, YANG Fuquan¹⁾, CHAI Fengmei²⁾, LIU Feng¹⁾, GENG Xinxia¹⁾,
LÜ Shujun³⁾, JIANG Liping²⁾, ZHONG Tianzhi⁴⁾

1) *Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Land and Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;*

2) *College of Geology & Prospecting Engineering Program, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang, 830046;*

3) *Faculty of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083;*

4) *Xinjiang Fuyun County Jinshan Mining Corporation, Fuyun, Xinjiang, 836100*

Abstract: LA-ICP-MS U-Pb zircon dating on the plagiogranite and biotite plagiogranite from the Wutubulake iron deposit district, southern margin of Altay, Xinjiang, yielded concordant ages of 385.6~2.3 Ma (MSDW=0.13) and 387.7~2.1 Ma (MSDW=0.23), indicates that the two comagmatic plutons were formed at the beginning of the Middle Devonian. The Wutubulake iron deposit is closely related to the magmatic intrusion, writers hereby confine the iron deposit formed at the beginning of the Middle Devonian appreciably later than 388~386 Ma. The Wutubulake plagiogranite and biotite plagiogranite are characterized by enrichment of silica ($\text{SiO}_2 = 66.01\% \sim 79.14\%$) and Na ($\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$). The $A/\text{CNK} \{ A/\text{CNK} = n(\text{Al}_2\text{O}_3) / [n(\text{CaO}) + n(\text{Na}_2\text{O}) + n(\text{K}_2\text{O})] \}$ ratios are less than 1.1, indicates that both of them are weakly peraluminous. Geochemically, the Wutubulake granites are enriched in Th, Ta, Hf, but depleted in Rb, Ba, K, Sr, P. The REE patterns are characterized by enrichment of LREE [$(\text{La}/\text{Yb})_N = 2.46 \sim 7.24$], with moderately or significantly Eu negative anomalies. In combination with previous studies, writers concluded that the Wutubulake plutons were formed in continental arc at active extensional continental margin setting related to the subduction of plate.

Key words: granite; zircon LA-ICP-MS U-Pb dating; Geochemistry; Wutubulake; Altay Mountains; Xinjiang