

· 专题研究 ·

新疆白干湖地区花岗岩年代学、地球化学研究 及其构造意义

王增振¹ 韩宝福¹ 丰成友² 李国臣³

(1. 教育部造山带与地壳演化重点实验室, 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 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; 3. 核工业北京地质研究院, 北京 100029)

摘要:新疆白干湖地区处于东昆仑-祁漫塔格构造带与阿尔金地块的结合部位, 出露的巴什尔希岩浆序列对理解该区早中志留世的构造环境有重要意义。本文在巴什尔希岩浆序列中白干湖岩体的不同部位采集了二长花岗岩 (BGH-1) 和正长花岗岩 (BGH-4) 两件样品, 并进行了详细的岩相学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究。白干湖岩体含有白云母、石榴子石等特征矿物, 其 A/CNK 和 A/NK 的分布范围分别是 1.07~1.12 和 1.41~1.59, 属于弱过铝质高钾钙碱性 S 型花岗岩, 并具有富集 LREE 和 LILEs, 亏损 HFSEs, Nb, P, Ti 明显负异常的特点。锆石 U-Pb 定年结果显示, 二长花岗岩形成于 428.2 ± 4.2 Ma, 正长花岗岩形成于 422.5 ± 2.3 Ma。本文和前人的研究成果表明, 巴什尔希岩浆序列具有 S 型花岗岩与 A 型花岗岩共生的特点, 主要活动时代为早中志留世 (433~421 Ma) 形成于后碰撞伸展构造体制。然而, 在白干湖断裂以东至格尔木的东祁漫塔格, 早中生代岩浆活动记录了晚奥陶世—早志留世俯冲、中志留世—早泥盆世碰撞和早泥盆世晚期开始后碰撞的演化过程, 其中东祁漫塔格早中志留世岩浆岩和白干湖断裂西侧的巴什尔希岩浆序列分别形成于不同的构造环境, 因此二者很可能属于不同的构造体系。

关键词: 花岗岩, 锆石 U-Pb 定年, 地球化学特征, 构造环境, 白干湖, 新疆

中图分类号: P588.12⁺1; P597⁺.3; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)04-0597-20

Geochronology, geochemistry and tectonic significance of granites in Baiganhu area, Xinjiang

WANG Zeng-zhen¹, HAN Bao-fu¹, FENG Cheng-you² and LI Guo-chen³

(1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution of Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Resource Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 3. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

Abstract: Baiganhu area is situated between East Kunlun-Qimantag tectonic zone and Altun block, where the Bashierxi granite series is the key to understanding the tectonic setting of this area during the Early-Middle Silurian. In this paper, a monzonitic granite (BGH-1) and a syenogranite (BGH-4) samples were collected from a single pluton and used for petrographic observations as well as geochronological and geochemical studies. This pluton contains muscovite and garnet, and its A/CNK and A/NK ratios are in the ranges of 1.07~1.12 and 1.41~1.59, respectively. Thus this pluton is peraluminous and high-K calc-alkaline S-type granite. In addition, this pluton is characterized by enrichment of LREE and LILEs and depletion of HFSEs, with obvious negative

收稿日期: 2013-11-18; 修订日期: 2014-06-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41172076); 中国博士后科学基金项目 (20090460132); 中国地质调查局地质调查项目 (1212011085528); 中国地质调查局高层次地质人才培养计划 (201309); 青年地质英才培养计划 (201112)

作者简介: 王增振 (1988-), 男, 汉族, 博士研究生, 构造地质学专业, E-mail: pkuwzz@163.com.

anomalies of Nb, P and Ti. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating reveals that the monzonitic granite and syenogranite were emplaced at 428.2 ± 4.2 Ma and 422.5 ± 2.3 Ma, respectively. The data obtained by the authors and previously published data show that the calc-alkaline S-type granites and A-type granites are coexisting in Bashierxi granite series and they were formed in a post-collisional environment during the Early-Middle Silurian ($433 \sim 421$ Ma). However, the Early-Middle Paleozoic magmatism in eastern Qimantag between Golmud and Baiganhu fault to the east of the Baiganhu fault has recorded a complete process of Late Ordovician to Early Silurian subduction, Middle Silurian to Early Devonian collision, and late Early Devonian post-collision. Apparently, the Early-Middle Silurian magmatic plutons in eastern Qimantag and the Bashierxi granite series, which are outcropped in Baiganhu area to the west of the Baiganhu fault, were formed in different tectonic environments, thus probably belonging to different tectonic evolution systems.

Key words: granite; zircon U-Pb dating; geochemistry; tectonic; Baiganhu; Xinjiang

东昆仑构造-岩浆岩带位于青藏高原北缘,记录了早古生代东昆仑造山和晚古生代—早中生代古特提斯构造活动,新生代以来又受到了印度-欧亚板块碰撞造山的强烈影响。研究该区古生代和中生代的构造演化,须考虑到新生代构造活动的叠加和改造。祁漫塔格属于东昆仑西段(图 1a)构造-岩浆活动强烈,以花岗岩类的巨量出露为特征。位于祁漫塔格西段的白干湖地区夹持在阿尔金断裂与白干湖断裂之间,处于东昆仑-祁漫塔格构造带与阿尔金地块的结合部位。北东-北东东走向的阿尔金断裂是一条长期活动的巨型左旋走滑断裂带,带内有蛇绿混杂岩及超高压变质岩等出露,一般认为是东昆仑造山带与阿尔金地块的分界(张建新等, 2001; 刘良等, 2003, 2007, 2009)。白干湖断裂与阿尔金断裂大致平行且位于其南侧,也具有左旋走滑的性质,并将祁漫塔格构造-岩浆岩带分为东侧南东走向和西侧北东走向的两段,白干湖地区出露的巴什尔希岩浆序列是北东走向的西祁漫塔格岩浆岩带的组成部分(图 1a; 黎敦朋等, 2010)。

巴什尔希岩浆序列的岩石类型主要是二长花岗岩和正长花岗岩(图 1b),形成于早中志留世(包亚范等, 2008; 高永宝等, 2011; 李国臣等, 2012),但是目前对该岩浆序列形成的构造环境还存在不同认识。如包亚范等(2008)根据 S 型花岗岩的存在认为巴什尔希岩浆序列形成于同碰撞造山阶段,而高永宝等(2011)和李国臣等(2012)根据柯可卡尔德岩体的 A 型花岗岩特征认为其形成于后碰撞阶段。白干

湖地区在早中志留世究竟处于哪种构造体制? 若其确实处于后碰撞阶段伸展构造环境,则与白干湖断裂东侧的东祁漫塔格岩浆岩带在早中志留世主要发育俯冲-碰撞相关岩浆岩的事实相矛盾(青海省地质调查院, 2004a^①, 2004b^②; 王秉璋等, 2012; 曹世泰等, 2011),这是否意味着白干湖断裂东、西两侧的早中志留世岩浆活动属于不同的构造体系?

本文在白干湖岩体的不同部位采集了两件花岗岩样品(图 1b),并进行了详细的岩相学、年代学和地球化学研究。结合巴什尔希岩浆序列中其它花岗岩体的形成年龄和地球化学特征,分析了该岩浆序列形成的构造环境。然后通过与东祁漫塔格岩浆活动时空格架的对比分析,初步探讨了白干湖地区早中志留世岩浆活动的构造归属问题。

1 地质背景

白干湖地区巴什尔希岩浆序列展布于阿尔金断裂以南和白干湖断裂以北的区域,由西南到东北发育了与巴什尔希岩浆序列相关的巴什尔希、白干湖、柯可卡尔德等 3 个钨锡矿区(图 1b)。以白干湖断裂为界,断裂北侧出露古元古界金水口群,南侧出露志留系白干湖组。金水口群岩性包括灰色二云母石英片岩、浅绿色绿泥石绢云母石英片岩、变质石英砂岩、变玄武岩等,夹有硅质大理岩透镜体或条带,是一套陆源碎屑和碳酸盐岩沉积建造的变质岩系。白干湖组岩性包括灰绿色-深灰色粉砂岩、灰绿色粉砂

① 青海省地质调查院. 2004a. 祁漫塔格造山带构造组成与演化及新构造运动[R]. 1:25 万库朗米其提幅(J46 C 003001)区域地质调查项目专题研究报告.

② 青海省地质调查院. 2004b. 1:25 万库朗米其提幅(J46 C 003001)区域地质调查报告[R].

质泥岩、粉砂质绢云母板岩及千枚岩等，是一套笔石页岩相浅变质沉积建造。

白干湖地区构造复杂，具有多期活动的特点。褶皱构造的发育可分为加里东早期顺层掩卧褶皱和流变褶皱、加里东晚期紧闭褶皱、后期叠加北西轴向宽缓褶皱 3 个阶段，断裂构造可分为北东向-北北东向和北西向-北北西向两大组(李大新等, 2013)。白

干湖断裂是区内的主要断裂构造，总体走向约 60°，宽 2~3 km，延伸长度大于 150 km，南西端被昆中断裂切断(黎敦明等, 2010)。此外，该区还发育不对称碎斑系、S-C 组构等韧性剪切构造。

白干湖地区的岩浆活动主要是巴什尔希岩浆序列，出露在古拉木萨伊-托格热萨伊-柯可卡尔德一带，呈规模不等的岩基、岩株产出。岩浆活动可分为

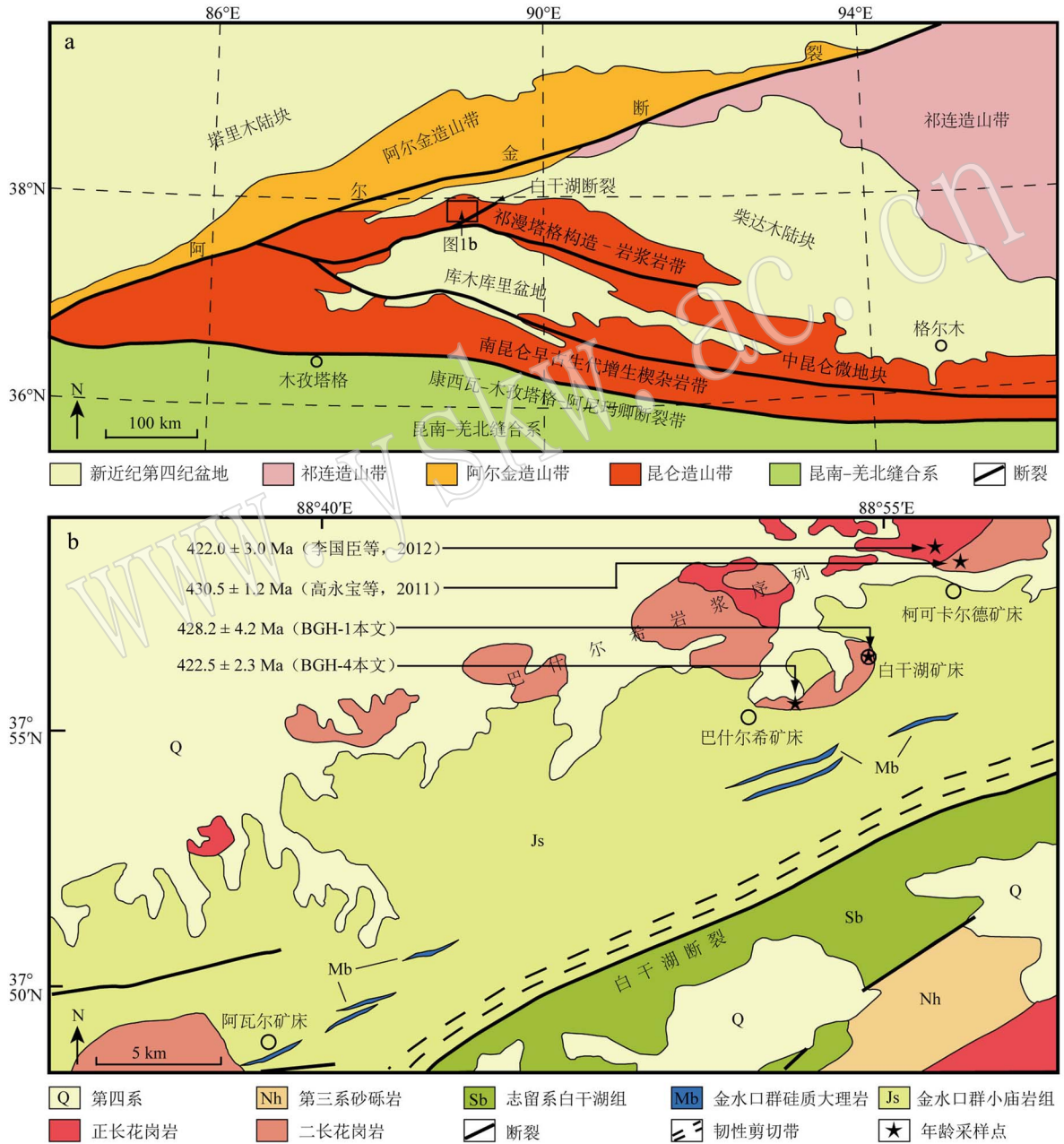


图 1 东昆仑祁漫塔格及邻区构造简图[a, 据李荣社等(2008)修改]和白干湖地区地质简图[b, 据李大新等(2013)修改]
Fig. 1 Tectonic sketch map of Qimantag and adjacent areas, East Kunlun (a, modified after Li Rongshe et al., 2008) and geological sketch map of Baiganhu area (b, modified after Li Daxin et al., 2013)

6 个期次,从早到晚依次是托格热萨伊片麻状黑云母二长花岗岩、古拉木萨伊中粒二长花岗岩、白干湖中细粒似斑状二长花岗岩、柯可卡尔德粗粒似斑状二长花岗岩、吊草滩中粒似斑状钾长花岗岩、水草泉粗粒钾长花岗岩(包亚范等,2008;高晓峰等,2010b),呈现出岩浆脉动、酸性程度逐渐增高的特点。

2 岩体特征

白干湖岩体为二长花岗岩-正长花岗岩,呈岩株侵位于金水口群变质岩系中,出露于白干湖矿区与巴什尔希矿区之间,白干湖钨锡矿床就产出在该岩体的东端(图 1b)。

二长花岗岩样品编号为 BGH-1,采于白干湖钨锡矿床西侧,地理坐标 $37^{\circ}56'18''N, 88^{\circ}54'21''E$,海拔 4 196 m。岩体野外呈灰白色(图 2a),中粗粒花岗结构,块状构造,可见球形风化。矿物成分主要包括石英(30%~35%)、碱性长石(15%~20%)、斜长石(30%~35%)、黑云母(5%~10%)、白云母(5%~10%)。副矿物可见磷灰石、锆石、石榴子石及不透明磁铁矿。石英多为他形粒状,碱性长石中微斜长石较多,格子双晶发育,表面泥化严重,斜长石可见聚片双晶,发生强烈的绢云母化及表面泥化,部分发生碳酸盐化,黑云母多蚀变为绿泥石,而白云母非常新鲜,且有大量白云母晶体产出在长石晶内(图 2c、2e)。

正长花岗岩样品编号为 BGH-4,采样位置距巴什尔希矿床较近(图 1b),地理坐标为 $37^{\circ}55'24''N, 88^{\circ}52'44''E$,海拔 4 120 m。岩体呈灰白-肉红色(图 2b),中粒、似斑状结构,斑晶多为微斜长石,块状构造。矿物成分主要包括石英(30%~35%)、碱性长石(35%~40%)、斜长石(15%~20%)、白云母(5%~10%)、黑云母(约 5%)。副矿物可见磷灰石、锆石、石榴子石及不透明磁铁矿。石英多为他形粒状,碱性长石中半数以上为微斜长石,格子双晶发育,可见正长石卡斯巴双晶,斜长石发生严重绢云母化和泥化,甚至整个晶体完全蚀变成为假晶,少量发生碳酸盐化,部分黑云母发生绿泥石化,而白云母普遍较为新鲜(图 2d、2f)。

3 岩体年代学

3.1 分析方法

将二长花岗岩(BGH-1)和正长花岗岩(BGH-4)

样品破碎后,采用常规的重液和磁选方法分离重矿物,然后在双目镜下手工挑选锆石。锆石样品靶的制备参考宋彪等(2002)。在光学显微镜下对样品进行仔细地透、反射光观察并拍照,然后在北京大学物理学院电镜室 Quanta 200 FEG 型扫描电子显微镜上进行锆石阴极发光(CL)图像分析并拍照。锆石颗粒及点位的选择据 Corfu 等(2003)。锆石 U-Pb 同位素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室激光等离子质谱仪(LA-ICP-MS)上完成,分析仪器由 Agilent 7500ce 等离子质谱仪和 193 nm 激光剥蚀系统(COMPexPro102)组成。实验原理及流程参考袁洪林等(2003)。采用 Andersor(2002)的方法做普通铅校正,应用 ISOPLOT 程序(Ludwig, 2003)进行年龄计算和作图。单点同位素比值和年龄的误差均为 1σ ,谐和图及加权平均年龄的误差为 2σ ,置信度为 95%。

3.2 岩体侵位时代

二长花岗岩(BGH-1)锆石自形、透明、短柱-长柱状,长约 100~250 μm ,宽约 50~100 μm ,具有良好的岩浆震荡环带(图 3)。部分锆石具有核-幔结构,锆石核亦可见清晰的岩浆震荡环带。所有颗粒均未见变质作用相关的亮边。选取 25 颗锆石做 25 点分析,测试结果见表 1。其 U、Th 含量分别为 $209 \times 10^{-6} \sim 1\,383 \times 10^{-6}$ 和 $45 \times 10^{-6} \sim 410 \times 10^{-6}$, Th/U 比值在 0.12~0.68 之间,说明测试颗粒均为岩浆型锆石。其中 16 个点的年龄值非常集中且谐和性好, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布范围是 $418 \pm 4 \text{ Ma} \sim 441 \pm 5 \text{ Ma}$,加权平均值为 $428.2 \pm 4.2 \text{ Ma}$ (MSWD=3.4),代表岩体侵位年龄(图 4a)。此外,点 2、5、9、12、15 独立成簇且谐和性较好(图 4a 中虚线椭圆), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布在 $407 \pm 4 \text{ Ma} \sim 411 \pm 4 \text{ Ma}$,加权平均值为 $408.3 \pm 3.8 \text{ Ma}$ (MSWD=0.16)。这个年龄值与丰成友等(2013)在柯可卡尔德矿区得到的矿化花岗岩脉内白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 $411.7 \pm 2.6 \text{ Ma}$ 以及黑钨矿石英脉壁云母线中的白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 $(412.8 \pm 2.4 \text{ Ma})$ 在误差范围内是一致的,表明这 5 颗锆石可能受该期热液的影响较大。点 19($1\,342 \pm 12 \text{ Ma}$)与点 24($492 \pm 5 \text{ Ma}$)的分析点位同时覆盖了锆石核及其外部锆石幔,可能反映捕获性锆石核与岩浆阶段锆石幔的混合年龄。而点 25($425 \pm 4 \text{ Ma}$)虽然落在锆石核上,但其年龄值与岩体侵位年龄基本一致,具体原因还需进一步研究。点 08($281 \pm 3 \text{ Ma}$)和点 13($384 \pm 4 \text{ Ma}$)年龄

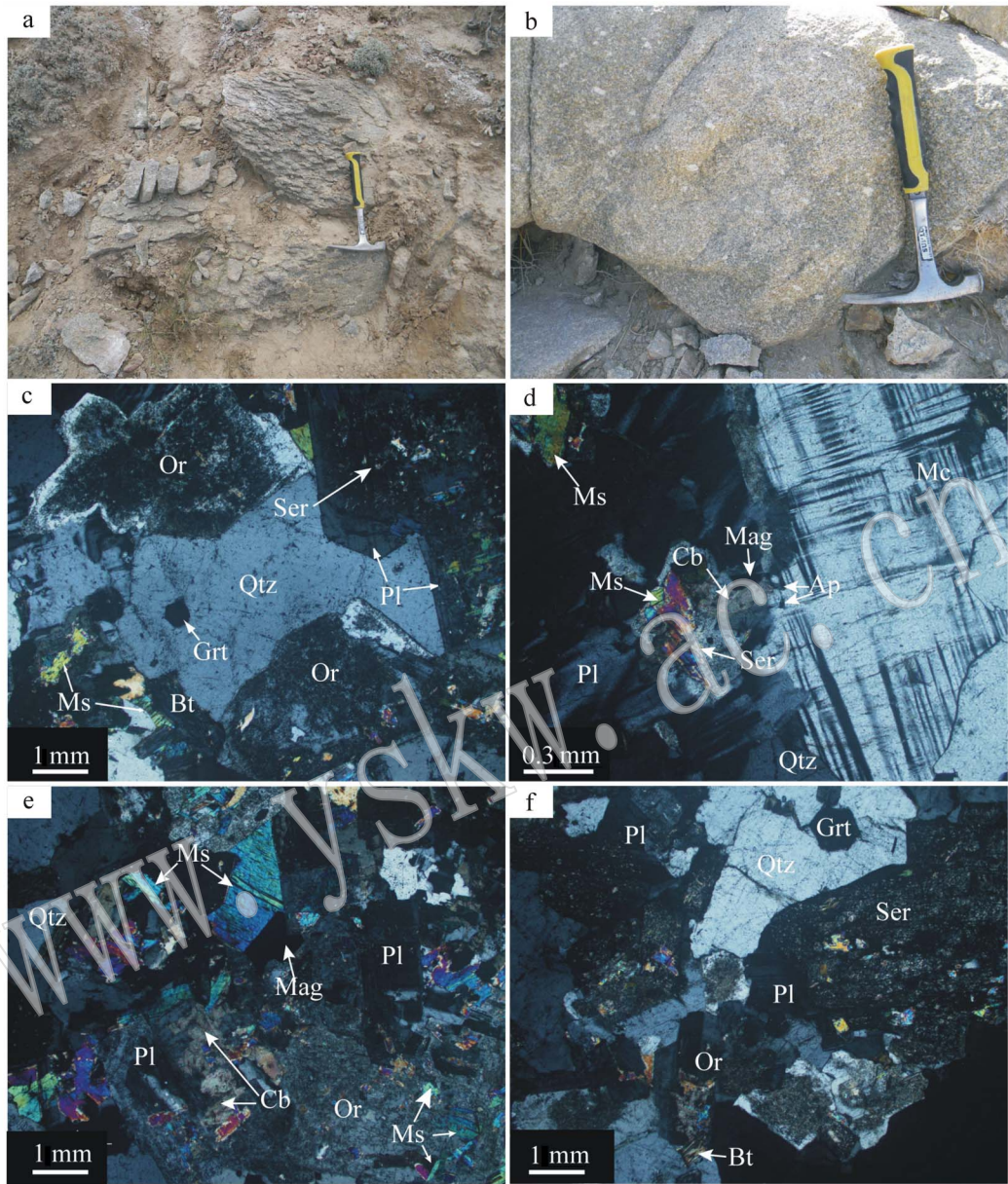


图 2 白干湖岩体野外特征及镜下显微照片(正交偏光)

Fig. 2 Field and microscopic photographs (crossed nicols) of Baiganhu pluton

a—二长花岗岩；b—正长花岗岩；c—BGH-1，石榴子石全消光并具完好六边形晶形，斜长石聚片双晶发生绢云母化和泥化，黑云母发生绿泥石化；d—BGH-4，微斜长石格子双晶，斜长石发生绢云母化及碳酸盐化；e—BGH-1，白云母呈二级蓝绿干涉色且产出在长石晶内，斜长石发生碳酸盐化；f—BGH-4，正长石卡斯巴双晶，斜长石聚片双晶发育且发生绢云母化成为假晶，石榴子石全消光，晶形为六边形；矿物符号：Ap—磷灰石；Bt—黑云母；Cb—碳酸盐；Grt—石榴子石；Mag—磁铁矿；Mc—微斜长石；Ms—白云母；Or—正长石；Pl—斜长石；Qtz—石英；Ser—绢云母

a—monzonitic granite; b—syenogranite; c—BGH-1, full extinction and perfect hexagonal crystalline form of garnet, polysynthetic twinning of plagioclase which experienced sericitization and argillization, chloritization of biotite; d—BGH-4, crossed twinning of microcline, sericitization and carbonation of plagioclase; e—BGH-1, the second-order blue-green interference color of muscovite which crystallized in plagioclase, carbonation of plagioclase; f—BGH-4, Carlsbad twinning of orthoclase, polysynthetic twinning of plagioclase which changed into the fake crystal of sericite, full extinction and perfect hexagonal crystalline form of garnet; Ap—apatite; Bt—biotite; Cb—carbonate; Grt—garnet; Mag—magnetite; Mc—microcline; Ms—muscovite; Or—orthoclase; Pl—plagioclase; Qtz—quartz; Ser—sericite

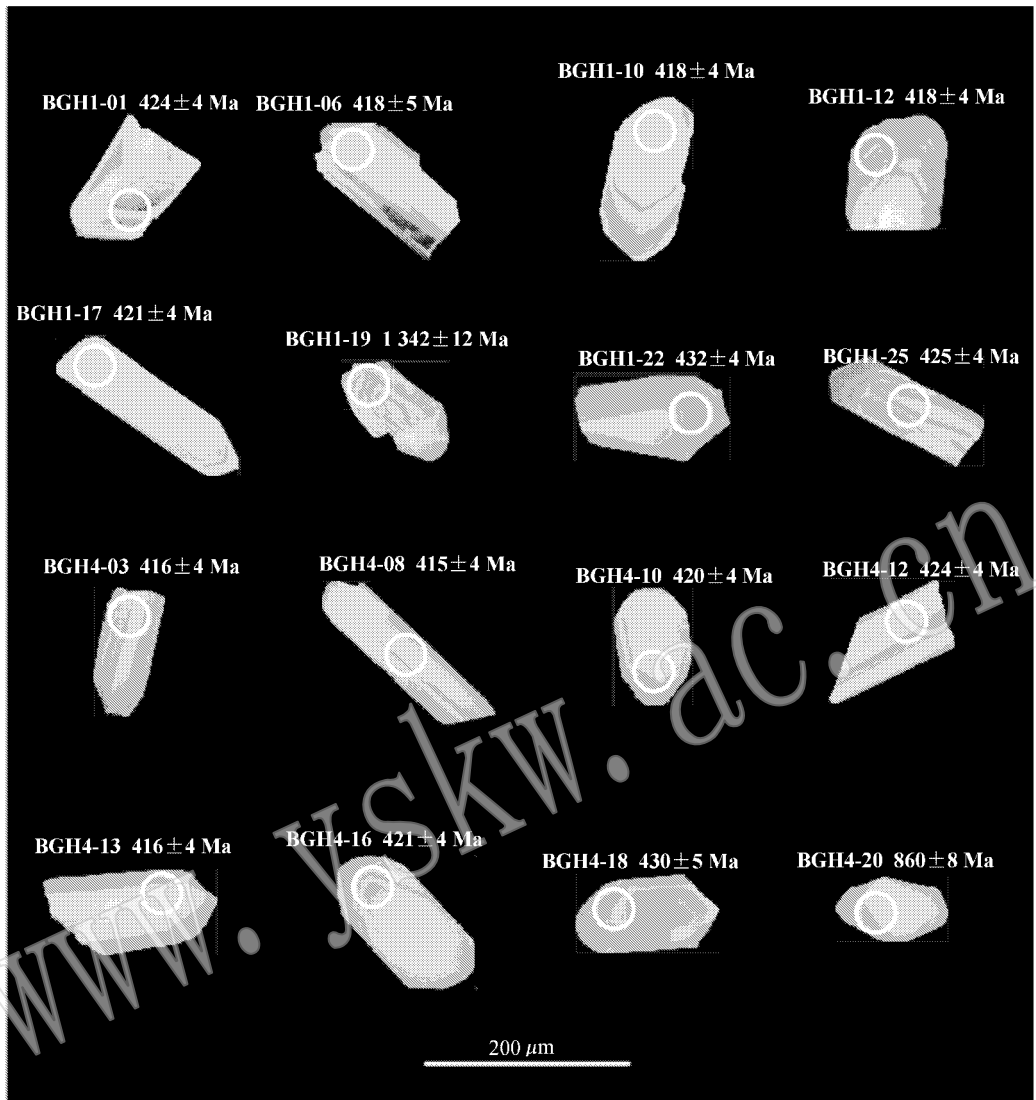


图 3 白干湖岩体锆石阴极发光 (CL) 照片及测点位置

Fig. 3 Representative CL images and sites of analyzed points of zircons in Baiganhu pluton

值非常年轻,可能受后期热事件的影响。

正长花岗岩 (BGH-4) 锆石自形程度高,透明,短柱-长柱状,长约 $100\sim 200\ \mu\text{m}$,宽约 $50\sim 100\ \mu\text{m}$,发育典型的岩浆震荡环带(图 3)。此样品中也有锆石核出现,部分核在 CL 图像中亮度很高且内部结构模糊,其余则具有明显的岩浆振荡环带。选取 25 颗锆石岩浆结构清晰的 25 个点进行分析,测试结果见表 1。锆石 U、Th 含量分别为 $214\times 10^{-6}\sim 997\times 10^{-6}$ 和 $72\times 10^{-6}\sim 474\times 10^{-6}$,Th/U 比值为 $0.13\sim 0.76$,表明测试颗粒均为岩浆型锆石。其中 19 个点的年龄值集中分布,谐和性很好, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布范围是 $415\pm 4\ \text{Ma}\sim 432\pm 5\ \text{Ma}$,加权平均值

为 $422.5\pm 2.3\ \text{Ma}$ (MSWD = 1.4),代表岩体侵位年龄(图 4b)。点 20 ($860\pm 8\ \text{Ma}$) 与点 04 ($508\pm 5\ \text{Ma}$) 明显偏老,二者的分析点位覆盖了具岩浆震荡环带的锆石核及外部锆石幔(图 3),可能是捕获性锆石核与岩浆阶段锆石幔的混合年龄。点 01 ($465\pm 5\ \text{Ma}$) 和点 15 ($463\pm 5\ \text{Ma}$) 虽然谐和性较好,但明显偏老,而且与附近柯可卡尔德早期岩浆作用时间 ($458\pm 9\ \text{Ma}$; LA-ICP-MS; 高晓峰等, 2010b) 几乎相同,因此推测是捕获的早期岩浆锆石。点 07 ($364\pm 4\ \text{Ma}$) 和点 19 ($391\pm 4\ \text{Ma}$) 不谐和且年龄值偏低,可能受到后期热事件的影响。

表 1 白干湖岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年数据
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for Baiganhu pluton

测试点	同位素比值				Th/U	年龄/Ma					
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ		
BGH-1											
01	0.055 27	0.000 74	0.517 51	0.006 82	0.067 96	0.000 70	0.15	423	5	424	4
02*	0.056 54	0.001 30	0.513 74	0.010 48	0.065 91	0.000 70	0.22	473	7	411	4
03	0.053 96	0.000 83	0.520 82	0.007 83	0.070 06	0.000 74	0.26	369	5	437	4
04	0.055 26	0.000 79	0.514 38	0.007 21	0.067 56	0.000 71	0.23	423	5	421	4
05*	0.058 33	0.001 21	0.523 87	0.010 58	0.065 19	0.000 75	0.35	542	7	407	5
06	0.054 54	0.001 61	0.503 50	0.013 68	0.066 96	0.000 77	0.22	393	6	418	5
07	0.056 21	0.000 97	0.521 62	0.008 78	0.067 35	0.000 74	0.12	461	6	420	4
08*	0.056 74	0.001 36	0.347 97	0.007 52	0.044 48	0.000 46	0.15	481	6	281	3
09*	0.055 85	0.001 39	0.502 30	0.012 15	0.065 28	0.000 80	0.36	446	8	408	5
10	0.056 28	0.001 03	0.519 15	0.009 23	0.066 95	0.000 74	0.22	463	6	418	4
11	0.057 17	0.001 13	0.544 45	0.010 42	0.069 12	0.000 78	0.28	498	7	431	5
12*	0.054 62	0.000 85	0.491 93	0.007 43	0.065 37	0.000 69	0.22	397	5	408	4
13*	0.056 50	0.000 99	0.478 16	0.008 13	0.061 42	0.000 67	0.33	472	6	384	4
14	0.053 62	0.000 71	0.521 75	0.006 73	0.070 62	0.000 72	0.18	355	4	440	4
15*	0.055 78	0.001 06	0.500 87	0.009 26	0.065 17	0.000 73	0.30	444	6	407	4
16	0.057 53	0.002 14	0.561 75	0.019 90	0.070 82	0.000 82	0.38	512	13	441	5
17	0.056 75	0.000 99	0.527 93	0.009 00	0.067 52	0.000 74	0.41	482	6	421	4
18	0.053 46	0.001 02	0.512 12	0.009 52	0.069 53	0.000 78	0.68	348	6	433	5
19*	0.101 00	0.001 21	3.221 37	0.038 07	0.231 50	0.002 36	0.54	1 643	10	1 342	12
20	0.054 92	0.000 83	0.518 78	0.007 62	0.068 56	0.000 72	0.37	409	5	427	4
21	0.054 95	0.000 80	0.525 16	0.007 50	0.069 36	0.000 73	0.26	410	5	432	4
22	0.053 49	0.000 85	0.510 54	0.007 91	0.069 28	0.000 74	0.21	350	5	432	4
23	0.053 22	0.000 86	0.516 27	0.008 15	0.070 40	0.000 75	0.26	338	5	439	5
24*	0.053 67	0.000 92	0.586 75	0.009 86	0.079 34	0.000 86	0.38	357	20	492	5
25	0.056 38	0.000 79	0.529 98	0.007 24	0.068 22	0.000 71	0.37	467	14	432	4

续表 1
Continued Table 1

测试点	同位素比值				Th/U				年龄/Ma						
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		1 σ		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		
	1 σ		1 σ		1 σ		1 σ		1 σ		1 σ		1 σ		
BGH-4															
01*	0.055 02	0.000 86	0.567 25	0.008 60	0.074 82	0.000 79	0.22	413	17	456	6	465	5		
02	0.054 73	0.000 79	0.514 50	0.007 22	0.068 23	0.000 71	0.17	401	15	421	5	425	4		
03	0.059 50	0.001 95	0.546 84	0.016 86	0.066 66	0.000 73	0.53	585	73	443	11	416	4		
04*	0.062 53	0.000 98	0.705 93	0.010 73	0.081 93	0.000 87	0.34	692	16	542	6	508	5		
05	0.053 93	0.000 84	0.509 35	0.007 75	0.068 55	0.000 72	0.28	368	17	418	5	427	4		
06	0.053 47	0.000 92	0.500 01	0.008 40	0.067 87	0.000 73	0.49	349	20	412	6	423	4		
07*	0.059 99	0.000 87	0.479 86	0.006 79	0.058 05	0.000 61	0.33	603	15	398	5	364	4		
08	0.056 02	0.001 03	0.513 13	0.009 18	0.066 48	0.000 74	0.32	453	21	421	6	415	4		
09	0.054 25	0.000 95	0.513 63	0.008 77	0.068 70	0.000 75	0.27	381	20	421	6	428	5		
10	0.056 33	0.001 03	0.522 29	0.009 25	0.067 28	0.000 74	0.42	465	21	427	6	420	4		
11	0.054 34	0.000 91	0.508 36	0.008 26	0.067 90	0.000 72	0.24	385	19	417	6	423	4		
12	0.054 55	0.000 82	0.510 70	0.007 46	0.067 95	0.000 71	0.41	394	16	419	5	424	4		
13	0.053 68	0.000 86	0.493 24	0.007 73	0.066 68	0.000 71	0.27	358	18	407	5	416	4		
14	0.054 38	0.000 93	0.519 93	0.008 66	0.069 39	0.000 75	0.36	387	19	425	6	432	5		
15*	0.057 48	0.001 27	0.589 47	0.011 47	0.074 38	0.000 77	0.24	510	50	471	7	463	5		
16	0.056 42	0.000 81	0.524 67	0.007 37	0.067 48	0.000 70	0.76	469	15	428	5	421	4		
17	0.054 68	0.000 87	0.516 89	0.008 01	0.068 59	0.000 73	0.25	399	17	423	5	428	4		
18	0.054 85	0.000 95	0.520 95	0.008 78	0.068 92	0.000 75	0.32	406	19	426	6	430	5		
19*	0.063 51	0.001 79	0.547 96	0.014 28	0.062 57	0.000 68	0.34	725	61	444	9	391	4		
20*	0.081 76	0.001 51	1.608 02	0.024 63	0.142 65	0.001 47	0.13	1 240	37	973	10	860	8		
21	0.053 71	0.000 74	0.495 88	0.006 68	0.066 99	0.000 69	0.25	359	14	409	5	418	4		
22	0.056 48	0.000 78	0.524 42	0.007 07	0.067 38	0.000 70	0.24	471	14	428	5	420	4		
23	0.054 66	0.000 78	0.512 90	0.007 12	0.068 09	0.000 71	0.35	398	15	420	5	425	4		
24	0.053 85	0.000 96	0.509 37	0.008 84	0.068 64	0.000 75	0.29	365	21	418	6	428	5		
25	0.054 23	0.000 87	0.500 37	0.007 80	0.066 96	0.000 71	0.27	381	18	412	5	418	4		

注:带*样点不计入年龄计算。

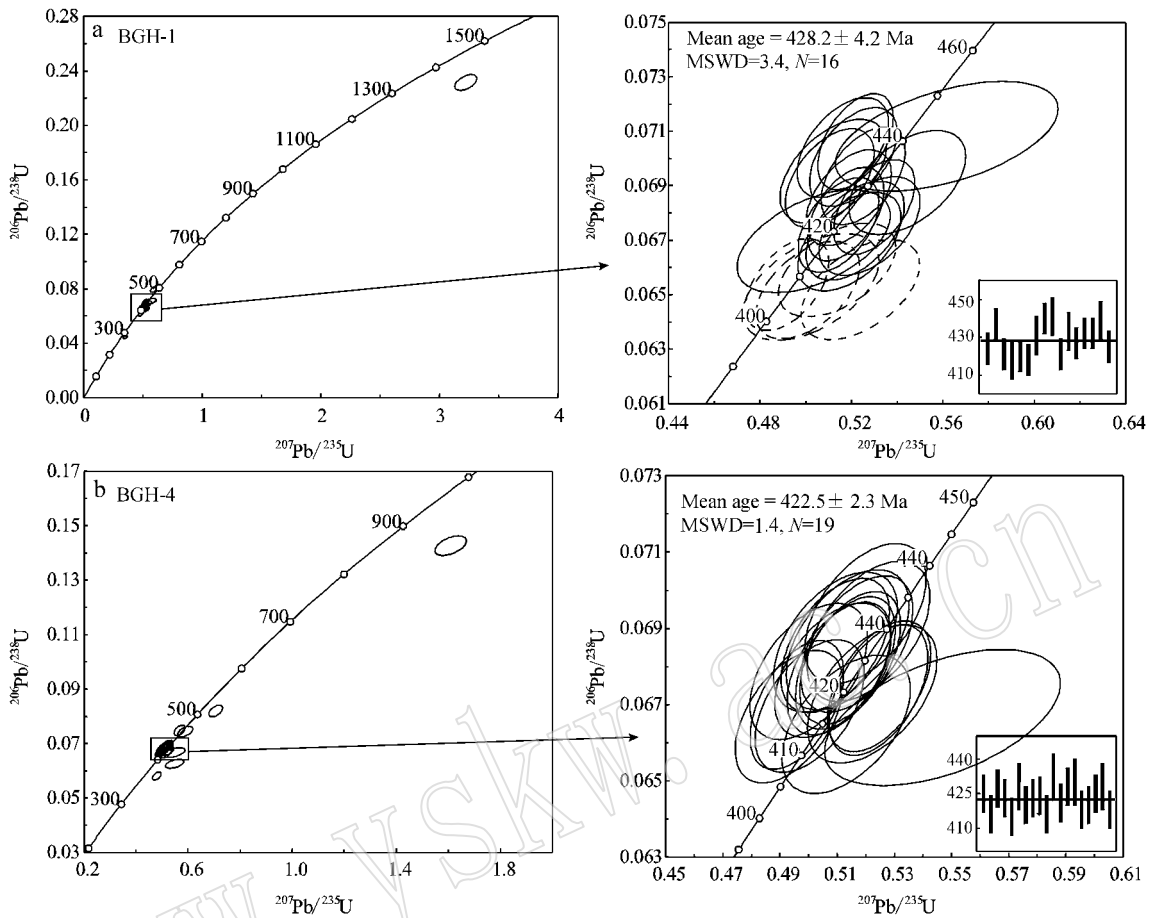


图 4 二长花岗岩(a, BGH-1)和正长花岗岩(b, BGH-4)锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 U-Pb concordia diagrams of zircons from monzonitic granite (a, BGH-1) and syenogranite (b, BGH-4)

4 地球化学特征

4.1 分析方法

在白干湖岩体范围内采集 5 块新鲜样品 (BGH-4.1、4.2、4.3、4.4、4.5) 并粉碎至 200 目, 全岩主量及微量元素分析在加拿大温哥华的 Acme Analytical Laboratories 进行。主要氧化物含量用 ICP-ES (等离子发射光谱) 法测定, 稀土元素和难溶元素含量用 ICP-MS 法测定。在王水中溶解 0.5 g 样品, 用 ICP-MS 测定包括 Pb 在内的贵金属和贱金属含量。标准岩石样品采用 SO-18、DS8 和 OREAS45CA, 大多数微量元素的相对标准误差小于 10%, V、Cr、Co、Ni、Th、U 等元素的分析误差小于 20%。测试结果见表 2。

4.2 主量元素特征

白干湖岩体具有富硅、碱的特点。SiO₂ 含量在 70.57%~71.73%, K₂O + Na₂O 含量为 6.79%~

7.61%。里特曼指数 σ 为 1.67~2.10, 属于钙碱性岩。在 SiO₂-K₂O 关系图中显示为高钾钙碱性系列 (图 5a)。K₂O/Na₂O 比值为 0.74~1.19, 其均值为 0.97。CaO 含量为 1.76%~2.20%, MgO 含量为 0.61%~0.73%, Mg[#] 为 37.2~38.2。Al₂O₃ 含量为 14.35%~15.18%。A/CNK 和 A/NK 值的分布范围分别为 1.07~1.12 和 1.41~1.59, 二者的均值分别为 1.09 和 1.48, 显示弱过铝质特征 (图 5b)。

4.3 稀土及微量元素特征

白干湖岩体稀土元素总量较高 (109×10^{-6} ~ 141×10^{-6}), 球粒陨石标准化的配分曲线呈右倾型 (图 6a)。LREE/HREE 比值为 6.69~7.68 (La/Yb)_N 比值为 6.78~9.08, 且 (La/Sm)_N 比值为 3.06~3.42 (Ga/Lu)_N 比值为 1.33~1.70, 表现为轻稀土元素相对富集且分馏较强, 而重稀土元素在配分曲线中较为平坦。δEu = 0.42~0.50, Eu 负异常十分明显。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图中

表 2 白干湖正长花岗岩体主量及微量元素含量

Table 2 Major and trace element compositions of

Baiganhu pluton

样品号	BGH-4.1	BGH-4.2	BGH-4.3	BGH-4.4	BGH-4.5
SiO ₂	70.98	70.57	71.73	70.62	70.69
Al ₂ O ₃	15.11	14.81	14.35	14.86	15.18
Fe ₂ O ₃	2.16	2.36	2.02	2.33	2.40
MgO	0.66	0.73	0.61	0.69	0.73
CaO	1.80	1.97	1.76	2.08	2.20
Na ₂ O	3.88	3.48	3.58	3.76	3.91
K ₂ O	3.53	4.13	3.97	3.49	2.88
TiO ₂	0.28	0.30	0.26	0.29	0.31
P ₂ O ₅	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11
MnO	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06
LOI	1.4	1.4	1.5	1.6	1.4
Total	99.91	99.90	99.90	99.88	99.89
A/CNK	1.12	1.07	1.07	1.08	1.12
A/NK	1.48	1.45	1.41	1.49	1.59
K ₂ O/Na ₂ O	0.91	1.19	1.11	0.93	0.74
K ₂ O+Na ₂ O	7.41	7.61	7.55	7.25	6.79
σ	1.96	2.10	1.98	1.90	1.67
Mg [#]	37.9	38.2	37.7	37.2	37.8
Ba	305	351	343	325	289
Be	6	6	3	11	6
Co	2.9	2.0	1.3	2.7	2.8
Cs	10.7	8.8	8.3	11.5	15.2
Ga	18.0	18.5	17.2	19.2	19.6
Hf	4.0	3.2	3.0	3.6	3.4
Nb	13.7	13.1	11.8	14.0	15.7
Rb	171.9	226.1	206.0	186.7	179.0
Sn	7	7	19	15	15
Sr	301.3	294.6	250.0	295.5	318.5
Ta	2.9	2.9	1.8	2.2	3.2
Th	11.5	10.7	10.8	12.4	11.4
U	1.9	2.0	1.5	3.3	1.8
V	23	23	20	25	24
W	0.7	0.9	0.8	1.0	0.7
Zr	116.8	109.9	107.3	126.0	118.1
Y	22.3	23.8	22.1	28.2	25.6
La	24.4	25.7	20.8	26.5	25.4
Ce	51.1	52.3	43.1	57.0	53.2
Pr	5.91	6.17	5.16	6.64	6.20
Nd	21.7	23.7	20.9	26.3	22.7
Sm	4.81	4.85	4.39	5.52	4.95
Eu	0.63	0.72	0.69	0.74	0.72
Gd	4.18	4.39	3.81	4.73	4.30
Tb	0.70	0.69	0.64	0.79	0.74
Dy	4.35	4.07	3.75	5.53	3.87
Ho	0.81	0.77	0.70	0.95	0.82
Er	2.31	2.15	2.28	2.73	2.38
Tm	.34	0.35	0.34	0.41	0.34
Yb	2.40	2.03	2.20	2.75	2.34
Lu	0.33	0.32	0.33	0.44	0.37
Mo	0.5	0.2	0.2	0.4	0.2
Cu	4.8	4.0	14.1	18.1	70.2

续表 2

Continued Table 2

样品号	BGH-4.1	BGH-4.2	BGH-4.3	BGH-4.4	BGH-4.5
Pb	7.0	6.2	3.8	9.6	6.0
Zn	32	25	30	43	41
Ni	0.9	1.0	0.8	1.0	0.8
As	1.4	1.6	2.6	1.1	1.2
Bi	0.8	0.2	1.1	0.2	0.3
Tl	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2
Sc	4	5	4	5	5
ΣREE	123.97	128.21	109.09	141.03	128.33
LREE/HREE	7.04	7.68	6.76	6.69	7.47
(La/Yb) _N	7.29	9.08	6.78	6.91	7.79
(La/Sm) _N	3.27	3.42	3.06	3.10	3.31
(Gd/Lu) _N	1.57	1.70	1.43	1.33	1.44
δEu	0.42	0.47	0.50	0.43	0.47

注: Mg[#] = 100 × Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe^T)

(图 6b),白干湖岩体表现出显著的富集大离子亲石元素(如 K、Rb、Cs、Th、U 等)亏损高场强元素(如 Nb、Ti 等)的特征,具有明显的 Nb、P、Ti 负异常。

5 讨论

5.1 巴什尔希岩浆序列的形成时代

锆石 U-Pb 定年结果显示,巴什尔希岩浆序列中的白干湖二长花岗岩(BGH-1)和正长花岗岩(BGH-4)的侵位年龄分别为 428.2 ± 4.2 Ma(MSWD = 3.4)和 422.5 ± 2.3 Ma(MSWD = 1.4),表明白干湖岩体形成于中志留世,与前人报道的一系列早中志留世锆石 U-Pb 年龄(433~421 Ma,包亚范等,2008;高永宝等,2010,2011;李国臣等,2012)基本相符。此外,高晓峰等(2010b)报道的锆石 U-Pb 年龄为 458.0 ± 9.0 Ma(LA-ICP-MS),是目前在该区测出的最老的花岗岩形成年龄,表明巴什尔希岩浆序列最早可能于晚奥陶世开始活动。

前人大多默认巴什尔希岩浆序列属于祁漫塔格岩浆活动体系,而祁漫塔格位于东昆仑西段(图 1a),其构造-岩浆活动在东昆仑格架之内。东昆仑花岗岩形成于前寒武纪、早古生代、晚古生代—早中生代和晚中生代—新生代 4 个时段(莫宣学等,2007),祁漫塔格岩浆演化大体分为晋宁期、加里东-印支期、燕山期 3 个阶段,其中加里东期和印支期是两次岩浆作用高峰(伍跃中等,2009,2011;高晓峰等,2010a;王秉璋,2011),而格尔木以西、白干湖断裂以

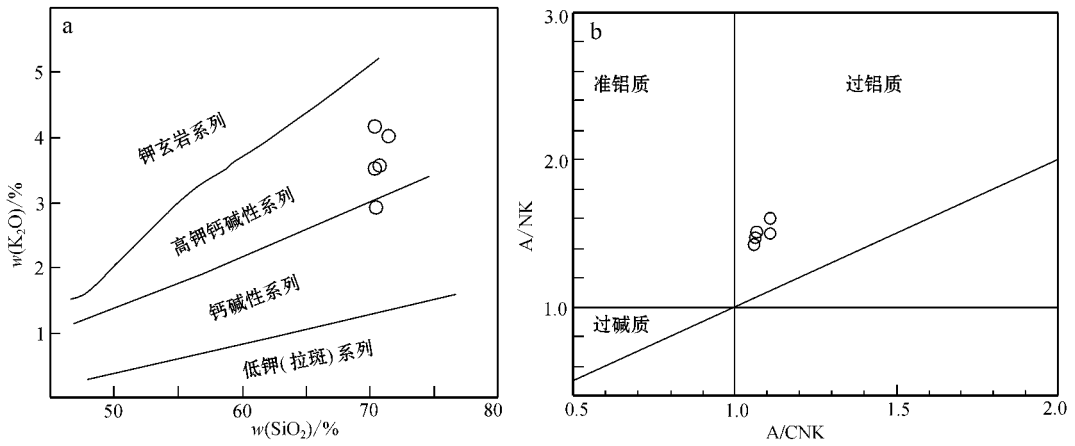


图 5 白干湖正长花岗岩(BGH-4)主量元素特征

Fig. 5 Major element features of Baiganhu syenogranite (BGH-4)

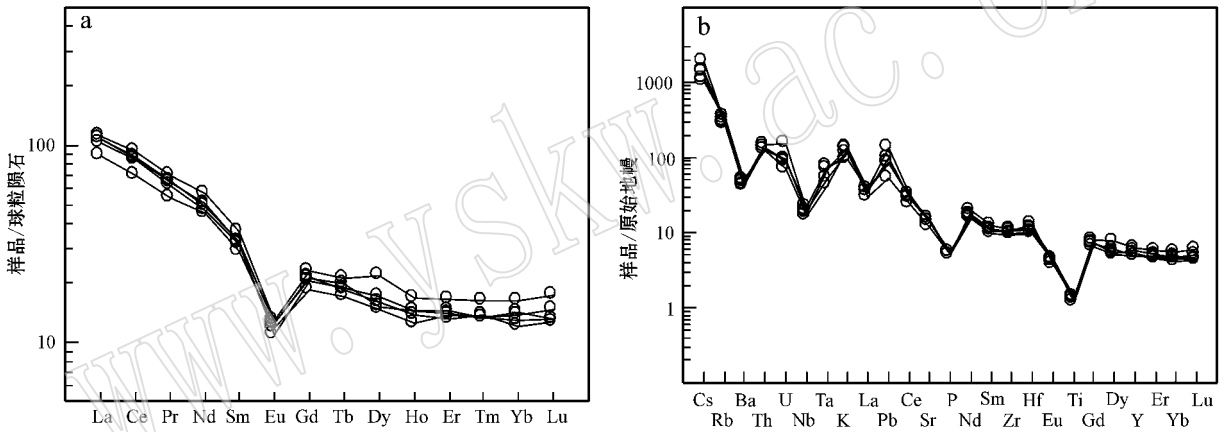


图 6 白干湖正长花岗岩(BGH-4)稀土元素配分曲线(a)和微量元素蛛网图(b)球粒陨石和原始地幔数据值引自 Sun & McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element diagrams (b) for Baiganhu syenogranite (BGH-4) (compositions of chondrite and primitive mantle after Sun & McDonough, 1989)

东的东祁漫塔格的岩浆活动明显地分为前寒武纪、早中生代、晚古生代—早中生代 3 个阶段(图 7)。前寒武纪岩浆活动集中在新元古代;早中生代岩浆活动集中于奥陶纪—泥盆纪,并可进一步细分为晚奥陶世—早泥盆世初和早泥盆世晚期—早石炭世两个阶段;晚古生代—早中生代岩浆活动集中于二叠纪—三叠纪,且中晚三叠世岩浆活动最为强烈。单纯从年代学角度出发,巴什尔希岩浆序列与东祁漫塔格晚奥陶世—早泥盆世初岩浆岩应属于同时代岩浆活动的产物。

5.2 巴什尔希岩浆序列形成的构造环境

前人提出巴什尔希岩浆序列形成于同碰撞造山阶段(包亚范等,2008)和后碰撞阶段(高永宝等,

2011;李国臣等,2012)等两种观点。但是,包亚范等(2008)给出的 S 型花岗岩的成岩年龄(432.3 ± 0.8 Ma)与柯可卡尔德岩体的形成时代(430.5 ± 1.2 Ma,高永宝等,2011;421 ± 3.7 Ma,李国臣等,2012)在误差范围内基本一致。显然,白干湖地区在同一时期不可能处于两种不同的构造背景。因此,对于巴什尔希岩浆序列形成的构造环境还需要进一步讨论。

高永宝等(2011)和李国臣等(2012)分别在柯可卡尔德岩体的不同部位采样进行全岩主量和微量元素测试,结果均表明该岩体具有富硅、富碱、贫钙、贫镁、V 型稀土分布等 A 型花岗岩的特征(Collins *et al.*, 1982;苏玉平等,2005;吴锁平等,2007;贾小

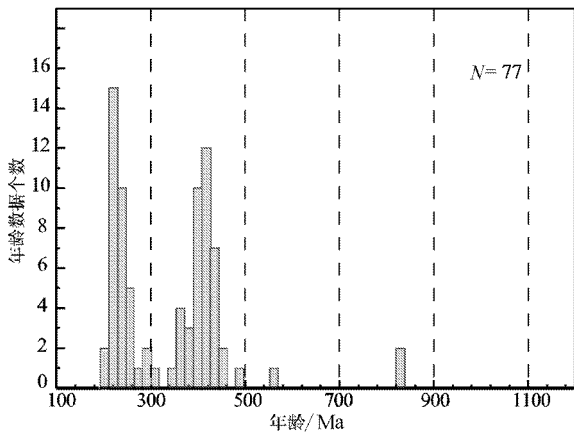


图 7 祁漫塔格东段岩浆岩同位素年龄统计直方图

Fig. 7 Histogram of isotopic ages from magmatic and volcanic rocks in eastern Qimantag

数据来源:刘洪涛,2001;刘成东等,2003;郝杰等,2003;陕西省地质调查院,2003^①;谈生祥等,2004;青海省地质调查院,2004a^② 2004b^③;肖爱芳,2005;谯宏伟等,2006;刘云华等,2006;余全等,2007;李世金等,2008;常有英等,2009;王松等,2009;薛宁等,2009;王秉璋等,2009,2012;马永寿等,2010;奚仁刚等,2010;曹世泰等,2011;郭通珍等,2011;吴祥珂等,2011;王秉璋,2011;崔美慧等,2011,2012;丰成友等,2011,2012;陈博等,2012;高永宝等,2012;张爱奎,2012;肖晔等,2013;马文等,2013;潘晓萍等,2013

Data sources: Liu Hongtao, 2001; Liu Chendong *et al.*, 2003; Hao Jie *et al.*, 2003; Tan Shengxiang *et al.*, 2004; Xiao Aifang, 2005; Chen Hongwei *et al.*, 2006; Liu Yunhua *et al.*, 2006; She Hongquan *et al.*, 2007; Li Shijin *et al.*, 2008; Chang Youying *et al.*, 2009; Wang Song *et al.*, 2009; Xue Ning *et al.*, 2009; Wang Bingzhang *et al.*, 2009, 2012; Ma Yongshou *et al.*, 2010; Xi Rengang *et al.*, 2010; Cao Shitai *et al.*, 2011; Guo Tongzhen *et al.*, 2011; Wu Xiangke *et al.*, 2011; Wang Bingzhang, 2011; Cui Meihui *et al.*, 2011, 2012; Feng Chengyou *et al.*, 2011, 2012; Chen Bo *et al.*, 2012; Gao Yongbao *et al.*, 2012; Zhang Aikui, 2012; Xiao Ye *et al.*, 2013; Ma Wen *et al.*, 2013; Pan Xiaoping *et al.*, 2013

辉等,2009)。Whalen 等(1987)指出, $10000 \times \text{Ga}/\text{Al} > 2.6$ 可以作为区分 A 型与 I&S 型花岗岩的标志, Eb_y(1992)将 A 型花岗岩可分为形成于非造山阶段大陆裂谷等板内张性环境的 A1 型和形成于后碰撞伸展构造环境的 A2 型两类。高永宝等(2011)和李

国臣等(2012)发表的原始地化数据均显示 A 型花岗岩的特点(图 8),且以 A2 型花岗岩为主(图 9)。据此推测,柯可卡尔德岩体形成于后碰撞阶段伸展构造体制(高永宝等,2011;李国臣等,2012)。

在 Pearce(1984,1996)提出的花岗岩构造环境判别图解上(图 10),白干湖正长花岗岩和柯可卡尔德二长花岗岩及正长花岗岩可以投在火山弧、板内、同碰撞等多种构造环境,但都限于后碰撞花岗岩区域内。这表明早-中志留世巴什尔希岩浆序列形成于后碰撞阶段伸展构造体制,与这个时期出现 A 型花岗岩的事实是一致的。

白干湖岩体产出在白干湖交代型钨锡矿床附近,其边部受围岩混染发生强烈的云英岩化交代作用(李大新等,2013)。该岩体含有白云母和石榴子石等富铝矿物,其中石榴子石具有完好的六边形晶形,且石英国绕石榴子石结晶(图 2c、2f),表明白干湖岩体中的石榴子石形成于岩浆阶段而非交代产物。白干湖岩体属于过铝质的高钾钙碱性花岗岩(图 5),具有 S 型花岗岩的化学特征(图 8),似乎暗示着该岩体可能属于同碰撞花岗岩。然而,后碰撞花岗岩类的岩石类型是多样的,高钾钙碱性 S 型花岗岩也可以在后碰撞阶段形成,如喜马拉雅造山带和欧洲海西造山带中就有相当比例的 S 型后碰撞花岗岩产出(韩宝福,2007)。其实,Pitcher(1983,1993)和 Barbrier(1990)早就认识到在后造山隆升或垮塌阶段可以 I 型花岗岩为主,也可以有钙碱性 S 型花岗岩和 A 型花岗岩同时产出,而同碰撞造山阶段主要发育 S 型花岗岩。巴什尔希岩浆序列中 S 型花岗岩(白干湖岩体)与 A 型花岗岩(柯可卡尔德岩体)的形成时代在误差范围内基本一致,出露的空间位置也非常接近(图 1b),符合钙碱性 S 型花岗岩与 A 型花岗岩共生的特点,与同碰撞阶段主要发育 S 型花岗岩的特征不符。因此,巴什尔希岩浆序列形成于后碰撞阶段的伸展构造体制。

5.3 白干湖地区早中志留世岩浆活动的构造归属讨论

如果巴什尔希岩浆序列与东祁漫塔格岩浆岩带属于同一构造-岩浆活动体系,那么巴什尔希花岗岩

① 陕西省地质调查院. 2003. 1:25 万阿牙克库木湖幅(J45 C 003004)区域地质调查报告.

② 青海省地质调查院. 2004a. 祁漫塔格造山带构造组成与演化及新构造运动. 1:25 万库朗米其提幅(J46 C 003001)区域地质调查项目专题研究报告.

③ 青海省地质调查院. 2004b. 1:25 万库朗米其提幅(J46 C 003001)区域地质调查报告.

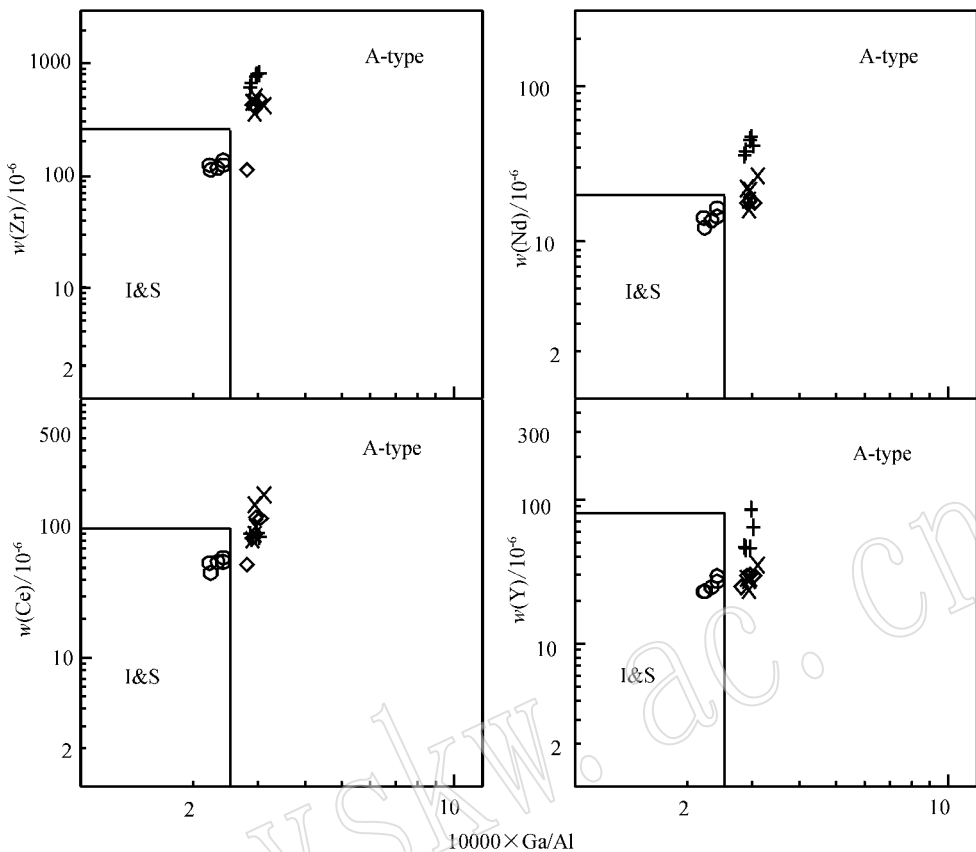


图 8 A 型花岗岩判别图(据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 8 Discrimination diagrams for A-type granite (after Whalen *et al.*, 1987)

- 白干湖岩体; ◇—二长花岗岩(高永宝等, 2011); +—二长花岗岩(李国臣等, 2012); ×—钾长花岗岩(李国臣等, 2012)
- Baiganhu pluton; ◇—monzonitic granite (after Gao Yongbao *et al.*, 2011); +—monzonitic granite (after Li Guochen *et al.*, 2012); ×—syenogranite (after Li Guochen *et al.*, 2012)

与东祁漫塔格早中志留世岩浆岩的岩石类型组合及成岩的构造背景均应是相似的。因此,讨论东祁漫塔格早中志留世岩浆活动格架,并与巴什尔希岩序列进行形成时代和构造背景的对比分析,有助于分析白干湖地区早中志留世岩浆活动的构造归属问题。

5.3.1 东祁漫塔格早中志留世构造-岩浆活动格架

在东祁漫塔格,晚奥陶世—早泥盆世初期发育俯冲-碰撞型花岗岩。具岛弧特征的岩浆岩大多出露于祁漫塔格主脊断裂以北,如分布在十字沟、宽沟、滩北雪峰等地的闪长岩和花岗闪长岩以及在宽沟-小狼牙山一带出露的玄武岩、玄武安山岩等中基性火山岩,形成于晚奥陶世—早志留世(480~434 Ma, 参考文献见图 7 文字说明)。而同碰撞型岩浆岩的产出受祁漫塔格主脊断裂的控制,广泛分布在祁漫塔格哈拉达乌、十字沟、双石峡、乌兰乌珠尔

和阿达滩断裂南侧喀拉克登塔格等地,主要为 S 型花岗岩,它们的形成时代为早志留世末—早泥盆世初期(430~407 Ma, 参考文献见图 7 文字说明)。

后碰撞阶段岩石类型复杂多样,简单根据微量元素特征不能有效判别岩浆活动的构造背景,需根据岩体侵位时代晚于碰撞事件且跨构造单元呈区域性面状产出的特点进行识别(韩宝福, 2007)。东祁漫塔格早泥盆世晚期—早石炭世岩浆活动广泛分布在十字沟、东沟、双石峡、阿达滩、乌兰乌珠尔、巴音郭勒呼都森、喀拉克登塔格等地,基性和中酸性岩浆岩均十分发育,岩石类型包括辉长岩、辉绿岩、闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩等,形成时代晚于早志留世末—早泥盆世初的碰撞事件,符合后碰撞花岗岩的特点。

祁漫塔格滩北雪峰西侧地区发育基性岩墙群,属大陆拉斑玄武岩系列,其中辉绿岩的锆石 U-Pb 定

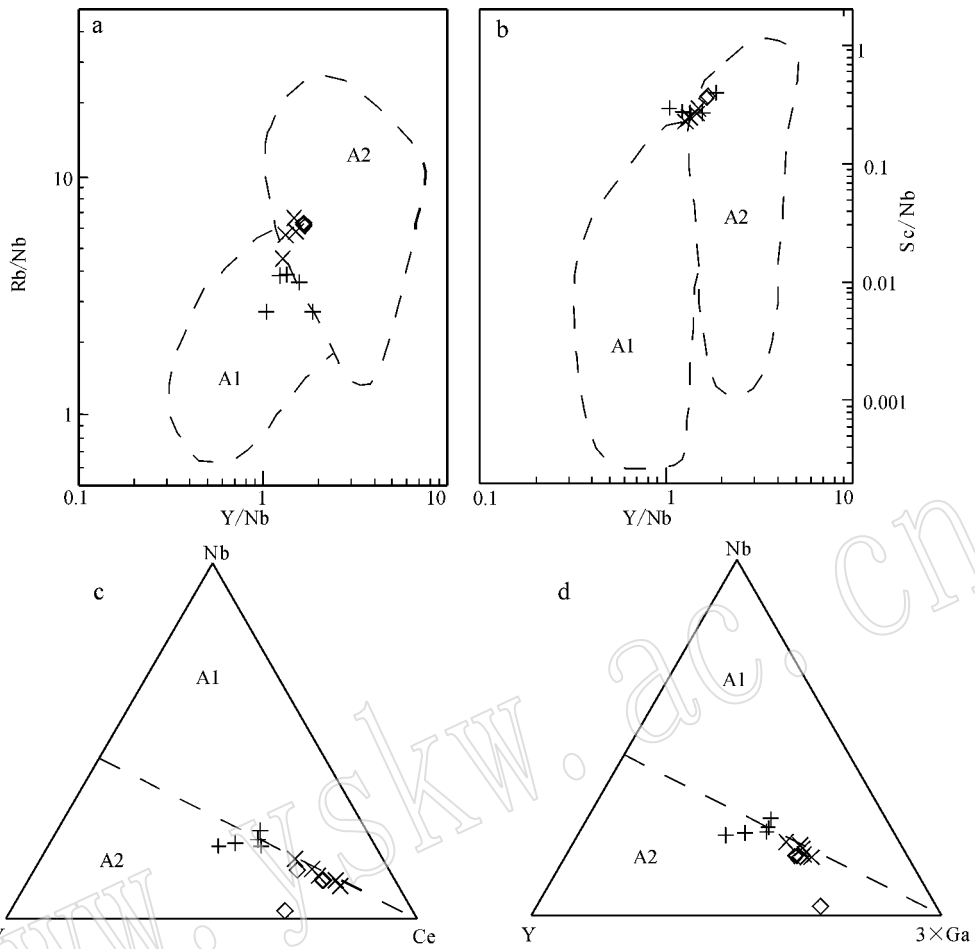


图 9 A 型花岗岩分类判别图(据 Eby, 1992, 数据来源和符号同图 8)

Fig. 9 Discrimination diagrams for two types of A-type granite (after Eby, 1992, data sources and symbols as for Fig. 8)

年结果为 396.5 ± 3.1 Ma (LA-ICP-MS; 王秉璋, 2011), 标志着该地区在早中泥盆世已经处于伸展构造体制。乌兰乌珠尔斑状正长花岗岩具有 A2 型花岗岩的地球化学特征, 其锆石 U-Pb 年龄为 388.9 ± 3.7 Ma (LA-ICP-MS; 郭通珍等, 2011), 说明该区在中泥盆世已经处于后碰撞演化阶段。东祁漫塔格早中古生代后碰撞岩浆活动大体发生在早泥盆世晚期—早石炭世(约 403~342 Ma, 参考文献见图 7 文字说明)。

总之, 东祁漫塔格早中古生代岩浆活动记录了完整的俯冲—碰撞—后碰撞造山过程: 晚奥陶世—早志留世处于俯冲阶段, 岛弧岩浆发育; 中晚志留世及早泥盆世初期处于同碰撞阶段, 广泛发育同碰撞花岗岩, 早泥盆世晚期进入后碰撞阶段, 岩浆活动类型复杂且十分强烈。

5.3.2 白干湖地区早中志留世岩浆活动构造归属的初步探讨

巴什尔希岩浆序列出露在白干湖断裂西侧, 主要活动时期是早中志留世(433~421 Ma), 具有高钾钙碱性 S 型花岗岩与 A 型花岗岩共生的特点, 形成于后碰撞阶段伸展环境。东祁漫塔格岩浆岩带在晚奥陶世—早泥盆世初期处于俯冲—碰撞演化阶段, 也即白干湖断裂东、西两侧在早中志留世分别处于同碰撞造山阶段的挤压环境和后碰撞阶段的伸展环境。这表明巴什尔希岩浆序列与东祁漫塔格早古生代岩浆活动很可能不属于同一构造体系。

阿尔金造山带主要出露在阿尔金断裂以北, 由北向南可划分为阿北地块、红柳沟—拉配泉俯冲碰撞混杂岩带、米兰河—金雁山(中阿尔金)地块和南阿尔金俯冲碰撞杂岩带(刘良等, 1999; 张建新等,

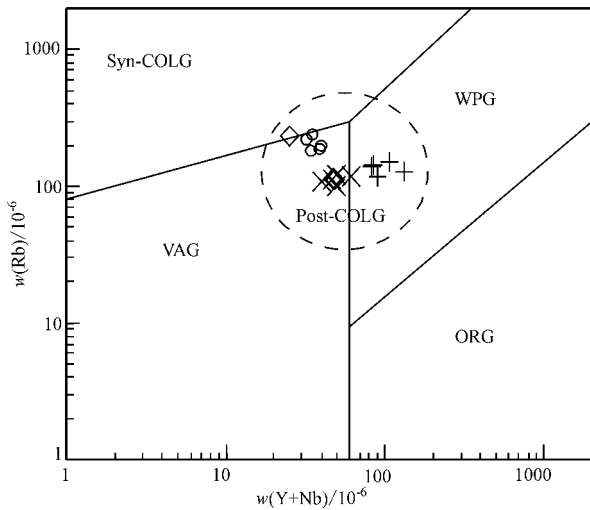


图 10 Rb-(Y+Nb)构造环境判别图解(据 Pearce, 1984, 1996; 数据来源和符号同图 8)

Fig. 10 Rb-(Y+Nb) diagram for discriminating tectonic settings of granites (after Pearce, 1984, 1996; data sources and symbols as for Fig. 8)

ORG—洋脊花岗岩; Post-COLG—后碰撞花岗岩; Syn-COLG—同碰撞花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; WPG—板内花岗岩

ORG—ocean ridge granites; Post-COLG—post-collision granites; Syn-COLG—syn-collision granites; VAG—volcanic arc granites; WPG—intraplate granites

2001)。其中,南阿尔金俯冲碰撞杂岩带位于白干湖地区以西及南西方向,沿阿尔金断裂带出露,包括高压-超高压变质带和蛇绿混杂岩带两部分,在早古生代经历了陆壳深俯冲及其后抬升折返的构造过程(杨文强等, 2012)。南阿尔金俯冲碰撞杂岩带超高压变质岩主要分布在江孜勒萨依、清水泉、英格利萨依等地区。江孜勒萨依榴辉岩的变质年龄 493 ± 4.3 Ma, 其原岩形成年龄为 754 ± 9 Ma, 片麻状围岩的变质年龄为 499 ± 27 Ma (LA-ICP-MS; 刘良等, 2007)。这与清水泉和英格利萨依地区高压变质作用时代共同表明南阿尔金高压-超高压变质带形成于约 479~509 Ma (刘良等, 2009), 也意味着南阿尔金在寒武纪晚期处于陆壳深俯冲的俯冲-碰撞造山阶段。马中平等(2009)得到清水泉地区镁铁-超镁铁质层状侵入体的形成年龄为 467.4 ± 1.4 Ma (LA-ICP-MS) 结合区域岩浆演化认为该侵入体形成于后碰撞阶段伸展构造背景。迪木那里克花岗岩与清水泉镁铁-超镁铁质层状侵入体在空间上密切伴生, 具有高钾钙碱性 S 型花岗岩的特征, 形成时代为 452.8 ± 3.1 Ma (LA-ICP-MS), 可能是深部地幔

物质上涌导致地壳杂砂岩熔融的产物(杨文强等, 2012)。这表明南阿尔金在中晚奥陶世已经发生了深俯冲陆壳板片的断离及幔源物质上涌, 进入了后碰撞构造演化阶段。出露在白干湖地区以西、阿尔金主断裂南侧的玉苏普阿勒克塔格岩体为准铝质高钾钙碱性 A 型花岗岩, 发育岩浆成因的暗色包体, 是伸展背景下幔源岩浆底侵、岩浆混合的产物(王超等, 2008), 其形成时代为 424 ± 4 Ma (马中平等, 2011) 表明南阿尔金在中志留世可能仍处于后碰撞阶段的伸展构造体制。玉苏普阿勒克塔格花岗岩与巴什尔希岩浆序列的形成时代基本一致, 都形成于伸展构造体制, 岩石类型都属于(或包括) A 型花岗岩, 产出的空间位置也都在阿尔金断裂和白干湖断裂之间, 表明二者可能形成于相近的构造背景。南阿尔金俯冲碰撞杂岩带在中晚奥陶世已经进入后碰撞演化阶段, 且该阶段可能持续至中志留世, 与白干湖地区早中志留世的后碰撞阶段伸展构造体制十分相似, 这意味着巴什尔希岩浆序列很可能与南阿尔金早古生代后碰撞岩浆活动关系密切。

以上只是根据现有资料所做的初步探讨。至于南阿尔金俯冲碰撞杂岩带早中志留世究竟处于哪种构造演化阶段、巴什尔希岩浆序列是否属于南阿尔金早古生代岩浆演化体系、是什么机制使得巴什尔希岩浆序列与东祁漫塔格岩浆岩带在空间位置上并置等问题, 还需要更加深入的研究与讨论。

6 结论

(1) 白干湖地区二长花岗岩(BGH-1)形成于 428.2 ± 4.2 Ma, 正长花岗岩(BGH-4)形成于 422.5 ± 2.3 Ma。该岩体含有白云母、石榴子石等特征矿物, 属于过铝质高钾钙碱性 S 型花岗岩, 富集 LREE 和 LILEs, 亏损 HFSEs, 有明显的 Nb、P、Ti 负异常。

(2) 巴什尔希岩浆序列主要形成于早中志留世, 具有高钾钙碱性 S 型花岗岩与 A 型花岗岩共生的特点, 形成于后碰撞阶段伸展构造体制。

(3) 白干湖断裂东侧东祁漫塔格岩浆岩带的早中古生代岩浆活动记录了完整的俯冲-碰撞-后碰撞造山过程。晚奥陶世—早志留世为俯冲阶段, 中志留世—早泥盆世是同碰撞阶段, 早泥盆世晚期进入后碰撞阶段。白干湖断裂西侧的巴什尔希岩浆序列与东祁漫塔格早中志留世岩浆活动很可能形成于不同的构造体系, 且很可能与南阿尔金早古生代后碰撞

岩浆活动有密切的关系。

致谢 匿名审稿人对本文提出了十分宝贵的修改意见,非常感谢!野外工作中得到了中国地质科学院矿产资源研究所赵一鸣和李大新两位研究员的指导,锆石 U-Pb 实验得到了北京大学地球与空间科学学院冯丽霞和刘博两位博士的帮助,在此表示衷心的感谢!

References

- Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192: 59~79.
- Bao Yafan, Liu Yanjun and Wang Xinchun. 2008. Relations between Bashienxi granite, west Dongkunlun and Baiganhu tungsten-tin deposit [J]. *Jilin Geology*, 27(3): 56~59, 67(in Chinese with English abstract).
- Barbarin B. 1990. Granitoids: main petrogenetic classifications in relation to origin and tectonic setting [J]. *Geological Journal*, 25: 227~238.
- Chang Youying, Li Jianfang, Zhang Jun, *et al.* 2009. Study of environment and chronology of late Triassic intrusive rocks in east Nalginggele river of Qinghai [J]. *Northwestern Geology*, 42(1): 57~65(in Chinese with English abstract).
- Chen Bo, Zhang Zhanyu, Geng Jianzhen, *et al.* 2012. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age of monzogranites in the Kaerqueka copper-polymetallic deposit of Qimantag, western Qinghai Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 31(2~3): 463~468(in Chinese with English abstract).
- Chen Hongwei, Luo Zhaohua, Mo Xuanxue, *et al.* 2006. SHRIMP ages of Kayakedegntage complex in the east Kunlun mountains and their geological implications [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(1): 25~32(in Chinese with English abstract).
- 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.
- Corfu F, Hanchar J M, Hoskin P, *et al.* 2003. Atlas of zircon textures [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 469~495.
- Cui Meihui. 2012. Petrogenesis of intermediate-basic igneous rocks from Yaziquan, Xinjiang Qimantag Mountain [D]. *Chinese Academy of Geological Sciences*(in Chinese with English abstract).
- Cui Meihui, Meng Fancong and Wu Xiangke. 2011. Early Ordovician island arc of Qimantag Mountain, eastern Kunlun: Evidences from geochemistry, Sm-Nd isotope and geochronology of intermediate-basic igneous rocks [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3365~3379(in Chinese with English abstract).
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implication [J]. *Geology*, 20: 641~644.
- Feng Chengyou, Wang Xueping, Shu Xiaofeng, *et al.* 2011. Isotopic chronology of the Hutouya skarn lead-zinc polymetallic ore district in Qimangage Area of Qinghai Province and its geological significance [J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 41(6): 1860~1817(in Chinese with English abstract).
- Feng Chengyou, Wang Song, Li Guochen, *et al.* 2012. Middle to late Triassic granitoids in the Qimantag area, Qinghai Province, China: Chronology, geochemistry and metallogenic significances [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 665~678(in Chinese with English abstract).
- Feng Chenyou, Li Guochen, Li Daxin, *et al.* 2013. Ore-controlling structure and ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology of Kekekaerde tungsten-tin deposit in Qimantag area, Xinjiang [J]. *Mineral Deposits*, 32(1): 207~216(in Chinese with English abstract).
- Gao Xiaofeng, Xiao Peixi, Xie Congrui, *et al.* 2010a. Discussion on tectonic-magmatic process and mineralization in the Qimantag Rignior [J]. *Northwestern Geology*, 43(4): 119~123(in Chinese with English abstract).
- Gao Xiaofeng, Xiao Peixi, Xie Congrui, *et al.* 2010b. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and geological significance of Bashierxi granite in the eastern Kunlun area, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 29(7): 1001~1008(in Chinese with English abstract).
- Gao Yongbao and Li Wenyuan. 2011. Petrogenesis of granites containing tungsten and tin ores in the Baiganhu deposit, Qimantag, NW China: Constraints from petrology, chronology and geochemistry [J]. *Geochimica*, 40(4): 324~336(in Chinese with English abstract).
- Gao Yongbao, Li Wenyuan, Ma Xiaoguang, *et al.* 2012. Genesis, geochronology and Hf isotopic compositions of the magmatic rocks in Galinge iron deposit, eastern Kunlun [J]. *Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)*, 48(2): 36~47(in Chinese with English abstract).
- Guo Tongzhen, Liu Rong, Chen Fabin, *et al.* 2011. LA-MC-ICPMS zircon U-Pb dating of Wulanwuzhuer porphyritic syenite granite in the Qimantag Mountain of Qinghai and its geological significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 30(8): 1203~1211(in Chinese with English abstract).
- Han Baofu. 2007. Diverse post-collisional granitoids and their tectonic setting discrimination [J]. *Earth Science Frontiers(China University of Geoscience, Beijing; Peking University)*, 14(3): 64~72(in

- Chinese with English abstract).
- Hao Jie , Liu Xiaohan and Sang Haiqing . 2003 . Geochemical characteristics and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of the Ayak adamellite and its tectonic significance in the east Kunlun , Xinjiang [J] . *Acta Petrologica Sinica* , 19 (3) : 517 ~ 522 (in Chinese with English abstract) .
- Jia Xiaohui , Wang Qiang and Tang Gongjian . 2009 . A-type granites : Research progress and implication [J] . *Geotecnica et Metallogenia* , 33 (3) : 465 ~ 480 (in Chinese with English abstract) .
- Li Daxin , Feng Chengyou , Zhou Anshun , et al . 2013 . Geological characteristics and mineralization-metasomatite classification of super-large Baiganhu tungsten-tin orefield in western Qimantag , East Kunlun Mountain [J] . *Mineral Deposits* , 32 (1) : 37 ~ 54 (in Chinese with English abstract) .
- Li Dunpeng and Xiao Aifang . 2010 . Magmatic sequence and tectonic setting of Bashierxi granite in W-Sn deposit of Baiganhu area , the western sector of Qimantage Mountains [J] . *Northwestern Geology* , 43 (4) : 53 ~ 61 (in Chinese with English abstract) .
- Li Guochen , Feng Chenyou , Wang Ruijiang , et al . 2012 . SIMS zircon U-Pb age , petrochemistry and tectonic implications of granitoids in northeastern Baiganhu W-Sn orefield , Xinjiang [J] . *Acta Geoscientica Sinica* , 33 (2) : 216 ~ 226 (in Chinese with English abstract) .
- Li Shijin , Sun Fengyue , Feng Chengyou , et al . 2008 . Geochronological study on Yazigou polymetallic deposit in Eastern Kunlun , Qinghai Province [J] . *Acta Geologica Sinica* , 82 (7) : 949 ~ 955 (in Chinese with English abstract) .
- Liu Chengdong , Zhou Su , Mo Xuanxue , et al . 2003 . Constraints of petrochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ aging of post-collision granites in Eastern Kunlun Orogenic Belt [J] . *Journal of East China Geological Institute* , 26 (4) : 301 ~ 305 (in Chinese with English abstract) .
- Liu Hongtao . 2001 . Qimantage terrestrial volcanics : petrologic evidence of active continental margin of Tarim Plate during late Indo-China epoch [J] . *Acta Petrologica Sinica* , 17 (3) : 337 ~ 351 (in Chinese with English abstract) .
- Liu Liang , Che Zicheng , Wang Yan , et al . 1999 . The petrological characters and geotectonic setting of high-pressure metamorphic rock belts in Altun Mountains [J] . *Acta Petrologica Sinica* , 25 (01) : 57 ~ 64 (in Chinese with English abstract) .
- Liu Liang , Zhang Anda , Chen Danling , et al . 2007 . Implications based on LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of eclogite and its country rock from Jianggalesayi area , Altyn Tagh [J] . *Earth Science Frontiers* , 14 (1) : 98 ~ 107 (in Chinese with English abstract) .
- Liu Liang , Chen Danling , Wang Chao , et al . 2009 . New progress on geochronology of high pressure/ultrahigh pressure metamorphic rocks from the South Altyn Tagh , the North Qaidam and the North Qinling orogenic , NW China and their geological significance [J] . *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)* , 39 (3) : 472 ~ 479 (in Chinese with English abstract) .
- Liu L , Sun Y , Luo J H , et al . 2004 . Ultra-high pressure metamorphism of granitic gneiss in the Yinggelisayi area , Altun Mountains , NW China [J] . *Science in China Ser. D Earth Sciences* , 47 (4) : 338 ~ 346 .
- Liu Yunhua , Mo Xuanxue , Yu Xuehui , et al . 2006 . Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Jingren granite , Yemaquan region of the east Kunlun and its geological significance [J] . *Acta Petrologica Sinica* , 22 (10) : 2457 ~ 2463 (in Chinese with English abstract) .
- Ludwig K P . 2003 . User 's Manual for Isoplot 3.0 : A geochronological toolkit for Microsoft Excel [A] , Berkeley Geochronological Center , Special Publication [C] . 4 : 1 ~ 71 .
- Ma Wen , Ding Yujin , Li Shehong , et al . 2013 . The discovery and geological significance of Proterozoic intrusive rock with high-K in the central of Qimantage area [J] . *Northwestern Geology* , 46 (1) : 32 ~ 39 (in Chinese with English abstract) .
- Ma Yongshou , Bai Yongshan , He Jiao , et al . 2010 . Discovery of monzonitic granite in Qimantage region in Pan-African period and its significance [J] . *Journal of Qinghai University (Nature Science)* , 28 (5) : 56 ~ 60 (in Chinese with English abstract) .
- Ma Zhongping , Li Xiangmin , Xu Xueyi , et al . 2011 . Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic dating for Qingshuiquan layered mafic-ultramafic intrusion southern Altun orogen , in northwestern China and its implication [J] . *Geology in China* , 38 (4) : 1071 ~ 1078 (in Chinese with English abstract) .
- Mo Xuanxue , Luo Zhaohua , Deng Jinfu , et al . 2007 . Granitoids and crustal growth in the East-Kunlun Orogenic Belt [J] . *Geological Journal of China Universities* , 13 (3) : 403 ~ 414 (in Chinese with English abstract) .
- Pan Xiaoping , Li Rongshe , Yu Pusheng , et al . 2013 . The age of country rocks of the Kendekeke Fe-Co polymetallic deposit in Qimantage area and its significance [J] . *Acta Petrologica et Mineralogica* , 32 (1) : 53 ~ 62 (in Chinese with English abstract) .
- Pearce J A , Harris N B W and Tindle A G . 1984 . Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J] . *Journal of Petrology* , 25 (4) : 956 ~ 983 .
- Pearce J A . 1996 . Source and settings of granitic rocks [J] . *Episodes* , 19 (4) : 120 ~ 125 .
- Pitcher W S . 1983 . Granite type and tectonic environment [A] . Hsü K J . *Mountain Building Process* [C] . Academic Press , London , 19 ~ 40 .
- Pitcher W S . 1993 . *The Nature and Origin of Granite* [M] . London : Chapman & Hall .
- She Hongquan , Zhang Dequan , Jing Xiangyang , et al . 2007 . Geological

- characteristics and genesis of the Ulan Uzhur porphyry copper deposit in Qinghai [J]. *Geology in China* , 34(2) : 306 ~ 314 (in Chinese with English abstract).
- Song Biao , Zhang Yuhai , Wan Yusheng , *et al.* 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating [J]. *Geological Review* , 48 (supp.) : 26 ~ 30 (in Chinese with English abstract).
- Su Yuping and Tang Hongfeng. 2005. Trace element geochemistry of A-type granites [J]. *Bulletin of Mineralogy , Petrology and Geochemistry* , 24(3) : 245 ~ 251 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts : implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basin* [C]. *Geological Society Special Publication* , 42 : 313 ~ 345.
- Tan Shengxiang , Bai Yongshan , Chang Gehong , *et al.* 2004. Discovery and geological significance of metamorphic and intrusive rock (system) of Qimantage region in Jinning epoch [J]. *Northwestern Geology* , 37(1) : 69 ~ 73 (in Chinese with English abstract).
- Wang Bingzhang. 2011. The study and investigation on the assembly and coupling Petrotectonic assemblage during Paleozoic-Mesozoic period at Qimantage geological corridor domain [D]. China University of Geosciences (Beijing) in Chinese with English abstract).
- Wang Bingzhang , Luo Zhaohua , Li Huaiyi , *et al.* 2009. Petrotectonic assemblages and temporal-spatial framework of the Late Paleozoic-Early Mesozoic intrusions in the Qimantage corridor of the East Kunlun belt [J]. *Geology in China* , 36(4) : 769 ~ 782 (in Chinese with English abstract).
- Wang Bingzhang , Luo Zhaohua , Pan Tong , *et al.* 2012. Petrotectonic assemblages and LA-ICP-MS zircon U-Pb age of Early Paleozoic volcanic rocks in Qimantag area , Tibetan Plateau [J]. *Geological Bulletin of China* , 31(6) : 860 ~ 874 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chao , Liu Liang , Zhang Anda , *et al.* 2008. Geochemistry and petrography of Early Paleozoic Yusupuleke Tagh rapakivi-textured granite complex , South Altyn : An example for magma mixing [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 24(12) : 2 809 ~ 2 819 (in Chinese with English abstract).
- Wang Song , Feng Chengyou , Li Shijin , *et al.* 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granodiorite in the Kaerqueka polymetallic ore deposit , Qimantage Mountain , Qinghai Province , and its geological implication [J]. *Geology in China* , 36(1) : 74 ~ 84 (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.
- Wu Suoping , Wang Meiyang and Qi Kaijing. 2007. Present situation of researches on A-type granites : a review [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica* , 26(1) : 57 ~ 66 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xiangke , Meng Fancong , Xu Hong , *et al.* 2011. Zircon U-Pb dating , geochemistry and Nd-Hf isotopic compositions of the Maxingdaban Late Triassic granitic pluton from Qimantag in the eastern Kunlun [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 27(11) : 3 380 ~ 3 394 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yuezhong , Qiao Gengbiao and Chen Denghui. 2011. A preliminary study on relationship between tectonic magmatism and mineralization in Qimantage area , Eastern Kunlun Mountain [J]. *Geotectonica et Metallogenia* , 35(2) : 232 ~ 241 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yuezhong , Wang Zhan , Guo Lei , *et al.* 2009. Tectonic constraint on the temporal and spatial variation of granitoid rocks in the Qimantag region , Eastern Kunlun-evidence from changes of potassium and sodium contents [J]. *Acta Geologica Sinica* , 83(7) : 964 ~ 981 (in Chinese with English abstract).
- Xi Rengang , Xiao Peixi , Wu Yuezhong , *et al.* 2010. The geological significance , composition and age of the monzonitic granite in Kendekeke iron mine [J]. *Northwestern Geology* , 43(4) : 195 ~ 202 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Aifang. 2005. Yaziquan Silurian volcanic rocks in western Qimantage Mountain of Eastern Kunlun [J]. *Geology of Shanxi* , 23(2) : 50 ~ 60 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Ye , Feng Chengyou , Liu Jiannan , *et al.* 2013. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating and sulfur isotope characteristics of Kendekeke Fe-polymetallic deposit , Qinghai province [J]. *Mineral Deposits* , 32 (1) : 177 ~ 186 (in Chinese with English abstract).
- Xue Ning , An Yongsheng , Li Wufu , *et al.* 2009. Characteristics and genesis of normal granite in the Yemaquan area of Qinghai [J]. *Journal of Qinghai University (Nature Science)* , 27(2) : 18 ~ 22 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wenqiang , Liu Liang , Ding Haibo , *et al.* 2012. Geochemistry , geochronology and zircon Hf isotopes of the Dimunalike granite in South Altyn Tagn and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 28(12) : 4 139 ~ 4 150 (in Chinese with English abstract).
- Yuan H L , Wu F Y , Gao S , *et al.* 2003. Determination of U-Pb age and rare earth element concentrations of zircons from Cenozoic intrusions in northeastern by laser ablation ICP-MS [J]. *Chinese Science Bulletin* , 48(22) : 2 411 ~ 2 421.
- Zhang Aikui. 2012. Studies on late Paleozoic-early Mesozoic magmatism and mineralization in Yemaquan area , Qinghai province [D]. China University of Geosciences (Beijing) in Chinese with English abstract).

Zhang Jianxin, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, *et al.*. 2001. Petrology, geochemistry and geochronology of eclogites from the western segment of the Altun tectonic belt, northwestern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(2):186~197 in Chinese with English abstract.

附中文参考文献

- 包亚范, 刘延军, 王鑫春. 2008. 东昆仑西段巴什尔希花岗岩与白干湖钨锡矿床的关系[J]. *吉林地质*, 27(3):56~59.
- 曹世泰, 刘晓康, 马永胜, 等. 2011. 祁漫塔格地区早志留世侵入岩的发现及其地质意义[J]. *青海科技*, 5:25~30.
- 常有英, 李建放, 张军, 等. 2009. 青海那棱郭勒河东晚三叠世侵入岩形成环境与年代学研究[J]. *西北地质*, 42(1):57~65.
- 陈博, 张占玉, 耿建珍, 等. 2012. 青海西部祁漫塔格山卡而却卡铜多金属矿床似斑状黑云二长花岗岩 LA01CP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. *地质通报*, 31(2~3):463~468.
- 谌宏伟, 罗照华, 莫宣学, 等. 2006. 东昆仑喀雅克登塔格杂岩体的 SHRIMP 年龄及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 25(1):25~32.
- 崔美慧. 2010. 新疆祁漫塔格鸭子泉中性火成岩成因[D]. 中国地质科学院硕士学位论文.
- 崔美慧, 孟繁聪, 吴祥珂. 2011. 东昆仑祁漫塔格早奥陶世岛弧: 中性火成岩地球化学、Sm-Nd 同位素及年代学证据[J]. *岩石学报*, 27(11):3365~3379.
- 丰成友, 王雪萍, 舒晓峰, 等. 2011. 青海祁漫塔格虎头崖铅锌多金属矿区年代学研究及地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(6):1806~1817.
- 丰成友, 王松, 李国臣, 等. 2012. 青海祁漫塔格中晚三叠世花岗岩年代学、地球化学及成矿意义[J]. *岩石学报*, 28(02):665~678.
- 丰成友, 李国臣, 李大新, 等. 2013. 新疆祁漫塔格柯可卡尔德钨锡矿床控矿构造及⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学研究[J]. *矿床地质*, 32(1):207~216.
- 高晓峰, 校培喜, 谢从瑞, 等. 2010a. 祁漫塔格地区构造-岩浆作用与成矿[J]. *西北地质*, 43(4):119~123.
- 高晓峰, 校培喜, 谢从瑞, 等. 2010b. 东昆仑阿牙克库木湖北巴什尔希花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. *地质通报*, 29(7):1001~1008.
- 高永宝, 李文渊, 张照伟. 2010. 祁漫塔格白干湖-夏勒赛钨锡矿带岩浆岩锆石 U-Pb 定年及成矿时代探讨[J]. *矿床地质*, 29(增刊):435~436.
- 高永宝, 李文渊. 2011. 东昆仑造山带祁漫塔格地区白干湖含钨锡花岗岩: 岩石学、年代学、地球化学及岩石成因[J]. *地球化学*, 40(4):324~336.
- 高永宝, 李文渊, 马晓光, 等. 2012. 东昆仑杂林格铁矿床成因年代学及 Hf 同位素制约[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 48(2):36~47.
- 郭通珍, 刘荣, 陈发彬, 等. 2011. 青海祁漫塔格山乌兰乌珠尔斑状正长花岗岩 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. *地质通报*, 30(8):1203~1211.
- 韩宝福. 2007. 后碰撞花岗岩类的多样性及其构造环境判别的复杂性[J]. *地学前缘*, 14(3):064~072.
- 郝杰, 刘小汉, 桑海清. 2003. 新疆东昆仑阿牙克岩体地球化学与⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学研究及其大地构造意义[J]. *岩石学报*, 19(3):517~522.
- 贾小辉, 王强, 唐功建. 2009. A 型花岗岩的研究进展及意义[J]. *大地构造与成矿学*, 33(3):465~480.
- 李大新, 丰成友, 周安顺, 等. 2013. 东昆仑祁漫塔格西段白干湖超大型钨锡矿田地质特征及其矿化交代岩分类[J]. *矿床地质*, 32(1):37~54.
- 黎敦朋, 肖爱芳. 2010. 祁漫塔格西段白干湖钨锡矿区巴什尔希花岗岩序列及构造环境[J]. *西北地质*, 43(4):53~61.
- 李国臣, 丰成友, 王瑞江, 等. 2012. 新疆白干湖钨锡矿田东北部花岗岩锆石 SIMS U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义[J]. *地球学报*, 33(2):216~226.
- 李荣社, 计文化, 杨永成, 等. 2008. 昆仑山及邻区地质[M]. 北京: 地质出版社.
- 李世金, 孙丰月, 丰成友, 等. 2008. 青海东昆仑鸭子沟多金属矿的成矿年代学研究[J]. *地质学报*, 82(7):949~955.
- 刘成东, 周肃, 莫宣学, 等. 2003. 东昆仑造山带后碰撞花岗岩岩石地球化学和⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素年代学约束[J]. *华东地质学院学报*, 26(4):301~305.
- 刘洪涛. 2001. 祁漫塔格陆相火山岩: 塔里木陆块南缘印支期活动大陆边缘的岩石学证据[J]. *岩石学报*, 17(3):337~351.
- 刘良, 车自成, 王焰, 等. 1999. 阿尔金高压变质岩带的特征及其构造意义[J]. *岩石学报*, 15(01):57~64.
- 刘良, 孙勇, 罗金海, 等. 2003. 阿尔金英格利萨依花岗岩质片麻岩超高压变质[J]. *中国科学(D辑)*, 33(12):1184~1192.
- 刘良, 张安达, 陈丹玲, 等. 2007. 阿尔金江勒勒萨依榴辉岩和围岩锆石 LA-ICP-MS 微区原位定年及其地质意义[J]. *地学前缘*, 14(1):98~107.
- 刘良, 陈丹玲, 王超, 等. 2009. 阿尔金-柴北缘与北秦岭高压-超高压岩石年代学研究进展及其构造地质意义[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 39(3):472~479.
- 刘云华, 莫宣学, 喻学惠, 等. 2006. 东昆仑野马泉地区景忍花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 22(10):2457~2463.
- 马文, 丁玉进, 李社宏, 等. 2013. 祁漫塔格中部元古代高钾(变质)侵入岩体的发现及其地质意义[J]. *西北地质*, 46(1):32~

- 39.
- 马永寿, 拜永山, 何 皎, 等. 2010. 祁漫塔格地区泛非期二长花岗岩的发现及意义[J]. 青海大学学报(自然科学版), 28(5): 56~60.
- 马中平, 李向民, 徐学义, 等. 2011. 南阿尔金山清水泉镁铁-超镁铁质侵入体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年及其意义[J]. 中国地质, 38(4): 1071~1078.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. 高校地质学报, 13(3): 403~414.
- 潘晓萍, 李荣社, 于涌生, 等. 2013. 祁漫塔格地区肯德可克铁钴多金属矿围岩时代及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 32(1): 53~62.
- 余宏全, 张德全, 景向阳, 等. 2007. 青海省乌兰乌拉斑岩铜矿床地质特征与成因[J]. 中国地质, 34(2): 306~314.
- 宋 彪, 张玉海, 万渝生, 等. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质评论, 48(增刊): 26~30.
- 苏玉平, 唐红峰. 2005. A 型花岗岩的微量元素地球化学[J]. 矿物岩石地球化学通报, 24(3): 245~251.
- 谈生祥, 拜永山, 常革红, 等. 2004. 祁漫塔格地区晋宁期变质侵入岩(体)的发现及其地质意义[J]. 西北地质, 37(1): 69~73.
- 王秉璋. 2011. 祁漫塔格地质走廊域古生代-中生代火成岩岩石构造组合研究[D]. 中国地质大学(北京).
- 王秉璋, 罗照华, 李怀毅, 等. 2009. 东昆仑祁漫塔格走廊域晚古生代—早中生代侵入岩岩石组合及时空格架[J]. 中国地质, 36(4): 769~782.
- 王秉璋, 罗照华, 潘 彤, 等. 2012. 青藏高原祁漫塔格地区早古生代火成岩岩石构造组合和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 31(6): 860~974.
- 王 超, 刘 良, 张安达, 等. 2008. 阿尔金造山带南缘岩浆混合作用: 玉苏普阿勒克塔格岩体岩石学和地球化学证据[J]. 岩石学报, 24(12): 2809~2819.
- 王 松, 丰成友, 李世金, 等. 2009. 青海祁漫塔格卡而却卡铜多金属矿区花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义[J]. 中国地质, 36(1): 74~84.
- 吴锁平, 王梅英, 戚开静. 2007. A 型花岗岩研究现状及其评述[J]. 岩石矿物学杂志, 26(1): 57~66.
- 吴祥珂, 孟繁聪, 许 虹, 等. 2011. 青海祁漫塔格玛兴大板晚三叠世花岗岩年代学、地球化学及 Nd-Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 27(11): 3380~3394.
- 伍跃中, 乔耿彪, 陈登辉. 2011. 东昆仑祁漫塔格地区构造岩浆作用与成矿关系初步探讨[J]. 大地构造与成矿学, 35(2): 232~241.
- 伍跃中, 王 战, 过 磊, 等. 2009. 东昆仑祁漫塔格地区花岗岩类时空变化的构造控制——来自钾钠含量变化的证据[J]. 地质学报, 83(7): 964~981.
- 奚仁刚, 校培喜, 伍跃中, 等. 2010. 东昆仑肯德可克铁矿区二长花岗岩组成、年龄及地质意义[J]. 西北地质, 43(4): 195~202.
- 肖爱芳. 2005. 东昆仑祁漫塔格山西段鸭子泉志留纪火山岩特征[J]. 陕西地质, 23(2): 50~60.
- 肖 晔, 丰成友, 刘建楠, 等. 2013. 青海肯德可克铁多金属矿区年代学及硫同位素特征[J]. 矿床地质, 32(1): 177~186.
- 薛 宁, 安勇胜, 李五福, 等. 2009. 青海野马泉地区正长花岗岩的基本特征及成因[J]. 青海大学学报(自然科学版), 27(2): 18~22.
- 杨文强, 刘 良, 丁海波, 等. 2012. 南阿尔金迪木那里克花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素特征及其构造地质意义[J]. 岩石学报, 28(12): 4139~4150.
- 袁洪林, 吴福元, 高 山, 等. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J]. 科学通报, 48(14): 1511~1520.
- 张爱奎. 2012. 青海野马泉地区晚古生代—早中生代岩浆左永宁与成矿研究[D]. 中国地质大学(北京).
- 张建新, 许志琴, 杨经绥, 等. 2001. 阿尔金西段榴辉岩岩石学、地球化学和同位素年代学研究及其构造意义[J]. 地质学报, 75(2): 186~197.