

新疆塔里木北缘志留纪花岗岩类侵入岩的地质特征及构造意义

郭瑞清¹, 尼加提·阿布都逊¹, 秦 切¹, 贾晓亮¹, 朱志新^{1,2}, 王克卓², 李亚萍³
GUO Rui-qing¹, Nijati Abuduxun¹, QIN Qie¹, JIA Xiao-liang¹, ZHU Zhi-xing^{1,2},
WANG Ke-zhuo^{1,2}, LI Ya-ping³

1. 新疆大学地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830049;

2. 新疆维吾尔自治区地质调查院, 新疆 乌鲁木齐 830011;

3. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

1. Geological and Mining Engineering Institute, Xinjiang University, Urumqi 830049, Xinjiang, China;

2. Geological Research Academy of Xinjiang, Urumqi 830011, Xinjiang, China;

3. The Development Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China

摘要: 塔里木北缘在古生代是否是主动大陆边缘对于了解南天山洋的俯冲方式及中亚造山带西南缘的增生历史具有重要意义。塔里木北缘断续出露一条侵入岩带, 西起老虎台, 经黑英山—密勒洞—野云沟—库尔勒一带, 再往东与库鲁克塔格地块的侵入岩连在一起。选取志留纪欧西达坂岩体、铁门关岩体、铁门关东南岩体和博斯腾湖乡岩体作为典型岩体进行定年、岩石学和地球化学的研究。获得铁门关东南岩体的锆石 U-Pb 年龄为 $419.2\text{Ma} \pm 3.1\text{Ma}$, 博斯腾湖乡岩体的锆石 U-Pb 年龄为 $418\text{Ma} \pm 2.7\text{Ma}$ 。地球化学特征显示, 志留纪侵入岩为钙碱性—高钾钙碱性 I 型花岗岩, 微量元素富集 Rb、K、U 等大离子亲石元素 (LILE)、亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素 (HFSE), 具有板块汇聚边缘火山弧花岗岩的地球化学特征。综合区域地质资料及前人成果, 推测在早古生代南天山洋存在双向俯冲, 并从志留纪已经开始向南俯冲—消减, 一直延续到早石炭世, 到晚石炭世闭合。

关键词: 花岗岩; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年; 塔里木北缘; 南天山

中图分类号: P534.43; P588.12⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2013)02/03-0220-19

Guo R Q, Nijati A, Qin Q, Jia X L, Zhu Z X, Wang K Z, Li Y P. Geological characteristics and tectonic significance of Silurian granitic intrusions in the northern Tarim craton, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 2013,32(2/3):220-238

Abstract: The problem whether the northern Tarim craton was an active continental margin during the Paleozoic is of great significance for us to understand the subduction style of paleo-oceanic plates in the Tianshan orogenic belt and the accretion history of the southwestern Central Asian orogenic belt. In northern Tarim, there exists a discontinuously exposed intrusive rock belt, which extends from Hulashan through Heiyingshan—Miledong—Korla to Quruqtagh. In this paper, four granitoid plutons, i.e., Oxidaban pluton, Tiemenguan pluton, southeast Tiemenguan pluton and Bosten Lake Township pluton, were chosen for geochronological, petrological and geochemical investigations. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of two samples from southeast Tiemenguan pluton and Bosten Lake Township pluton yielded age of $419.2\text{Ma} \pm 3.1\text{Ma}$ and $418\text{Ma} \pm 2.7\text{Ma}$ respectively. Geochemical data suggest that these granitoids are calcium alkaline—high potassium calcium alkaline I type granite characterized by enrichment of Rb, K, U and relative depletion of Nb, Ta, Ti, P, thus geochemically resembling the plate convergence edge volcanic arc granite. Based on the regional magmatism and previous studies, the authors inferred that the South Tianshan Ocean experienced double-direction subduction during early Paleo-

收稿日期: 2013-01-04; 修订日期: 2013-01-17

资助项目: 中国地质调查局项目《兴蒙造山带基本构造格局综合调查和研究》(编号: 1212011085476)、《天山成矿带地质矿产调查评价》(编号: 1212011120477)

作者简介: 郭瑞清 (1964-), 男, 博士, 副教授, 从事岩石学及大地构造科研和教学。E-mail: guoruiqing8888@163.com

zoic period and started southward subduction—reduction in Silurian period which continued to the early Carboniferous, and its closure took place in the late Carboniferous period.

Key words: granitoids; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; northern Tarim craton; South Tianshan

中亚造山带因其典型的古生代增生造山过程、地壳生长和丰富的成矿作用而成为中外地质学者关注的热点研究地区。南天山造山带位于中亚造山带西南缘,南邻塔里木地块,北依中天山微陆块^[1],是中亚造山带重要的构造单元之一,记录着丰富的地质演化信息,其中关键的地质问题是南天山洋盆的构造属性及形成和闭合时限。南天山洋盆始自新元古代中期罗丁尼亚超大陆裂解^[1-5]这一认识已被地质学界普遍认同,然而关于其闭合时限,则有泥盆纪末期^[6-8]、石炭纪早中期^[9-11]、石炭纪末期^[1, 3, 12]、二叠纪末期^[13-17]以及三叠纪^[18-21]等不同认识。关于其俯冲方式,多数学者认为南天山洋盆一直都是向北俯冲而闭合的^[11, 17, 22-24],洋盆的北缘伊犁中天山南缘为古生代活动陆缘,南缘塔里木北缘为被动陆缘。然而近年来的研究发现,塔里木北缘一系列古生代侵入岩形成于活动陆缘环境^[25-29],南天山可能存在向南俯冲的阶段。塔里木北缘在古生代是否是主动大陆边缘,对于笔者了解南天山洋俯冲方式及中亚造山带西南缘的增生历史具有重要意义。

花岗岩类是研究造山带构造发展和构造环境变迁的重要岩浆行为表现方式之一。不同时期、不同成因类型的花岗岩在南天山均有分布,且以古生代花岗岩类为主。总地来看,泥盆纪—早石炭世花岗岩主要以岛弧型 I 型花岗岩为主,晚石炭世花岗岩则以同碰撞 S 型花岗岩为典型,而二叠纪花岗岩为后碰撞 A 型花岗岩。可见,南天山花岗岩具有一定的时空分布规律,并记载着南天山造山过程每一阶段发生的重要岩浆事件,具有极高的研究价值。目前南天山碰撞带南部(本文将其和库鲁克塔格西部并称为塔里木北缘)出露一条侵入岩带,已有研究资料显示,该侵入岩带中的侵入岩从志留纪到石炭纪均有出露^[25-27, 29-30],但由于交通条件不便等原因,先前的研究只限于单个或者附近岩体,这在一定程度上限制了对南天山花岗质侵入岩特征的整体把握和宏观认识,因此需要系统地研究塔里木北缘花岗岩。另外对于南天山洋的俯冲方式,不仅要解决是否存在向南俯冲,还要解决何时向南俯冲;泥盆纪和石炭纪的花岗岩具有岛弧性质,那么志留纪的花岗岩是否同样具有岛弧性质;是否南天山洋在志留纪就已

经开始向南俯冲? 研究志留纪花岗岩是解决这些问题的关键。

本文以塔里木北缘志留纪花岗质侵入岩体为研究对象,以详细的岩石地球化学及年代学研究为基础,结合区域同时代的花岗岩资料及蛇绿岩和地层方面的研究成果,对南天山洋盆俯冲时代和俯冲极性提出新的认识,为进一步深入研究南天山洋消减闭合及其大陆动力学过程提供新的制约。

1 区域地质背景

南天山造山带位于中亚造山带西南缘,南北分别为南天山山前断裂和中天山南缘断裂所限(图 1-A, B)。该带主要由古生代陆缘岩系和古洋残余组成,其形成过程实际上是南天山古洋盆演化的历史。南天山洋开合过程中形成了目前造山带内的 2 条缝合带,一条是中天山南缘蛇绿混杂岩带,分布于哈尔克山北坡长阿吾子—古洛沟—乌瓦门—库米什硫磺山—铜花山—榆树沟一线;另一条为南天山南缘蛇绿混杂岩带,分布于哈尔克山南坡—霍拉山一带。目前蛇绿岩最古老的年龄为 590~600Ma、最年轻的年龄则为 331Ma,说明南天山洋盆在震旦纪中期就已经具有一定规模,在早、中奥陶世达到鼎盛时期,并形成多岛洋的格局。晚奥陶世开始,南天山洋向北俯冲^[24, 31],而该大洋的南侧,即塔里木北缘地区,因出露寒武纪—奥陶纪深海盆地—斜坡沉积,缺乏古生代岩浆活动方面的证据,一直被认为是南天山洋南缘的被动大陆边缘^[32-35]。伴随着俯冲作用,中天山南缘、哈尔克山北缘等地发育有大量高压—超高压变质岩,其年龄主要集中于 415~390Ma 和 370~345Ma 两个年龄段^[11, 36-39],与相应的岛弧岩浆侵位时代相配套,代表俯冲作用发生的时代。然而,对于碰撞作用的时间目前还存在不同的认识,多数人倾向于晚石炭世^[39]。二叠纪构造由挤压变为走滑,出现了大量的走滑构造,并伴随有富钾花岗质侵入岩体,标志该时期进入后碰撞阶段^[11, 40-42]。然而纵观古南天山洋演化的整个过程,它并不是只经历过一次开合的简单洋盆,而是经历了多期收缩和陆缘增生,晚古生代发育有多个微陆块,多个洋盆并存且分段闭合,形成并行的岛弧带和蛇绿岩混杂带^[9, 11]。

库鲁克塔格地区已有的研究工作主要着眼于与 Rodinia 超大陆裂解有关的新元古代花岗岩和火山岩^[43],而对古生代侵入岩和火山岩的研究较少。张艳等^[44]在辛格尔断裂南侧识别出活动大陆边缘型的钙碱性泥盆纪英安岩,并获得其 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 $374.7\text{Ma} \pm 5.9\text{Ma}$ 。校培喜^[45]报道了库鲁克塔格东南缘的岛弧型钙碱性 I 型钾长花岗岩,获得其单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 $430.6\text{Ma} \pm 1.6\text{Ma}$,并认为该区可能为东天山早古生代岩浆弧的一部分。Ge Rongfeng 等^[27]报道了库鲁克塔格地块的首例古生代侵入岩,获得其锆石 U-Pb 年龄分别为 $420.6\text{Ma} \pm 2.3\text{Ma}$ 、 $421.7\text{Ma} \pm 2.8\text{Ma}$ 、 $419.8\text{Ma} \pm 3.3\text{Ma}$,在此基础

上,提出了南天山古洋盆南北双向俯冲的观点^[27]。

2 岩体地质及岩相学特征

塔里木北缘志留纪花岗质侵入岩除了库尔干南岩体和欧西大阪岩体位于哈尔克山南缘库尔干—库如力一带之外,其它岩体零散分布于库鲁克塔格地块西段及辛格尔断裂北侧区域(图 1-C)。研究区志留纪中—酸性侵入岩体特征见表 1。

库尔干南石英闪长岩体出露于库尔干南 14.6km 处,侵入于前寒武纪绿泥石英片岩中,呈小岩枝状。岩石发育片理化构造,呈灰白色,具半自形粒状镶嵌结构,主要由斜长石(65%)、石英(35%)和

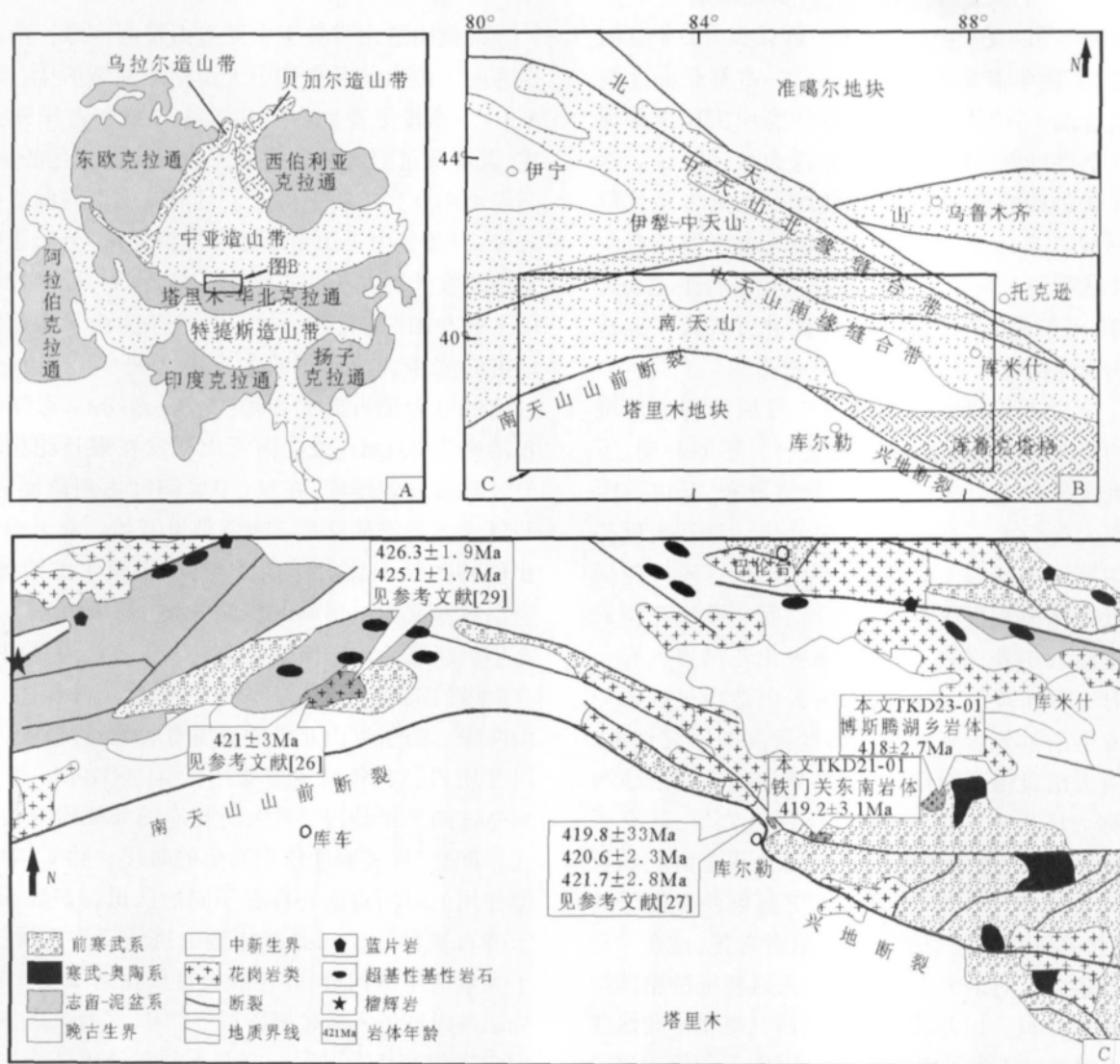


图 1 亚洲大陆构造(A)、南天山地质简图(B)和塔里木北缘志留纪花岗岩类地质图(C)

Fig. 1 Tectonic sketch map of Asia Continent (A), simplified geological map of South Tianshan Mountains and adjacent areas (B) and geological map of Silurian granitoids in northern Tarim craton (C)

表 1 塔里木北缘志留纪侵入岩

Table 1 Silurian granitoid plutons in the northern margin of Tarim plate

岩体名称	岩性	年龄/Ma	测试方法	资料来源
库尔干南岩体	石英闪长岩	426.3±1.9	TIMS 法锆石 U-Pb 测年	据参考文献[29]
	黑云母斜长花岗岩	425.1±1.7		
欧西达坂岩体	石英闪长岩、二长花岗岩	421±3	LA-ICP-MS 法锆石 U-Pb 测年	据参考文献[26]
铁门关岩体	似斑状花岗闪长岩	420.6±2.3		据参考文献[27]
铁门关东南岩体	似斑状花岗闪长岩	419.2 ±3.1		本文
博斯腾乡岩体	黑云石英闪长岩	418±2.7	LA-ICP-MS 法锆石 U-Pb 测年	本文

角闪石(5%)组成,副矿物为磷灰石和榍石等。

库尔干南黑云母斜长花岗岩体位于库尔干 15.2km 处,呈岩脉状产出,围岩为早古生代火山碎屑—沉积岩系,岩石发育片理化构造,蚀变较强,呈灰白色镶嵌结构,主要矿物为斜长石、石英、钾长石、黑云母等,副矿物为榍石、磷灰石、榍石等。

欧西达坂岩体位于独山子—库车公路欧西达坂一带,岩体沿断裂呈近东西向出露,北侧侵入于长城系阿克苏岩群,南侧为二叠系小提坎力克组不整合。岩体由石英闪长岩和二长花岗岩构成,前者分布于岩体北部,后者分布于南部。石英闪长岩为灰黑色,块状构造,它形一半自形粒状结构,由斜长石(74%)、石英(16%)、角闪石(5%)和少量副矿物组成,副矿物为褐铁矿化磁铁矿、锆石和磷灰石;细粒二长花岗岩为浅肉红色,块状构造,自形一半自形粒状结构。主要矿物为石英(49%)、斜长石(20%)、条纹长石(20%±)、微斜长石(10%)和少量白云母(1%),副矿物主要有磷灰石、锆石、磁铁矿等;中粒黑云二长花岗岩为肉红色,主要由斜长石(35%)、微斜长石(30%)、石英(25%)和黑云母(6%)、角闪石(2%)及少量副矿物组成,副矿物主要有磷灰石、锆石和不透明矿物等,黑云母发生轻微变形,角闪石绿泥石化和绿帘石化强烈^[26]。

铁门关岩体位于库尔勒东北部,西北距铁门关水库约 3km,沿国道 314 线多处出露,近东西向多条带状展布,宽度 10~300m,长度 80~500m,侵入于古元古代兴地塔格群中。岩体岩性为似斑状花岗闪长岩,主要由钾长石(30%~35%)、斜长石(10%~15%)、

角闪石(15%~25%)、黑云母(5%~10%)和石英(5%~10%)组成。钾长石与少数斜长石斑晶长度可达 10mm,角闪石颗粒相对细小^[27]。

铁门关东南岩体位于库鲁克塔格西段、博斯腾湖西南岸,东距库尔勒市 12km。岩体呈近东西向不规则状展布,侵入于古元古代混合岩、片岩和大理岩中。岩体主体为中细粒似斑状花岗闪长岩,斑晶为斜长石(5%~10%)和钾长石(10%~15%),半自形粒状,大小一般 3~5mm,星散状分布。斜长石见聚片双晶,波状消光明显,可见双晶弯曲,绢云母和高岭土化。钾长石见格子双晶及钠质条纹,条纹微细脉状,为固溶体出溶产物。基质为斜长石(45~50%)、钾长石(10%~15%)、石英(20%~25%)、黑云母(5%~10%)和少量角闪石,大小一般 1~2mm,少部分 0.2~1mm。斜长石半自形板状,略定向分布,常见聚片双晶、卡钠复合双晶,被绢云母、黝帘石交代,波状消光明显,见双晶弯曲;钾长石为半自形板状,略定向分布,可见格子双晶、钠质条纹;石英呈它形粒状,略定向分布,波状消光强烈,见带状消光,糜棱化明显;黑云母片直径 0.2~2mm,填隙状分布,被绿泥石交代,部分为假象;角闪石呈半自形柱状,星散状分布,被绿泥石交代。

博斯腾乡岩体位于库尔勒地区博斯腾湖南岸,距库尔勒市 55km,形态呈西北—东南方向展布。岩体向南侵入于奥陶纪黑云二长花岗岩(另文报道)中,接触带可见烘烤边和冷凝边(图 2-a,b),北部为第四系。主体岩性为黑云石英闪长岩,半自形粒状结构,块状构造,主要由斜长石(55%~60%)、石英

(5%)、黑云母(10~15%)和角闪石(25%)组成。斜长石呈半自形板状, 粒径多为 2~5mm, 少部分 0.2~2mm, 局部高岭土化、绢云母化和黝帘石化, 环带隐约可见; 石英呈它形粒状, 呈填隙状分布, 粒径 0.1~1.4mm, 波状、带状消光明显; 黑云母呈片状, 红棕色, 无定向, 粒径 2~5mm, 少部分 0.2~2mm, 极少数 5~6mm, 被绿泥石交代, 局部交代角闪石; 角闪石呈半自形柱粒状, 绿褐色, 粒径一般为 2~3.6mm, 少部分为 0.2~2mm, 局部被黑云母交代; 副矿物为磷灰石、锆石、榍石等(图 2-c、d)。

3 分析方法

样品分别采自铁门关东南岩体和博斯腾乡岩体的新鲜部位, 各采集锆石 U-Pb 定年样品 1 件和岩石地球化学样品 5 件, 编号分别为 TKD21-01 和 TKD23-01, 位置如图 1-c。

岩石地球化学样品分析由广州澳实矿物实验室完成。实验过程如下, 将试样煅烧后加入 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ -

LiBO_2 助熔物, 充分混和后, 放置在自动熔炼仪中, 使之在 1000℃ 以上熔融, 熔融物倒出后形成扁平玻璃片, 再用 X 荧光光谱仪分析主量元素, 分析精度优于 5%; 另将试样加入到 LiBO_2 熔剂中, 混合均匀, 在 1000℃ 以上的熔炉中熔化, 熔液冷却后, 用硝酸定容, 再用等离子体质谱仪分析微量和稀土元素, 分析精度优于 10 %。

定年样品锆石分选在廊坊地源矿物测试分选公司完成。将所采新鲜样品粉碎至 60~80 目, 经常规磁选和浮选方法分选后, 在双目镜下挑选晶形和透明度较好、无裂隙和无包裹体的锆石颗粒。将锆石颗粒置于环氧树脂内, 固化后研磨至锆石核心露出, 抛光和清洗制成样品靶, 然后进行阴极发光(CL)照相, 上述工作在北京锆年领航科技有限公司完成。

锆石 U-Pb 定年在天津地质矿产研究所同位素实验室完成, 使用仪器为 Neptune 感耦合等离子体质谱仪和 193nm 激光取样系统(LA-ICP-MS), 激光剥蚀的斑束为 35μm, 能量密度为 13~14 J/cm², 频

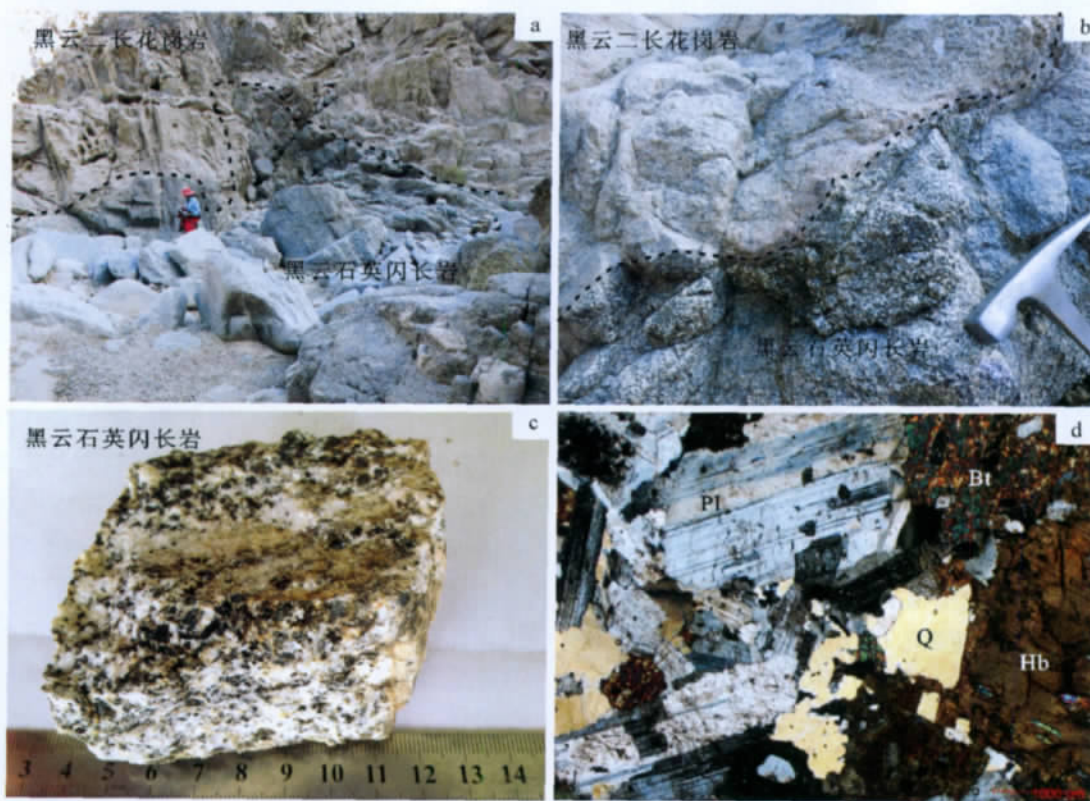


图 2 博斯腾乡岩体黑云石英闪长岩及其显微照片

Fig. 2 Field photographs of biotite quartz diorite in Bosten Lake Township pluton

a、b—博斯腾乡岩体黑云石英闪长岩侵入黑云二长花岗岩, 接触带见烘烤边和冷凝边;
c、d—黑云石英闪长岩, 中粒半自形粒状结构, 块状构造。主要由斜长石、石英、黑云母、角闪石组成

率为 8~10Hz, 激光剥蚀物质以 He 为载气送入 Neptune(MC-ICP-MS)。锆石标样采用 TEMORA 标准锆石, 数据处理采用中国地质大学 Liu 等^[46]编写的 ICPMSData-Cal 程序和 Ludwig^[47]的 Isoplot 程序进行作图, 采用 ^{208}Pb 对普通铅进行校正。利用 NIST612 作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。

4 分析结果

4.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

锆石的 U-Pb 同位素测试结果见表 2, 年龄谐和图见图 3。从锆石阴极发光照片可以看出(图 4), 所测锆石均为长棱柱状、柱状、短柱状, 其中铁门关东南岩体锆石颗粒发光性弱, 博斯腾湖乡岩体锆石颗粒发光性较好, 且二者锆石晶体形态比较完整, 多具岩浆环

带结构。锆石的 Th/U 比值介于 0.15~0.91 之间, 与变质成因锆石 Th/U 值(通常小于 0.1)^[48-50]明显不同, 表现为岩浆锆石的特征。除去显著不谐和的数据(TKD21-01, 2 号点), 2 个样品各测点年龄值均位于 U-Pb 谐和线上或附近。铁门关东南岩体锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $419.2\text{Ma} \pm 3.1\text{Ma}$ ($n=14$, $\text{MSWD}=2.5$)。博斯腾湖乡岩体锆石给出 2 组年龄, 一颗时代较老的锆石(11 号点) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $544.3\text{Ma} \pm 4.7\text{Ma}$, 可能为岩浆上升侵位过程中从下地壳基底中捕获的寒武纪锆石, 另一组年龄为 $418.1\text{Ma} \pm 2.7\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=1.4$), 由 14 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均值得出, 代表了博斯腾湖乡岩体的成岩年龄。上述定年数据表明铁门关东南岩体和博斯腾湖乡岩体均形成于晚志留世。

表 2 志留纪岩体锆石 U-Th-Pb 年龄分析结果

Table 2 U-Th-Pb dating results for zircons

点号	含量/ 10^{-6}		Th/ U	同 位 素 比 值						年 龄 /Ma					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ
铁门关东南岩体: TKD21-01															
1	210	690	0.3	0.5183	0.0195	0.0673	0.0006	0.0558	0.0021	420	4	424	16	445	85
2	372	920	0.4	0.6998	0.0106	0.0572	0.0007	0.0888	0.0015	358	4	539	8	1400	33
3	227	440	0.51	0.5067	0.0126	0.0673	0.0006	0.0546	0.0013	420	4	416	10	396	5
4	207	494	0.42	0.5139	0.0092	0.0674	0.0006	0.0553	0.0010	421	4	421	8	423	39
5	222	424	0.52	0.5026	0.0093	0.0656	0.0004	0.0556	0.0010	410	3	413	8	436	40
6	81	149	0.55	0.5286	0.0254	0.0667	0.0007	0.0575	0.0027	416	4	431	21	510	103
7	121	807	0.15	0.5044	0.0077	0.0672	0.0005	0.0544	0.0008	419	3	415	6	389	34
8	201	982	0.2	0.5148	0.0074	0.0674	0.0006	0.0554	0.0008	420	4	422	6	429	32
9	200	690	0.29	0.5063	0.019	0.0676	0.0006	0.0543	0.0021	422	4	416	16	385	86
10	254	853	0.3	0.5011	0.0074	0.0667	0.0006	0.0545	0.0008	416	4	412	6	393	32
11	129	566	0.23	0.5121	0.0091	0.0668	0.0005	0.0556	0.0010	417	3	420	8	436	39
12	200	507	0.4	0.5309	0.0085	0.0696	0.0006	0.0553	0.0009	434	4	432	7	424	35
13	184	456	0.4	0.5197	0.0091	0.0668	0.0005	0.0564	0.0010	417	3	425	7	469	38
14	211	344	0.61	0.513	0.0086	0.0676	0.0006	0.0551	0.0009	422	4	420	7	415	36
15	235	440	0.53	0.5409	0.0094	0.0676	0.0005	0.0580	0.0010	422	3	439	8	531	37
博斯腾湖乡岩体: TKD23-01															
1	127	146	0.87	0.5065	0.0298	0.0666	0.0006	0.0552	0.0034	416	4	416	24	419	136
2	106	130	0.81	0.5128	0.0296	0.0669	0.0006	0.0556	0.0033	417	4	420	24	436	131
3	19	37	0.53	0.4805	0.0438	0.0679	0.0008	0.0514	0.0049	423	5	398	36	257	219
4	16	30	0.54	0.4574	0.053	0.0668	0.0009	0.0497	0.0058	417	6	382	44	181	274
5	16	32	0.51	0.4777	0.0537	0.0676	0.0009	0.0513	0.0007	422	6	396	45	253	30
6	21	37	0.56	0.4849	0.0497	0.0664	0.0007	0.0530	0.0057	414	4	401	41	328	245
7	17	30	0.58	0.5138	0.0517	0.0676	0.001	0.0551	0.0051	422	7	421	42	418	208
8	115	146	0.79	0.5197	0.0314	0.0665	0.0006	0.0566	0.0034	415	4	425	26	477	135
9	17	32	0.53	0.4669	0.0495	0.0675	0.0009	0.0502	0.0057	421	5	389	41	203	264
10	26	49	0.54	0.5139	0.058	0.0678	0.0005	0.0550	0.0063	423	3	421	48	412	255
11	185	412	0.45	0.7084	0.0158	0.0881	0.0008	0.0583	0.0010	544	5	544	12	542	36
12	34	53	0.64	0.5103	0.0491	0.0666	0.0006	0.0556	0.0055	416	4	419	40	435	221
13	24	44	0.54	0.4738	0.0503	0.0669	0.0007	0.0513	0.0049	418	4	394	42	255	220
14	342	376	0.91	0.5173	0.0106	0.0666	0.0005	0.0563	0.0012	416	3	423	9	466	46
15	142	158	0.9	0.5097	0.0243	0.0665	0.0005	0.0556	0.0027	415	3	418	20	435	109

4.2 地球化学特征

研究区志留纪除库尔干南岩体外其余 4 个岩体样品的主量元素与微量元素数据见表 3。博斯腾乡岩体样品具有较低的 SiO_2 (53.43%~55.69%), 相应高含量的 CaO (5.98%~7.41%)、 MgO (3.22%~4.2%)、 TFe_2O_3 (8.71%~11.24%)、 Al_2O_3 (15.85%~16.93%)、 MnO (0.15%~0.18%)、 TiO_2 (1.32%~1.89%)、 P_2O_5 (0.3%~0.47%); 铁门关岩体样品具有相对较高的 SiO_2 (62.21%~67.45%)、 CaO (2.7%~4.61%)、 MgO (0.74%~2.50%)、 TFe_2O_3 (3.06%~6.03%)、 Al_2O_3 (15.22%~16.11%)、 MnO (0.04%~0.10%)、 TiO_2 (0.46%~0.83%)、 P_2O_5 (0.16%~0.24%) 含量相对较低; 铁门关东南岩体和欧西达坂岩体 SiO_2 (分别为 65.06%~74.14%, 55.46%~75.50%) 变化范围较宽, 相应的 CaO (分别

为 0.79%~3.2%, 0.42%~6.23%)、 MgO (分别为 0.3%~0.95%, 0.25%~4.25%)、 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$ (分别为 2.0%~4.72%, 1.67%~8.59%)、 Al_2O_3 (分别为 12.81%~16.33%, 13.09%~16.92%)、 MnO (分别为 0.03%~0.11%, 0.03%~0.13%)、 TiO_2 (分别为 0.19%~0.45%, 0.16%~0.90%)、 P_2O_5 (分别为 0.03%~0.14%, 0.05%~0.21%) 也呈现较宽的变化范围。

在铅饱和指数图解(图 5)中, 除欧西达坂岩体 2 个样品具有比较高的 A/CNK 值外, 其余都在 0.82~1.05 之间, 属准铝质—弱过铝质。在 SiO_2 - K_2O 图解(图 6)上可以看出, 4 个岩体随 SiO_2 含量的增加, 石英闪长岩—二长花岗岩形成由钙碱性逐渐向高钾钙碱性过渡的岩浆演化趋势。结合岩相学特征, 岩体均未见白云母、堇青石等过铝质矿物, 可知志留纪花岗

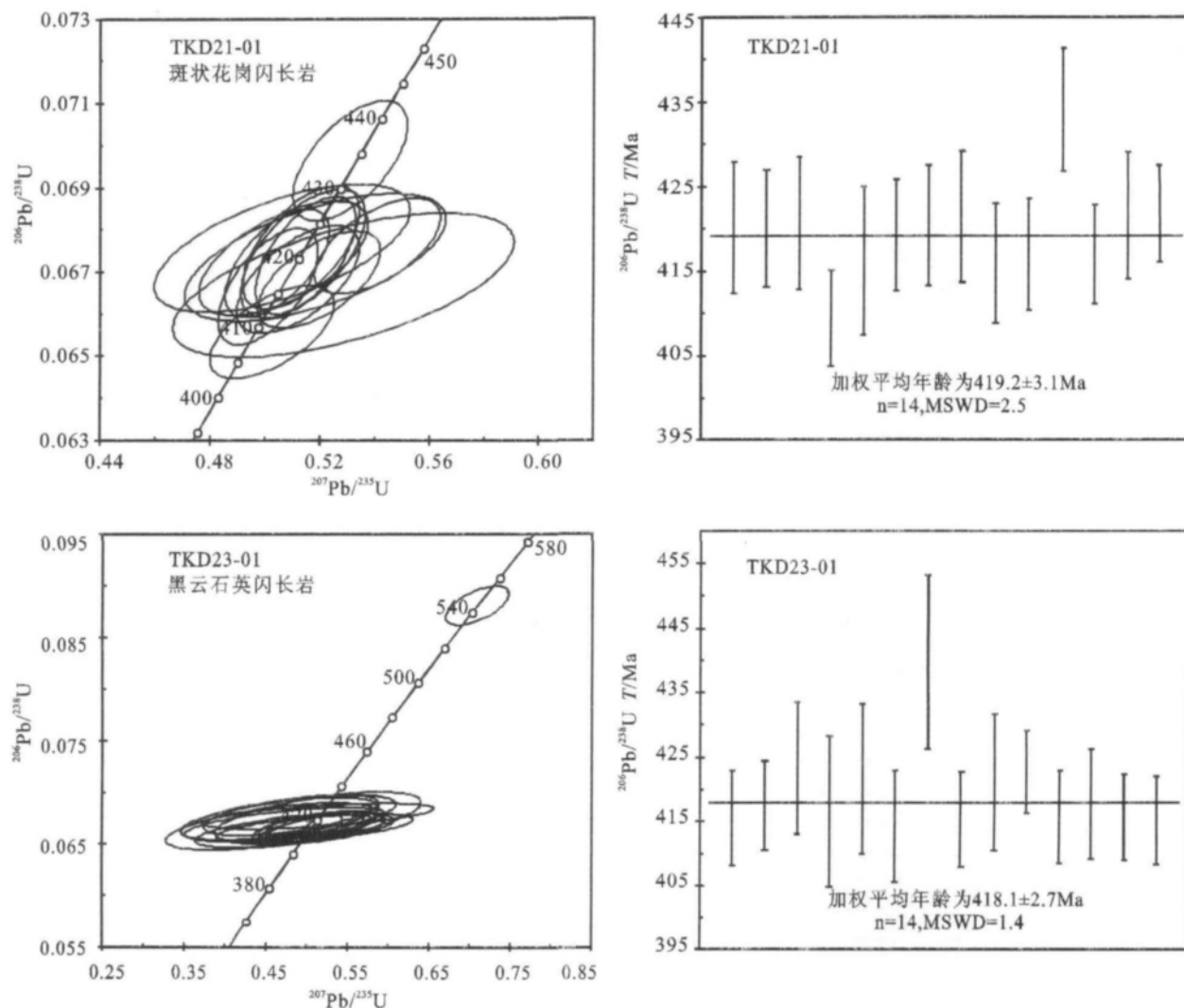


图 3 锆石的 U-Pb 谐和图

Fig. 3 U-Pb concordia diagram of zircons

质岩石应为钙碱性—高钾钙碱性 I 型花岗岩。

稀土元素球粒陨石标准化配分模式见(图 7),所有样品均表现出轻稀土元素富集,重稀土元素亏损的特征。稀土元素总量($\sum \text{REE}$)为 $95.68 \times 10^{-6} \sim 217.76 \times 10^{-6}$, $\sum \text{LREE}$ 为 $84.33 \times 10^{-6} \sim 183.90 \times 10^{-6}$, $\sum \text{HREE}$ 为 $10.71 \times 10^{-6} \sim 37.05 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 为 $4.31 \sim 13.5$ 。就表征轻重稀土元素分馏程度的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值而言,博斯腾湖乡岩体、欧西达坂岩体、铁门关东南岩体样品的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值较低(分别为 $5.52 \sim 6.52, 4.39 \sim 9.49, 3.93 \sim 20.30$),而铁门关岩体样品的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 相对较高($7.88 \sim 17.14$)。铁门关东南岩体具较明显的 Eu(δEu 为 $0.46 \sim 0.68$)负异常,其余样品均具轻微的 Eu 负异常。Eu 负异常暗示在岩浆源区有斜长石残留或经历了较强的斜长石的分离结晶。

微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 7)显示,不同岩体的微量元素配分曲线既存在相似性,又具有差异性。相似性表现在,所有岩体的不同岩石类型均显示出大离子亲石元素(LILE)相对于高场强元素(HSFE)富集,Nb、Ta、P、Ti 呈现不同程度的负异常,以及正的 Rb、K 和 U 异常。研究显示,Ta、Nb 的亏损暗示岩浆不可能由软流圈部分熔融直接产生,而应该来自于地壳或壳幔混染,可能与俯冲作用有关^[51-52]。同时 P、Ti、Nb、Ta 的负异常也显示源区可能有磷灰石和钛铁矿、金红石、角闪石的残留或存在结晶分异。差异性表现在以下 3 个方面:①博斯腾湖乡岩体的 LILE 相对 HFSE 的富集程度要低一些,而其它岩体强烈富集 LILE,且该岩体 P、Nb 和 Ta 的负异常轻微,其它岩体均有很明显的 P、Nb 和 Ta 的负异常。②铁门关岩体 Zr 和 Hf 具正异常,而其它岩体 Zr 和 Hf 无异常,或具弱的负异常。③铁门关东南岩体有明显的 Ba 负异常,而其它岩体样品富集 Ba 或无异常。

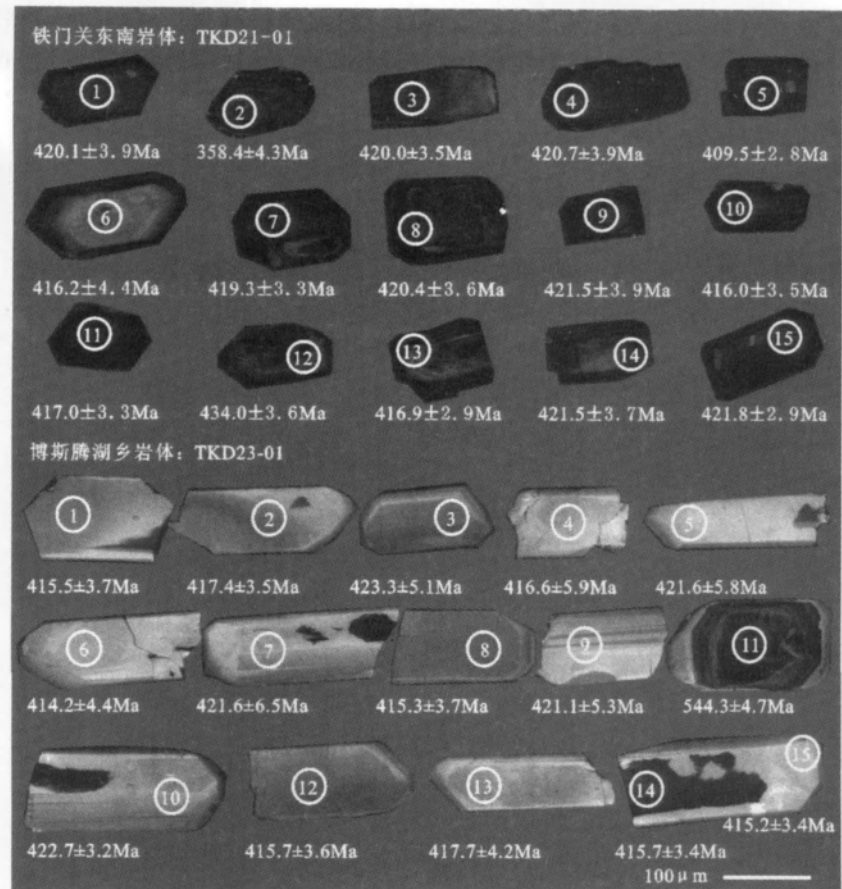


图 4 锆石 CL 图像

Fig. 4 CL images of zircons

5 岩体成因及源区

塔里木北缘志留纪花岗岩类具有 I 型花岗岩的特征,其中欧西达坂岩体 2 个样品的地球化学特征虽表现出 S 型花岗岩特征(铝饱和指数 > 1.1),但是样品具有高的 Na_2O 和 CaO 含量,并且不存在堇青石,可能为演化程度较高或沉积岩混染的 I 型花岗岩^[26,53],因此其整体仍表现出 I 型花岗岩特征。所有样品的 K/Rb 值($204.14 \sim 704.14$)均大于 200,表明岩浆分异或水热作用不明显^[54],因此样品的岩石地球化学特征可以反映源区岩浆的特征和岩浆部分熔融时的 $p-T$ 条件。

博斯腾湖乡岩体和欧西达坂岩体的石英闪长岩 SiO_2 含量在 $53.25\% \sim 58.29\%$ 之间, MgO 含量 ($2.51\% \sim 4.25\%$) 和 $\text{Mg}^\#$ 值 ($42.2 \sim 54.4$) 较低,无堆晶角闪石岩和辉长岩出现,可能为壳源。前人^[55-57]据实验指出,下陆壳变质玄武岩经脱水熔融可产生相当数量的石

表 3 岩体主量、微量及稀土元素分析结果

Table 3 Major elements and trace elements analyses of the intrusion

岩体名称	欧西达坂岩体:石英闪长岩-二长花岗岩							铁门关岩体
样号	05KC142	05KC143	05KC146	05KC148	05KC149	05KC150	05KC154	10T20
SiO ₂	56.31	55.46	58.29	72.82	75.50	74.27	65.16	64.69
Al ₂ O ₃	16.92	16.02	15.73	13.63	13.09	13.61	14.34	16.01
Fe ₂ O ₃	8.59	7.63	6.05	2.14	1.71	1.67	3.90	4.38
CaO	4.79	6.23	4.77	1.71	0.42	0.88	4.01	3.83
MgO	4.25	3.91	2.51	0.36	0.31	0.25	1.34	1.44
Na ₂ O	3.84	3.58	3.18	4.27	3.71	4.02	4.28	4.39
K ₂ O	1.08	0.94	2.00	2.59	4.16	3.38	2.21	2.66
TiO ₂	0.93	0.89	0.67	0.24	0.16	0.19	0.42	0.72
MnO	0.13	0.12	0.08	0.05	0.04	0.03	0.06	0.08
P ₂ O ₅	0.21	0.19	0.15	0.08	0.05	0.07	0.14	0.24
LOI	3.22	5.51	6.91	1.99	0.86	1.53	4.14	1.33
Total								99.77
A/CNK	1.04	0.88	0.98	1.05	1.15	1.15	0.86	0.94
Na ₂ O+K ₂ O	4.92	4.52	5.18	6.86	7.87	7.40	6.49	7.05
Na ₂ O/K ₂ O	3.56	3.81	1.59	1.65	0.89	1.19	1.94	1.65
Ba	387.56	257.78	262.91	519.72	647.30	644.28	1878.74	1118.88
Rb	35.42	33.34	80.72	88.83	100.77	94.01	75.55	40.51
Sr	517.32	401.39	285.73	207.48	115.09	154.09	436.37	425.49
Hf	5.61	5.78	3.75	4.49	3.68	4.86	4.31	7.64
Zr	213.05	213.08	141.84	136.10	100.50	144.25	147.82	307.16
Nb	10.05	11.57	7.31	13.24	5.94	10.63	9.78	15.20
Ta	0.90	0.93	0.69	1.54	0.71	1.44	0.82	0.87
Th	4.95	3.98	2.94	4.78	3.40	9.11	24.74	6.33
U	0.78	0.58	0.55	0.92	0.85	2.28	1.87	1.08
Cs	1.37	2.53	5.98	2.79	2.32	2.34	3.42	0.95
Ga	21.42	20.79	18.51	17.16	14.78	16.29	20.37	17.44
La	24.96	23.70	18.83	28.66	19.24	35.11	31.89	32.96
Ce	50.94	56.95	40.35	57.74	39.39	68.76	63.47	57.32
Pr	6.13	7.67	5.00	6.69	4.57	7.85	7.40	7.05
Nd	23.73	30.63	19.46	23.64	16.59	27.68	26.99	26.32
Sm	5.31	6.90	4.31	4.81	3.64	5.33	5.31	4.92
Eu	1.37	1.31	1.05	0.83	0.90	1.05	1.24	1.64
Gd	5.53	6.86	4.29	4.95	3.43	5.15	5.17	4.46
Tb	0.83	1.07	0.66	0.76	0.49	0.73	0.74	0.60
Dy	5.02	6.46	4.00	4.65	2.90	4.48	4.45	3.88
Ho	1.07	1.41	0.85	0.97	0.61	0.96	0.92	0.84
Er	2.84	3.79	2.30	2.59	1.63	2.69	2.48	2.40
Tm	0.43	0.58	0.36	0.38	0.25	0.42	0.37	0.32
Yb	2.83	3.87	2.44	2.55	1.76	2.98	2.41	2.18
Lu	0.43	0.57	0.35	0.38	0.28	0.47	0.35	0.34
Y	27.73	36.85	20.73	24.83	14.44	25.67	25.06	17.98
Eu*	0.77	0.58	0.75	0.52	0.78	0.61	0.72	1.07
La/Yb	6.33	4.39	5.54	8.06	7.84	8.45	9.49	10.85
Gd/Yb	1.62	1.47	1.45	1.61	1.61	1.43	1.77	1.69
La/Sm	3.03	2.22	2.82	3.85	3.41	4.25	3.88	4.32

续表 3-1

岩体名称	铁门关岩体: 似斑状花岗岩闪长岩							
样号	10T26	10T27	10T28	10T29	10T30	10T31	10T32	10T33
SiO ₂	62.21	62.90	62.40	67.45	66.02	66.90	63.09	62.52
Al ₂ O ₃	15.80	15.76	15.52	15.35	15.22	15.85	15.48	15.26
Fe ₂ O ₃	6.03	4.90	5.99	3.25	4.67	3.76	5.39	5.95
CaO	4.06	4.61	3.91	2.70	3.34	3.15	4.22	3.49
MgO	2.16	2.40	2.36	0.99	1.13	1.11	2.50	2.15
Na ₂ O	3.97	4.19	4.05	3.49	4.03	3.91	4.08	3.83
K ₂ O	2.87	2.85	2.82	5.15	3.56	3.65	2.44	3.87
TiO ₂	0.83	0.75	0.81	0.51	0.70	0.61	0.79	0.83
MnO	0.10	0.08	0.09	0.06	0.06	0.05	0.09	0.09
P ₂ O ₅	0.22	0.18	0.21	0.17	0.22	0.21	0.18	0.19
LOI	1.35	1.03	1.44	0.75	0.78	0.63	1.36	1.42
Total	99.58	99.65	99.60	99.87	99.75	99.83	99.63	99.62
A/CNK	0.93	0.86	0.92	0.95	0.92	0.98	0.91	0.91
Na ₂ O+K ₂ O	6.84	7.04	6.87	8.64	7.59	7.56	6.52	7.70
Na ₂ O/K ₂ O	1.38	1.47	1.44	0.68	1.13	1.07	1.67	0.99
Ba	839.80	900.84	947.93	1440.84	1182.31	1331.36	911.19	1110.00
Rb	68.33	62.94	67.13	66.40	64.57	67.07	46.47	87.42
Sr	345.89	372.69	362.92	303.99	320.26	328.24	371.06	369.84
Hf	6.76	6.84	6.58	6.50	6.40	7.30	5.63	6.33
Zr	277.28	248.40	251.35	259.45	273.84	306.93	220.44	263.89
Nb	14.65	12.64	15.06	14.11	13.41	12.68	13.10	13.66
Ta	0.76	1.12	0.86	1.13	0.62	0.55	1.11	1.05
Th	6.14	10.55	5.63	7.38	5.81	7.02	7.54	6.91
U	1.15	3.66	1.00	1.26	0.94	1.15	2.11	1.00
Cs	1.75	2.49	1.74	0.84	2.25	2.74	1.57	1.63
Ga	18.72	19.49	18.82	15.80	18.16	18.50	18.53	17.93
La	20.87	36.28	33.58	34.52	37.39	43.73	32.92	37.40
Ce	40.85	66.59	64.86	65.37	67.64	76.70	60.70	70.84
Pr	4.69	7.69	7.78	7.73	7.68	8.27	6.82	7.92
Nd	19.13	28.56	30.62	29.31	28.13	29.76	25.45	28.08
Sm	4.22	5.40	6.14	5.64	5.02	5.18	4.77	5.65
Eu	1.48	1.55	1.58	1.32	1.47	1.52	1.33	1.46
Gd	3.82	5.00	5.90	5.08	4.49	4.23	4.56	7.17
Tb	0.53	0.67	0.81	0.71	0.59	0.56	0.63	0.68
Dy	3.69	4.61	5.59	4.81	3.72	3.47	4.18	4.71
Ho	0.75	1.02	1.24	1.05	0.78	0.72	0.90	1.01
Er	2.14	2.99	3.41	2.89	2.00	2.06	2.50	2.89
Tm	0.30	0.43	0.51	0.43	0.29	0.28	0.36	0.41
Yb	1.90	2.87	2.93	2.66	1.85	1.83	2.37	2.61
Lu	0.32	0.46	0.46	0.43	0.28	0.29	0.41	0.40
Y	17.22	22.01	25.86	23.47	17.23	16.29	20.68	23.16
Eu*	1.13	0.91	0.80	0.75	0.95	0.99	0.87	0.82
La/Yb	7.88	9.07	8.22	9.31	14.50	17.14	9.96	10.28
Gd/Yb	1.66	1.44	1.67	1.58	2.01	1.91	1.59	2.27
La/Sm	3.19	4.34	3.53	3.95	4.81	5.45	4.46	4.27

续表 3-2

岩体名称	铁 门 关 岩 体: 似 斑 状 花 岗 岩 闪 长 岩						铁门关东南岩体	
样号	10T34	10T35	10T36	10T37	10T38	10T39	TKD21-01	TKD21-01-1
SiO ₂	67.14	66.28	67.17	64.24	66.17	64.34	66.67	65.24
Al ₂ O ₃	15.56	15.76	16.00	15.24	16.11	15.56	16.10	16.25
Fe ₂ O ₃	3.79	3.88	3.06	5.44	3.79	5.09	4.23	4.72
CaO	3.26	3.21	2.77	3.66	3.17	3.65	3.20	2.76
MgO	1.06	1.40	0.74	2.01	1.18	1.80	0.90	0.95
Na ₂ O	3.86	4.24	4.12	3.83	4.39	4.20	5.31	4.85
K ₂ O	3.50	3.00	4.56	3.02	2.88	2.90	1.83	2.81
TiO ₂	0.61	0.62	0.46	0.74	0.59	0.74	0.25	0.45
MnO	0.05	0.06	0.04	0.08	0.05	0.08	0.11	0.07
P ₂ O ₅	0.21	0.19	0.16	0.20	0.20	0.22	0.13	0.14
LOI	0.76	1.21	0.87	1.20	1.34	1.14	1.15	1.50
Total	99.82	99.84	99.94	99.65	99.87	99.71	99.92	99.82
A/CNK	0.97	0.98	0.96	0.94	1.00	0.93	0.97	1.01
Na ₂ O+K ₂ O	7.36	7.24	8.68	6.85	7.27	7.10	7.14	7.66
Na ₂ O/K ₂ O	1.10	1.41	0.90	1.27	1.52	1.45	2.90	1.73
Ba	1299.07	863.25	1613.70	1003.99	840.87	883.36	266.00	634.00
Rb	62.66	52.08	53.76	56.17	43.68	51.62	55.60	75.20
Sr	341.32	328.16	348.48	321.22	321.46	325.35	235.00	250.00
Hf	5.97	5.98	5.61	4.47	5.40	5.34	6.80	10.30
Zr	274.23	225.80	209.24	181.97	236.34	221.34	249.00	396.00
Nb	12.52	14.21	9.01	13.60	13.72	14.85	16.10	22.80
Ta	0.52	1.30	0.59	0.94	1.07	1.17	1.10	1.80
Th	5.48	9.30	5.63	7.49	9.03	8.04	17.85	22.10
U	0.84	2.46	1.15	1.87	2.26	2.47	2.99	2.68
Cs	2.31	1.44	2.06	1.77	1.69	1.78	0.95	0.94
Ga	18.50	18.39	17.16	18.58	17.38	18.47	23.70	23.60
La	34.94	27.35	26.84	35.40	28.65	30.22	30.10	34.50
Ce	64.29	49.65	47.82	63.67	52.93	54.70	63.00	67.10
Pr	6.98	6.03	5.46	7.05	6.16	6.50	7.84	8.04
Nd	26.06	21.98	19.92	25.22	23.10	24.65	31.30	31.70
Sm	4.74	4.59	3.49	4.33	4.23	4.76	7.44	7.63
Eu	1.36	1.25	1.26	1.36	1.23	1.38	1.49	1.60
Gd	4.05	4.16	3.16	3.98	3.95	4.25	8.05	8.55
Tb	0.52	0.58	0.41	0.52	0.55	0.56	1.33	1.41
Dy	3.23	3.90	2.89	3.37	3.36	3.74	7.84	9.64
Ho	0.69	0.85	0.58	0.70	0.75	0.84	1.77	2.01
Er	1.88	2.53	1.65	2.00	2.10	2.40	5.35	5.83
Tm	0.27	0.37	0.24	0.31	0.32	0.36	0.88	0.94
Yb	1.60	2.37	1.52	1.88	2.01	2.41	5.50	5.62
Lu	0.26	0.38	0.26	0.31	0.32	0.40	0.82	0.92
Y	16.06	20.18	12.71	16.53	17.78	19.32	52.70	59.10
Eu*	0.95	0.87	1.16	1.00	0.92	0.94	0.59	0.61
La/Yb	15.66	8.28	12.67	13.51	10.22	8.99	5.47	6.14
Gd/Yb	2.09	1.45	1.72	1.75	1.63	1.46	1.46	1.52
La/Sm	4.76	3.85	4.96	5.28	4.37	4.10	4.05	4.52

续表 3-3

岩体名称	铁门关东南岩体:斑状花岗闪长岩			博 斯 腾 乡 岩 体:黑 云 石 英 闪 长 岩				
样号	TKD21-01-2	TKD21-01-3	TKD21-01-4	TKD23-01	TKD23-01-1	TKD23-01-2	TKD23-01-3	TKD23-01-4
SiO ₂	72.70	74.14	65.06	55.69	55.24	55.25	53.25	53.43
Al ₂ O ₃	13.29	12.81	16.33	15.85	16.93	16.01	16.01	16.00
Fe ₂ O ₃	2.10	2.00	3.89	8.87	8.71	10.14	9.94	11.24
CaO	0.96	0.79	2.99	6.65	7.41	5.98	6.98	6.34
MgO	0.31	0.30	0.76	3.66	3.68	3.22	4.20	3.57
Na ₂ O	3.57	3.39	5.33	3.32	3.52	3.40	3.43	3.35
K ₂ O	5.03	4.95	2.20	1.51	1.39	1.69	1.20	1.80
TiO ₂	0.22	0.19	0.20	1.38	1.32	1.72	1.47	1.89
MnO	0.03	0.03	0.09	0.15	0.15	0.15	0.16	0.18
P ₂ O ₅	0.05	0.04	0.11	0.30	0.32	0.45	0.30	0.47
LOI	0.71	0.84	1.10	1.15	1.14	1.05	1.62	0.96
Total	99.03	99.52	98.09	98.61	99.89	99.14	98.64	99.31
A/CNK	1.02	1.04	0.98	0.83	0.82	0.88	0.82	0.84
Na ₂ O+K ₂ O	8.60	8.34	7.53	4.83	4.91	5.09	4.63	5.15
Na ₂ O/K ₂ O	0.71	0.68	2.42	2.20	2.53	2.01	2.86	1.86
Ba	603.00	430.00	295.00	485.00	433.00	478.00	431.00	487.00
Rb	151.50	136.00	59.50	55.40	51.60	62.30	48.80	65.70
Sr	125.50	104.50	250.00	307.00	370.00	316.00	373.00	303.00
Hf	5.10	4.90	6.90	3.60	2.80	8.90	4.20	9.70
Zr	192.00	162.00	247.00	138.00	95.00	369.00	164.00	423.00
Nb	12.10	12.70	14.50	14.50	15.30	20.80	14.20	22.90
Ta	1.00	1.70	1.20	0.90	0.90	1.20	0.90	1.30
Th	21.70	21.10	28.20	4.11	2.43	2.86	2.98	3.02
U	1.81	2.09	3.37	1.26	0.66	1.12	1.08	1.15
Cs	0.58	0.85	0.80	1.60	1.30	1.97	1.43	1.83
Ga	16.40	16.00	24.20	19.50	21.00	21.30	20.10	22.10
La	53.20	48.90	32.60	26.90	29.90	32.40	26.00	36.40
Ce	87.60	83.20	61.80	53.10	59.80	68.10	52.00	79.60
Pr	8.81	8.56	7.20	6.41	7.49	8.58	6.37	10.25
Nd	28.80	28.40	27.00	25.60	30.80	34.50	26.90	42.50
Sm	4.71	4.76	6.19	5.56	7.03	7.34	6.34	9.51
Eu	0.78	0.69	1.45	1.96	2.07	2.34	2.01	2.45
Gd	4.07	4.43	6.77	6.35	7.61	8.13	6.96	10.80
Tb	0.62	0.70	1.15	1.00	1.17	1.27	1.10	1.63
Dy	3.71	4.38	7.66	6.36	7.71	8.17	7.24	10.50
Ho	0.73	0.91	1.67	1.30	1.52	1.60	1.46	2.11
Er	1.99	2.71	5.02	3.45	4.25	4.48	3.93	5.70
Tm	0.34	0.45	0.79	0.51	0.62	0.67	0.60	0.83
Yb	1.88	2.85	4.85	2.96	3.44	3.68	3.38	4.70
Lu	0.29	0.49	0.80	0.49	0.54	0.61	0.56	0.78
Y	21.40	27.30	50.50	35.00	41.40	43.10	39.10	56.70
Eu*	0.54	0.46	0.68	1.01	0.87	0.93	0.93	0.74
La/Yb	28.30	17.16	6.72	9.09	8.69	8.80	7.69	7.74
Gd/Yb	2.16	1.55	1.40	2.15	2.21	2.21	2.06	2.30
La/Sm	11.30	10.27	5.27	4.84	4.25	4.41	4.10	3.83

注:欧西达坂岩体数据据参考文献[26],铁门关岩体数据据参考文献[27]。主量元素含量为%,稀土和微量元素含量为 10⁻⁶

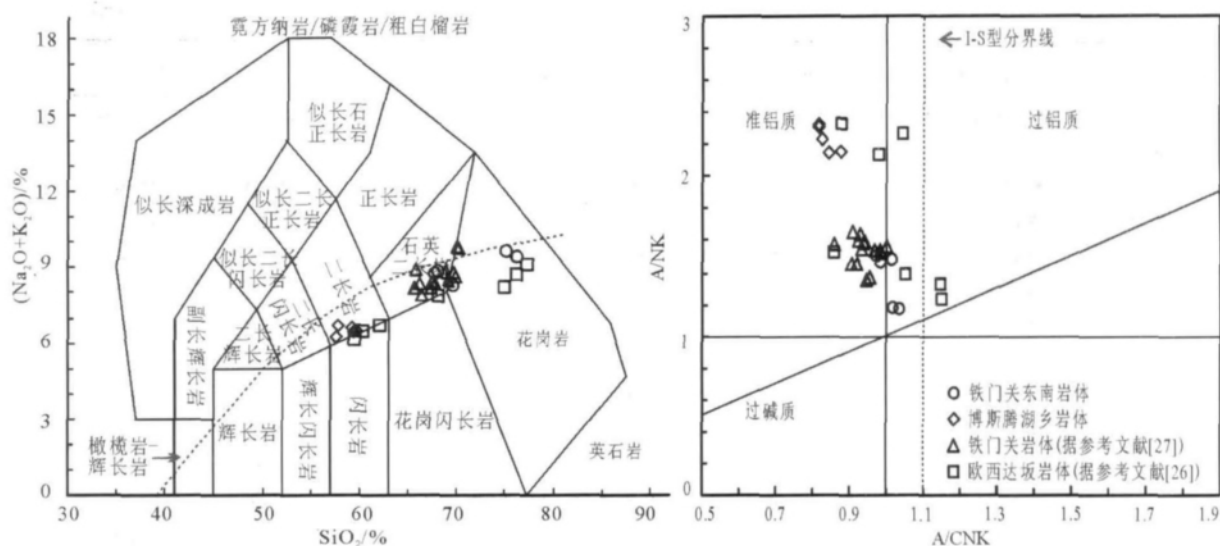


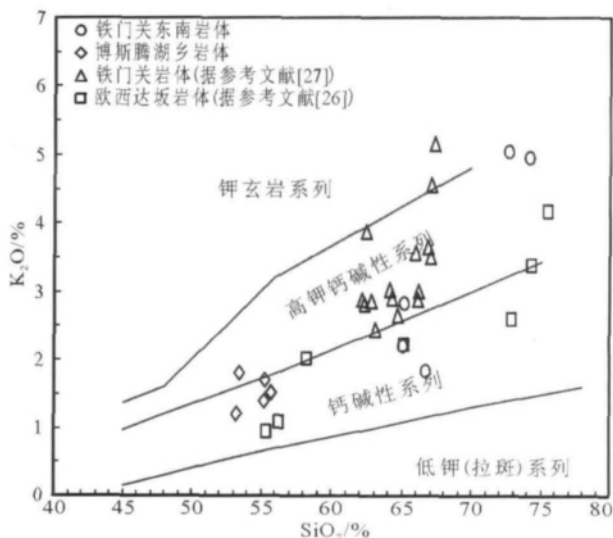
图 5 花岗岩 TAS 图解和 A/CNK-A/NK 图解

Fig. 5 TAS diagrams for granite and A/CNK-A/NK

英闪长质岩浆, 尤其在下陆壳存在高温热源条件下, 熔融更易发生^[57]。博斯腾湖乡岩体和欧西达坂岩体的石英闪长岩 Al_2O_3 和轻稀土元素含量高, 重稀土元素含量低, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值 (1.59~3.81) 高, Rb/Sr 值 (0.01~0.28) 低, Eu 负异常 (0.58~1.01) 不太显著, 这些特征与变质玄武岩^[57]在高温 (1000~1100℃) 和高压 (>1600MPa) 条件下部分熔融产生的熔体成分相近。在 Rapp 等^[57]实验所用的变质玄武岩中, 碱性玄武岩部分熔融产生的熔体具有较高的 Na_2O 含量 (>6%) 和较低的 CaO (<5%) 及 MgO (<3%) 含量^[57], 因此碱性玄武岩不大可能是博斯腾湖乡岩体和欧西达坂岩体石英闪长岩的合适源岩; 同样, 高铝玄武岩部分熔融产生的熔体因具有较高的 TiO_2 (>1.9%) 含量, 所以高铝玄武岩也不是石英闪长岩的合适源岩; 石英闪长岩与低钾玄武岩部分熔融产生的熔体具有近似的 CaO (>4%)、 MgO (>1%) 和 TiO_2 (0.3%~1.5%) 含量, 但低钾玄武岩部分熔融产生的熔体 K_2O 含量较低 (<1%)^[57]。因此, 博斯腾湖乡岩体和欧西达坂岩体石英闪长岩的源岩可能为中高钾的变质玄武岩。

根据熔融实验, 石英闪长岩熔体中 Al_2O_3 的含量是压力的指示计, 当压力小于等于 1600MPa 时, 熔体的 Al_2O_3 含量低于 15%, 残留物为角闪石、斜长石和斜方辉石; 当压力大于 1600MPa 时, 熔体的 Al_2O_3 大于 15%, 残留体为单斜辉石、角闪岩、斜长

石和石榴子石^[58]; 当成岩压力大于或等于 1800MPa 时, 斜长石在源区变得不稳定, 残留相主要以含石榴子石的高压麻粒岩相或榴辉岩相为主^[59]。博斯腾湖乡岩体和欧西达坂岩体的石英闪长岩 Al_2O_3 (15.73%~16.93%) >15%, 指示其成岩压力大于 1600MPa。此压力下石榴子石作为残留相出现, 鉴于石英闪长岩具有一定程度的负 Eu 异常, 残留相中含有斜长石, 因而该石英闪长岩的成岩压力不可能超过 1800MPa。因此, 博斯腾湖乡岩体和欧西达坂岩

图 6 花岗岩 (SiO_2 - K_2O) 图解Fig. 6 SiO_2 - K_2O diagram

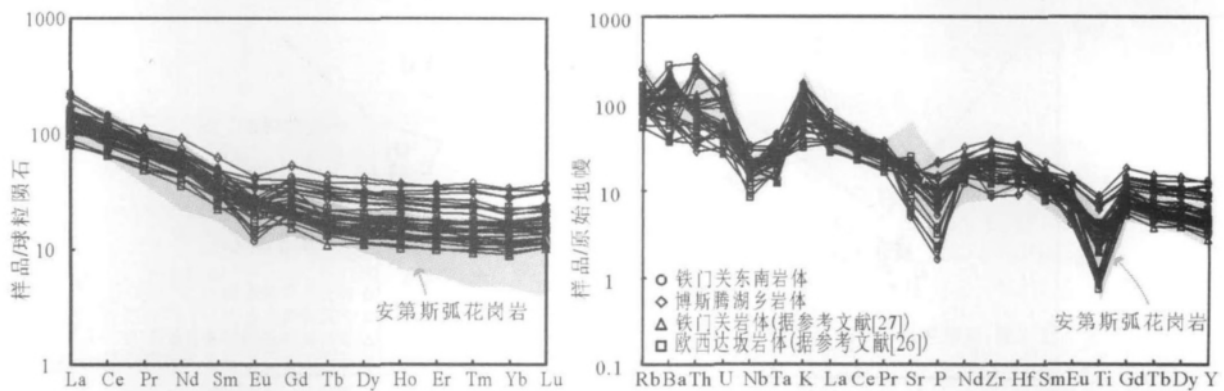


图 7 稀土元素球粒陨石标准化图解和微量元素原始地幔标准化图解

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized multi-element diagram

体的石英闪长岩成岩的温压条件可能为 1000~1100℃和 1600~1800MPa。

欧西达坂岩体的二长花岗岩、铁门关岩体和铁门关东南岩体的花岗闪长岩 SiO_2 含量在 62.6%~75.5%之间,属钙碱性—高钾钙碱性系列。铁门关岩体花岗闪长岩具高 Ba ($840 \times 10^{-6} \sim 1614 \times 10^{-6}$),中等 Sr ($304 \times 10^{-6} \sim 425 \times 10^{-6}$)和 Yb 值 ($1.5 \times 10^{-6} \sim 2.9 \times 10^{-6}$), $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值介于 7.9~17.2 之间,且具弱的 Eu 负异常 (0.75~1.16),表明源区残留相为斜长石和石榴子石。锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围较宽,在 -14.2~0 之间,其两阶段模式年龄为 1.4~1.6Ga,表明岩体的岩浆来源于古老地壳和亏损地幔 2 种不同岩浆的混合^[27]。

铁门关东南岩体花岗闪长岩具有低的 Ba ($266 \times 10^{-6} \sim 634 \times 10^{-6}$)和 Sr ($104.5 \times 10^{-6} \sim 250 \times 10^{-6}$),高 Yb 值 ($1.88 \times 10^{-6} \sim 5.62 \times 10^{-6}$), $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值在 3.93~20.3 之间,具有较明显的负 Eu 异常 (0.46~0.68),可能是深部地壳含斜长石—角闪石—辉石麻粒岩的源岩部分熔融形成的,较铁门关岩体源区较浅,暗示来自于中下地壳。

欧西达坂岩体二长花岗岩具低 Sr ($115 \times 10^{-6} \sim 436 \times 10^{-6}$)含量和弱负 Eu (0.52~0.72) 异常,平坦的 HREE 分配模式和中等 Yb ($1.76 \times 10^{-6} \sim 2.98 \times 10^{-6}$) 含量,认为其可能是在小于 8kbar 的压力下产生的,来自于中下地壳的无水熔融。在熔融过程中源区残留相为斜长石,无石榴子石残留^[26]。

通过以上分析,博斯腾湖乡岩体和欧西达坂岩体的石英闪长岩是由成岩原生下陆壳中高钾的变质玄武岩在高温 (1000~1100℃) 和高压 (1600~

1800MPa) 条件下部分熔融的结果。铁门关岩体花岗岩闪长岩的岩浆来源于古老地壳和亏损地幔 2 种不同岩浆的混合。铁门关东南岩体花岗闪长岩较铁门关岩体源区较浅,来自于中下地壳,可能是深部地壳含斜长石—角闪石—辉石麻粒岩的源岩部分熔融形成的。欧西达坂岩体二长花岗岩来自于中下地壳的无水熔融。

6 构造背景

前已述及,关于南天山洋的俯冲极性仍存在较大的争议。伊利—中天山陆块南缘出露的较大面积的具有活动陆缘岩浆弧性质的古生代花岗岩^[60~64]和大量高压—超高压变质岩^[11,36~39,65~66]一直被认为是南天山洋向北长期、多阶段俯冲作用的直接证据。而塔里木北缘出露寒武纪—奥陶纪深海盆地—斜坡沉积,缺乏古生代岩浆活动方面的证据,因此一直被认为是南天山洋南缘的被动大陆边缘^[32~35]。可以看出有无岩浆活动是划分主动与被动大陆边缘的重要依据之一。最新研究表明,塔里木北缘出露有泥盆纪和石炭纪的花岗岩,如色日牙克依拉克岩体闪长岩—花岗岩闪长岩—二长花岗岩,锆石 U—Pb 年龄为 $387 \text{ Ma} \pm 8 \text{ Ma}$,具有岛弧花岗岩的地球化学性质^[28]。笔者在霍拉山—库尔勒一带发现大量 400Ma 左右的花岗岩岩体,并在库鲁克塔格西段发现出露一处 336Ma 的石炭纪过铝质花岗岩 (本人未发表数据),暗示南天山洋向南俯冲一直持续到早石炭世。基于本文的研究,塔里木北缘志留纪花岗岩类岩体微量元素地球化学富集 Rb、K、U 等大离子亲石元素

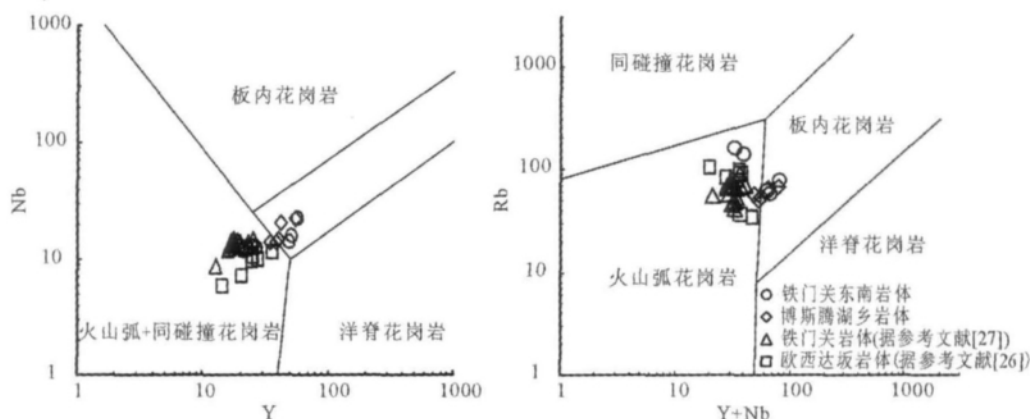


图 8 花岗岩 Nb-Y 图解及 Rb-(Y+Nb)图解

Fig. 8 Nb-Y diagrams and Rb-(Y+Nb) diagrams for granite

(LILE), 明显亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素 (HFSE), 类似于安第斯花岗岩, 具有板块汇聚边缘火山弧花岗岩的地球化学特征。据 Pearce^[67] 的构造环境判别图 (图 8), 所有岩体样品显示了 VAG 型弧花岗岩质岩体的特征。因此本文认为造成塔里木北缘志留纪花岗岩类的动力和热力来源可能与南天山洋于志留纪向南俯冲有关。如果塔里木北缘在早古生代是被动大陆边缘, 那么至少在 420Ma 就已经转化成主动大陆边缘。

塔里木北缘除了发育有大量与板块俯冲活动有关的花岗岩外, 一些学者从以下几个方面也给出了南天山洋向南俯冲的证据。

在火山岩方面: 姜常义等^[25]在南天山褶皱带发现有破城子组、彩华沟组和铜花山组 3 套火山岩, 它们的时代分属晚泥盆世、杜内世和维宪世, 这 3 套火山岩均具有典型的钙碱性火山岩套的岩石组合玄武安山岩-安山岩-英安岩-流纹岩, 且岩石化学组成均属钙碱性系列, 认为其是南天山洋盆在晚泥盆世到维宪世中期闭合阶段, 向南 B 型俯冲向塔里木板块下面俯冲的产物^[25]。张艳等^[44]发现了辛格尔断裂以南的泥盆纪活动陆缘型中酸性火山岩, 认为其是南天山洋向南俯冲的产物。

在地层方面, 塔里木北缘志留纪地层总体呈由北向南从老到新, 依次超覆、由南向北从新到老依次剥蚀的关系。志留系与上覆泥盆系和下伏奥陶系均呈角度不整合接触, 主要由深灰色、紫红色泥岩、粉砂质泥岩和砂岩组成, 总体上形成一个从水进到水退的沉积序列^[68]。

在构造变形特征方面, 中、东段古洛沟—乌瓦门—库米什等地区^[25, 69-73]、西段拉尔敦达坂—长阿吾子地区的蛇绿岩杂岩带内及其南侧地层中^[10-11, 74-75]均发育有南盘向北或北东方向逆冲的构造或韧性剪切带, 且这些构造变形的产生时代为晚志留世—泥盆纪^[76-78]。这期间的构造变形、运动学等特征均与古南天山洋仅向北俯冲消减的动力学模式明显不协调, 表明南天山洋可能存在向南的俯冲作用^[79]。还有一些学者依据塔里木北缘向北的逆冲推覆断层, 推测南天山洋向塔里木板块俯冲^[80-85]。

在蛇绿岩研究方面, 刘本培等^[17]认为欧西达坂附近的仓格洛马克约里和黑英山蛇绿岩套可能为南天山洋盆向南俯冲的洋壳残片。马中平等^[86]对巴音布鲁克火山-侵入杂岩和库勒湖蛇绿岩的研究显示, 南天山古洋盆在早古生代中晚期可能存在向南的俯冲消减作用, 并形成相应的“弧-盆体系”。汤耀庆等^[36]在黑英山乡东北约 26km 的库鲁克坤太地区发现有一条长逾 5000m, 厚度为 100~320m 的红柱石石英片岩, 这条高温低压变质带的形成可能为南天山洋向南俯冲的结果^[36]。据以上俯冲产物推测, 色日克牙依拉克-黑英山蛇绿岩带可能代表了南天山洋盆向南俯冲的洋壳残片。

综上所述, 以往的研究认为南天山造山带侧向增生以中天山南缘岩浆活动为主, 而对出露于塔里木北缘侵入岩的研究则显示, 南天山古洋盆曾向南发生俯冲—消减, 即老虎台—黑英山—密勒洞—野云沟—库尔勒一带为塔里木北缘古生代活动陆缘。至少在晚志留纪塔里木北缘从被动大陆边缘向主动

大陆边缘的构造体制转换就已经完成,在这种高温、高压的弧环境下,镁铁质或超镁铁质弧岩浆对于下地壳的底侵可以提供的巨大热能^[87]使上覆的原生下陆壳中高钾的变质玄武岩发生部分熔融,产生石英闪长质岩浆,形成博斯腾湖乡岩体和欧西达坂岩体的石英闪长岩。同时底侵也为其余岩体的形成提供了动力和热源。

7 南天山造山带的构造演化过程

南天山造山带是古南天山洋盆消减-闭合、中天山岛弧与塔里木板块碰撞所形成的一条造山带。晚前寒武纪,罗迪尼亚超大陆发生裂解,塔里木古陆和伊宁地块在此过程中被逐渐分离出来;几乎同时,两者之间也发生裂解作用,它们之间的南天山古洋盆是在这一裂解作用过程中形成的^[1, 3, 5, 9, 88]。

晚奥陶纪开始,南天山洋向伊犁-中天山岛弧之下俯冲消减^[24, 31],泥盆纪-石炭纪南俯冲消减达到高峰,伊犁-中天山岛弧发育有典型的岛弧型火山-沉积建造^[60-64, 89]。洋壳俯冲消减过程中,在伊犁-中天山岛弧南缘形成了哈尔克山增生楔(增生弧)^[90]。南天山南缘至少在晚志留世向南俯冲于塔里木板块之下,老虎台-黑英山-密勒洞-野云沟-库尔勒一带为塔里木北缘的古生代活动陆缘,俯冲一直延续到早石炭世。

早二叠世,在中天山、南天山和塔里木北缘,形成了大量的辉绿岩脉,暗示该时期区域上已处于伸展背景^[91]。库车盆地的上二叠统比尤勒包谷孜组陆相磨拉石沉积证实,古南天山山脉在早二叠世时已经抬升和形成^[92-94]。塔里木地块、伊犁地块的古地磁研究结果^[95]和哈萨克斯坦-北天山的古地磁资料^[96]也支持早二叠世时期塔里木已经与伊犁地块联合为一个整体。南天山后碰撞钾长花岗岩的年龄 280~266Ma 和后造山碱性岩的年龄 275~260Ma^[97-99],以及南天山的早二叠世碰撞后陆内大规模走滑断裂作用^[100-101]进一步证明南天山的碰撞造山结束时间早于二叠纪。

8 结 论

(1)塔里木北缘出露的志留纪侵入岩包括位于库车以北库尔干-库如力一带的库尔干石英闪长岩、库尔干南黑云斜长花岗岩、欧西大阪岩体与位于库尔勒以东铁门关一带的铁门关岩体、铁门关东南

岩体与博斯腾乡岩体,主要岩性为石英闪长岩、二长花岗岩。获得铁门关东南岩体的年龄为 $419.2\text{Ma} \pm 3.1\text{Ma}$,博斯腾乡岩体的年龄为 $418\text{Ma} \pm 2.7\text{Ma}$ 。

(2)塔里木北缘志留纪侵入岩整体为钙碱性-高钾钙碱性 I 型花岗岩,其 SiO_2 含量变化幅度较大、 K_2O 含量总体相对较低、 Na_2O 与 CaO 含量普遍较高,铝饱和指数大部分小于 1.1,总体为准铝质-弱过铝质系列。微量元素明显富集 Rb、K、U 等大离子亲石元素(LILE)、亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素(HFSE),具有板块汇聚边缘火山弧花岗岩的地球化学特征。

(3)博斯腾湖乡岩体和欧西达坂岩体的石英闪长岩是由成岩原生下陆壳中高钾的变质玄武岩在高温($1000\sim 1100^\circ\text{C}$)和高压($1600\sim 1800\text{MPa}$)条件下部分熔融的结果。铁门关岩体花岗岩闪长岩的岩浆来源于古老地壳和亏损地幔 2 种不同岩浆的混合。铁门关东南岩体花岗闪长岩较铁门关岩体源区较浅,来自于中下地壳,可能是深部地壳含斜长石-角闪石-辉石麻粒岩的源岩部分熔融形成的。欧西达坂岩体二长花岗岩来自于中下地壳的无水熔融。本文认为造成塔里木北缘志留纪花岗岩类的动力和热力来源,可能为南天山洋于志留纪向南俯冲。

(4)南天山古洋盆在早古生代存在双向俯冲,并在志留纪已经开始向南俯冲-消减,一直延续到早石炭世,到晚石炭世闭合。

致谢:中国地质科学院地质研究所李锦轶研究员在文章撰写过程中提出建设性意见,天津地质矿产研究所同位素实验室李怀坤研究员和耿建珍工程师在数据测试中给予指导和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1]李锦轶,王克卓,李亚萍,等.天山山脉地貌特征、地壳组成与地质演化[J].地质通报,2006,25(8):895-909.
- [2]何国琦,李茂松,韩宝福.中国西南天山及邻区大地构造研究[J].新疆地质,2001,19(1):7-11.
- [3]李锦轶.新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变[J].地质论评,2004,50(3):304-322.
- [4]李锦轶,肖序常.对新疆地壳结构与构造演化几个问题的简要评述[J].地质科学,1999,34(4):405-419.
- [5]夏林圻,徐学义,夏祖春,等.天山石炭纪碰撞后裂谷火山作用[J].地质学报,2003,77(3):358.
- [6]黄汲清.天山多旋回构造演化及成矿[M].科学出版社,1990:1-218.
- [7]肖序常,汤跃庆,李锦轶,等.试论新疆北部大地构造演化[C]//新

- 疆地质科学. 北京: 地质出版社, 1990: 47-68.
- [8]肖序常, 汤耀庆, 等. 古中亚复合巨型缝合带南缘构造演化[M]. 北京: 科学技术出版社, 1991: 1-150.
- [9]何国琦, 李茂松, 韩宝福. 中国西南天山及邻区大地构造研究[J]. 新疆地质, 2001, 19(1): 7-11.
- [10]王宝瑜, 朗智君, 李向东, 等. 中国天山西段地质剖面综合研究[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 1-202.
- [11]高俊, 龙灵利, 钱青, 等. 南天山: 晚古生代还是三叠纪碰撞造山带? [J]. 岩石学报, 2006, 22(5): 1049-1061.
- [12]李锦轶, 何国琦, 徐新, 等. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨[J]. 地质学报, 2006, 80(1): 148-168.
- [13]张良臣. 中国新疆板块构造与动力学特征[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1995: 1-14.
- [14]李继亮. 准噶尔残留弧后盆地与中天山造山带的大地构造关系[J]. 沉积学报, 1989, 7(增刊): 53-61.
- [15]Windley B F, Allen M B, Zhang C. Paleozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tian Shan range, Central Asia[J]. *Geology*, 1990, 18: 128-131.
- [16]Allen M B, Windley B F, Zhang C. Paleozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, Central Asia[J]. *Tectonophysics*, 1992, 220: 89-115.
- [17]刘本培, 王自强, 张传恒, 等. 西南天山构造格局与演化[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996: 1-210.
- [18]Brookfield M E. Geological development and Phanerozoic crustal accretion in the western segment of the southern Tien Shan (Kyrgyzstan, Uzbekistan and Tajikistan)[J]. *Tectonophysics*, 2000, 328(1/2): 1-14.
- [19]李日俊, 王招明, 买光荣, 等. 塔里木盆地艾克提克群中放射虫化石及其意义[J]. 新疆石油地质, 2002, 23(6): 496-500.
- [20]张立飞, 艾永亮, 李强, 等. 新疆西南天山超高压变质带的形成与演化[J]. 岩石学报, 2005, 21(4): 1029-1038.
- [21]肖文交, 韩春明, 袁超, 等. 新疆北部石炭纪—二叠纪独特的构造—成矿作用: 对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约[J]. 岩石学报, 2006, 22(5): 1062-1076.
- [22]Xiao W J, Huang B C, Han C M, et al. A review of the western part of the Altaids: A key to understanding the architecture of accretionary orogens[J]. *Gondwana Research*, 2010, 18(2/3): 253-273.
- [23]Xiao W J, Li S Z, Santosh M, et al. Orogenic belts in Central Asia: Correlations and connections[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 49(0): 1-6.
- [24]Gao J, Klemd R, Qian Q, et al. The collision between the Yili and Tarim blocks of the Southwestern Altaids: Geochemical and age constraints of a leucogranite dike crosscutting the HP - LT metamorphic belt in the Chinese Tianshan Orogen[J]. *Tectonophysics*, 2011, 499(1/4): 118-131.
- [25]姜常义, 穆艳梅, 赵晓宁, 等. 塔里木板块北缘活动陆缘型侵入岩带的岩石学与地球化学[J]. 中国区域地质, 2001, 20(2): 158-163.
- [26]王超, 罗金海, 车自成, 等. 新疆欧西达坂花岗岩体地球化学特征和锆石 LA-ICP-MS 定年: 西南天山古生代洋盆俯冲作用过程的启示[J]. 地质学报, 2009, 83(2): 272-283.
- [27]Ge R F, Zhu W B, Wu H L, et al. The Paleozoic northern margin of the Tarim Craton: Passive or active? [J]. *Lithos*, 2012, 142/143(0): 1-15.
- [28]朱志新, 李锦轶, 董连慧, 等. 新疆塔里木北缘色日牙克依拉克一带泥盆纪花岗质侵入体的确定及其地质意义[J]. 岩石学报, 2008, 24(5): 971-976.
- [29]夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 天山岩浆作用[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 1-65.
- [30]朱志新, 李锦轶, 董连慧, 等. 新疆南天山盲起苏晚石炭世侵入岩的确定及对南天山洋盆闭合时限的限定[J]. 岩石学报, 2008, 24(12): 2761-2766.
- [31]左国朝, 刘义科, 张招崇, 等. 中亚地区中、南天山造山带构造演化及成矿背景分析[J]. 现代地质, 2011, 25(1): 1-14.
- [32]李日俊, 张洪安, 钱一雄, 等. 关于南天山碰撞造山时代的讨论[J]. 地质科学, 2010, 45(1): 57-65.
- [33]许志琴, 李思田, 张建新, 等. 塔里木地块与古亚洲/特提斯构造体系的对接[J]. 岩石学报, 2011, (01): 1-22.
- [34]蔡志慧. 塔里木盆地东北缘早古生代造山带的构造特征、造山过程及对塔里木盆地的影响[D]. 中国地质科学院博士学位论文, 2010.
- [35]蔡志慧, 许志琴, 唐哲民, 等. 塔里木盆地东北缘库鲁克塔格地区的早古生代地壳变形以及造山时限[J]. 中国地质, 2011, 38(4): 855-867.
- [36]汤耀庆, 高俊, 赵民, 等. 西南天山蛇绿岩和蓝片岩[M]. 北京: 地质出版社, 1995: 1-133.
- [37]王润三, 王焰, 李惠民, 等. 南天山榆树沟高压麻粒岩地体锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地球化学, 1998, 6(27): 517-522.
- [38]高俊, 张立飞, 刘圣伟. 西天山蓝片岩榴辉岩形成和抬升的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄记录[J]. 科学通报, 2000, 45(1): 89-94.
- [39]周鼎武, 苏犁, 简平, 等. 南天山榆树沟蛇绿岩地体中高压麻粒岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及构造意义[J]. 科学通报, 2004, 49(14): 1411-1415.
- [40]Allen M B, Sengor A M C, Natal'in B A. Junggar, Turfan and Alakol basins as Late Permian to Early Triassic extensional structures in a sinistral shear zone in the Altaid orogenic collage, Central Asia[J]. *Journal of Geological Society*, 1995, 152: 327-338.
- [41]张招崇, 董书云, 黄河, 等. 西南天山二叠纪中酸性侵入岩的地质学和地球化学: 岩石成因和构造背景[J]. 地质通报, 2009, 28(12): 1827-1839.
- [42]黄河, 张招崇, 张东阳, 等. 中国南天山晚石炭世—早二叠世花岗质侵入岩的岩石成因与地壳增生[J]. 地质学报, 2011, 85(8): 1305-1333.
- [43]Zhang C L, Li H, Santosh M, et al. Precambrian evolution and cratonization of the Tarim Block, NW China: Petrology, geochemistry, Nd-isotopes and U - Pb zircon geochronology from Archean gabbro - TTG - potassic granite suite and Paleoproterozoic metamorphic belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 47: 5-20.
- [44]张艳, 孙晓猛. 新疆库鲁克塔格地区晚泥盆世火山岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(1): 302-308.
- [45]校培喜, 黄玉华, 王育习, 等. 新疆库鲁克塔格地块东南缘钾长花岗岩的地球化学特征及同位素测年[J]. 地质通报, 2006, 25(6): 725-

- 729.
- [46] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1/2): 34-43.
- [47] Ludwig K. Users manual for Isoplot/Ex (rev.2.49): A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkely: Berkely Geochronological Center Special Publication, 2001: 1-58.
- [48] Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism [J]. *Chemical geology*, 2002, 184(1/2): 16.
- [49] Vavra G, Schmid R, Gebauer D. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibolite-to-granulite facies zircons: geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps)[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1999, 134(4): 380-404.
- [50] Vavra G, Gebauer D, Schmid R, et al. Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): an ion microprobe (SHRIMP) study [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1996, 122(4): 337-358.
- [51] Foley S. Petrological and characterization of the source components of potassic magmas: Geochemical and experimental constraints [J]. *Lithos*, 1992, 28(3/6): 187-204.
- [52] Dungan M A, Lindstrom M M, Mcmillan N J, et al. Open system magmatic evolution of the Taos Plateau volcanic field, northern New Mexico: 1. The petrology and geochemistry of the Servilleta Basalt[J]. *J. Geophys. Res.*, 1986, 91(B6): 5999-6028.
- [53] Chappell B W. Aluminum saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated hapogranites[J]. *Lithos*, 1999, 46: 531-551.
- [54] Dostal J, Chatterjee A K. Contrasting behaviour of Nb/Ta and Zr/Hf ratios in a peraluminous granitic pluton (Nova Scotia, Canada)[J]. *Chemical Geology*, 2000, 163(1/4): 207-218.
- [55] Rushmer T. Partial melting of two amphibolites: contrasting experimental results under fluid-absent conditions [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1991, 107(1): 41-59.
- [56] Wolf M B, Wyllie P J. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: the effects of temperature and time [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1994, 115(4): 369-383.
- [57] Rapp R P, Watson E B. Dehydration Melting of Metabasalt at 8 - 32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 51: 1-25.
- [58] Rapp R P, Watson E B, Miller C F. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archaean trondhjemites and tonalities [J]. *Precambrian Res.*, 1991, 51: 1-25.
- [59] Deng J F, Mo X X, Zhao H L, et al. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: 'continental roots - plume tectonics' [J]. *Earth-Science Reviews*, 2004, 65(3/4): 223-275.
- [60] 杨天南, 李锦铭, 孙桂华, 等. 中天山早泥盆世陆弧:来自花岗质糜棱岩地球化学及 SHRIMP U-Pb 定年的证据[J]. *岩石学报*, 2006, 22(1): 41-48.
- [61] 朱永峰, 张立飞, 古丽冰, 等. 西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究[J]. *科学通报*, 2005, 50(18): 2004-2014.
- [62] 朱志新, 王克卓, 郑玉洁, 等. 新疆伊犁地块南缘志留纪和泥盆纪花岗质侵入体锆石 SHRIMP 定年及其形成时构造背景的初步探讨[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1193-1200.
- [63] 徐学义, 马中平, 夏祖春, 等. 天山中西段古生代花岗岩 TIMS 法锆石 U-Pb 同位素定年及岩石地球化学特征研究[J]. *西北地质*, 2006, 39(1): 50-75.
- [64] 龙灵利, 高俊, 熊贤明, 等. 新疆中天山南缘比开(地区)花岗岩地球化学特征及年代学研究[J]. *岩石学报*, 2007, 23(4): 719-732.
- [65] 马瑞士, 王赐银, 叶尚夫. 东天山构造格架及地壳演化[M]. 南京: 南京大学出版社, 1993: 1-255.
- [66] 刘斌, 钱一雄. 东天山三条高压变质带地质特征和流体作用[J]. *岩石学报*, 2003, 19(2): 283-296.
- [67] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks[J]. *Journal of petrology*. 1984, 25(2): 956-983.
- [68] 施振生, 杨威, 郭长敏, 等. 塔里木盆地志留纪沉积层序构成及充填响应特征[J]. *沉积学报*, 2007, 25(3): 401-408.
- [69] 舒良树, Charvet J, 卢华复, et al. Paleozoic Accretion-Collision Events and Kinematics of Ductile Deformation in the Eastern Part of the Southern-Central Tianshan Belt, China [J]. *地质学报 (英文版)*, 2002, 76(3): 308-323.
- [70] 李向民, 董云鹏, 徐学义, 等. 中天山南缘乌瓦门地区发现蛇绿混杂岩[J]. *地质通报*, 2002, 21(6): 304-307.
- [71] 舒良树, 卢华复, 印栋豪, 等. 中、南天山古生代增生-碰撞事件和变形运动学研究[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2003, 39(1): 17-30.
- [72] 杨天南, 李锦铭, 文中田, 等. 中天山地块南北两缘的韧性剪切带[J]. *地质学报*, 2004, 78(3): 310-318.
- [73] 董云鹏, 周鼎武, 张国伟, 等. 中天山南缘乌瓦门蛇绿岩形成构造环境[J]. *岩石学报*, 2005, 21(1): 37-44.
- [74] 高俊, 何国琦. 西天山造山带的构造变形特征研究[J]. *地球学报: 中国地质科学院院报*, 1997, 18(1): 1-10.
- [75] Gao J, Klemd R. Formation of HP - LT rocks and their tectonic implications in the western Tianshan Orogen, NW China: geochemical and age constraints[J]. *Lithos*, 2003, 66(1-2): 1-22.
- [76] 舒良树, 卢华复, 印栋豪, 等. 中、南天山古生代增生-碰撞事件和变形运动学研究[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2003, 39(1): 17-30.
- [77] 蔡东升, 卢华复. 南天山古生代板块构造演化[J]. *地质论评*, 1995, 41(5): 432-443.
- [78] 李向东, 肖文交, 周宗良. 南天山南缘晚泥盆世构造事件的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年证据及其意义[J]. *岩石学报*. 2004, 20(3): 691-696.
- [79] 马中平. 天山及其邻区蛇绿岩研究与古生代洋盆演化[D]. 西北大学博士学位论文, 2007.
- [80] Wang B, Shu L, Faure M, et al. Paleozoic tectonics of the southern Chinese Tianshan: Insights from structural, chronological and geochemical studies of the Heiyingshan ophiolitic mélange (NW China)[J]. *Tectonophysics*, 2011, 497(1/4): 85-104.

- [81]Chen X J, Shu L S, Santosh M. Late Paleozoic post-collisional magmatism in the Eastern Tianshan Belt, Northwest China: New insights from geochemistry, geochronology and petrology of bimodal volcanic rocks[J]. *Lithos*, 2011, 127(3/4): 581–598.
- [82]Wang B, Cluzel D, Shu L, et al. Evolution of calc-alkaline to alkaline magmatism through Carboniferous convergence to Permian transcurrent tectonics, western Chinese Tianshan[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(6): 1275–1298.
- [83]Lin W, Faure M, Shi Y, et al. Palaeozoic tectonics of the south-western Chinese Tianshan: new insights from a structural study of the high-pressure/low-temperature metamorphic belt[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(6): 1259–1273.
- [84]Charvet J, Shu L, Laurent-Charvet S, et al. Palaeozoic tectonic evolution of the Tianshan belt, NW China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(2): 166–184.
- [85]Charvet J, Shu L, Laurent-Charvet S. Paleozoic structural and geodynamic evolution of eastern Tianshan (NW China): welding of the Tarim and Junggar plates[J]. *Episodes*, 2007, 30(3): 162–186.
- [86]马中平, 夏林圻, 徐学义, 等. 南天山库勒湖蛇绿岩锆石年龄及其地质意义[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2007, 37(1): 107–110.
- [87]Donald W H, David A F. The Role of Tonalites and Mafic Dikes in the Generation of the Idaho Batholith[J]. *The Journal of Geology*, 1988, 96(1): 31–46.
- [88]李锦轶, 肖序常. 对新疆地壳结构与构造演化几个问题的简要评述[J]. *地质科学*, 1999, 34(4): 405–419.
- [89]杨天南, 王小平. 新疆库米什早泥盆世侵入岩时代、地球化学及大地构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2006, 25(5): 401–411.
- [90]朱志新. 新疆南天山地质组成和构造演化[D]. 中国地质科学院博士学位论文, 2007.
- [91]姜常义, 姜寒冰, 叶书锋, 等. 新疆库鲁克塔格地区二叠纪脉岩群岩石地球化学特征, Nd, Sr, Pb 同位素组成与岩石成因[J]. *地质学报*, 2005, 79(6): 823–833.
- [92]周宗良, 高树海. 西南天山造山带与前陆盆地系统[J]. *现代地质*, 1999, 13(3): 275–280.
- [93]李向东, 王克卓. 中国西天山南缘盆地构造转换解析[J]. *新疆地质*, 2000, 18(3): 211–219.
- [94]卢华夏, 贾承造, 等. 库车再生前陆盆地冲断构造楔特征[J]. *高校地质学报*, 2001, 7(3): 257–271.
- [95]Wang B, Chen Y, Zhan S, et al. Primary Carboniferous and Permian paleomagnetic results from the Yili Block (NW China) and their implications on the geodynamic evolution of Chinese Tianshan Belt[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 263(3/4): 288–308.
- [96]Bazhenov M L, Collins A Q, Degtyarev K E, et al. Paleozoic northward drift of the North Tien Shan (Central Asia) as revealed by Ordovician and Carboniferous paleomagnetism[J]. *Tectonophysics*, 2003, 366(1/2): 113–141.
- [97]姜常义, 穆艳梅, 白开寅, 等. 南天山花岗岩类的年代学、岩石学、地球化学及其构造环境[J]. *岩石学报*, 1999, 15(2): 298–308.
- [98]刘楚雄, 许保良, 邹天人, 等. 塔里木北缘及邻区海西期碱性岩岩石化学特征及其大地构造意义[J]. *新疆地质*, 2004, 22(1): 43–49.
- [99]Solomovich L I, Trifonov B A. Postcollisional granites in the South Tien Shan Variscan Collisional Belt, Kyrgyzstan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 21(1): 7–21.
- [100]Liangshu S, Jacques C, Lingzhi G, et al. A Large-Scale Palaeozoic Dextral Ductile Strike-Slip Zone: the Aqikkudug-Weiya Zone along the Northern Margin of the Central Tianshan Belt, Xinjiang, NW China[J]. *地质学报(英文版)*, 1999, 73(2): 148–162.
- [101]Laurent-Charvet S, Charvet J, Shu L S, et al. Paleozoic late collisional strike-slip deformations in Tianshan and Altay, Eastern Xinjiang, NW China[J]. *Terra Nova*, 2002, 14(4): 249–256.