

北阿尔金拉配泉地区齐勒萨依岩体的年代学、 地球化学特征及其构造意义

张占武, 黄 岗, 李怀敏, 张文峰

(陕西省地质矿产开发局 区域地质矿产研究院, 陕西 咸阳 712000)

摘 要: 阿尔金北缘拉配泉地区的齐勒萨依岩体主要由辉长岩、闪长岩组成。地球化学特征表明, 辉长岩具有高的 Al_2O_3 (13.47% ~ 15.34%), FeO^T 含量 (10.77% ~ 16.89%) 以及中等的 MgO 含量 (5.15% ~ 7.49%); 闪长岩属钙碱性系列, 具有较低 SiO_2 含量 (52.06% ~ 54.23%) 和高的 $Mg^{\#}$ 值 (56.43 ~ 62.45)。二者在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线上呈 REE 近平坦型或者 LREE 轻微富集型, 均显示 Eu 弱的亏损或富集。在原始地幔标准化蛛网图上, 二者均富集 Rb、Ba 等大离子亲石元素 (LILE) 相对亏损 Nb、Ta、Zr 和 Hf 等高场强元素 (HFSE), 具明显消减带岩浆岩的特征。辉长岩和闪长岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果分别为 477.5 ± 3.3 Ma 和 469.7 ± 3.4 Ma, 表明它们属于早中奥陶世岩浆活动的产物。结合岩石的地球化学、微量元素构造环境判别图解、年代学和区域地质背景的特征, 判定齐勒萨依岩体形成于与俯冲有关的活动陆缘弧的构造环境, 二者的侵位与阿尔金北缘早古生代的古大洋向南俯冲消减到米兰河-金雁山活动陆缘地块之下密切相关, 从而为北阿尔金早中奥陶世的陆缘弧和红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带俯冲极性的进一步确定提供了佐证。

关键词: 闪长岩, 辉长岩, 地球化学, 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄, 陆缘弧, 米兰河-金雁山地块, 阿尔金山

中图分类号: P588.122; P579.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)01-0013-15

LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology and geochemistry of gabbro and diorite from Qilesayi pluton in Lapeiquan area of northern Altun Mountains and their tectonic implications

ZHANG Zhan-wu, HUANG Gang, LI Huai-min and ZHANG Wen-feng

(Institute of Regional Geology and Mineral Resources, Shaanxi Bureau of Geological Exploration, Xianyang 712000, China)

Abstract: Located in Lapeiquan area, northern Altun Mountains of Xinjiang, the Qilesayi pluton consisting mainly of gabbro and diorite intruded into the Lapeiquan Group. This paper has studied petrographic, geochemical and zircon U-Pb chronological characteristics of gabbro and diorite from Qilesayi pluton as well as their tectonic significance. Geochemical analyses suggest that the gabbro has high Al_2O_3 (13.47% ~ 15.34%), FeO^T (10.77% ~ 16.89%) and moderate MgO (5.15% ~ 7.49%) values, whereas the diorite samples are characterized by low SiO_2 content (52.06% ~ 54.23%) and high $Mg^{\#}$ values (58.63 ~ 62.45), belonging to the calc-alkaline series. The gabbro and diorite samples have features of low ΣREE content with low fractionation of LREE/LREE and no or slightly negative Eu anomalies, depletion of HFSE (Nb, Ta, Zr, Hf) and enrichment of LILE (Rb, Ba). These geochemical features imply an origin similar to that of the subduction-related tectonic setting. Zircon U-Pb ages obtained by LA-ICP-MS analyses from the gabbro and diorite samples are 477.5 ± 3.3

收稿日期: 2010-12-03; 修订日期: 2011-07-29

基金项目: 新疆维吾尔自治区 1:5 万区域地质矿产调查项目

作者简介: 张占武 (1962 -), 男, 高级工程师, 从事区域地质矿产调查工作, E-mail: 13309102399@189.cn; 通讯作者: 黄 岗 (1984 -), 男, 助理工程师, 主要从事区域地质研究, E-mail: hg1104220@yahoo.cn。

Ma and 469.7 ± 3.4 Ma, respectively, implying that these rocks were emplaced in the Early-Middle Ordovician period. Their petrogenic ages are similar to rock-forming ages of the adjacent Bashenkaogong gigantic phenocryst granitoid (474 Ma), Bashenkaogong-Xiemierbulake quartz diorite (481.6 ± 5.6 Ma) and Jinyanshan granodiorite intrusive bodies (467.1 ± 6 Ma), suggesting that they may be products of the same magmatism and constitute the basic-intermediate-acidic magmatic evolution series. Integrated with geochemistry, trace elements discrimination, geochronology and regional background, it is inferred that the gabbro and diorite were formed in a subduction-related active continental margin arc. Meanwhile, this study proposes that the gabbro and diorite from Qilesayi pluton were derived from the southward subduction of an oceanic crust to Milanhe-Jinyanshan active continental margin during the Early Paleozoic period, and this provides the corroborating evidence for the further ascertaining of the existence of the Early-Middle Ordovician continental margin arc and subduction polarity of Hongliugou-Lapeiquan ophiolite mélangé zone in the North Altun Mountains.

Key words: gabbro; diorite; geochronology; LA-ICP-MS zircon U-Pb age; active continental margin arc; Milanhe-Jinyanshan block; Altun Mountains

阿尔金断裂带和阿尔金地区的区域构造演化已经成为近十几年来的研究热点(车自成等,1995; Sobel and Arnaud, 1999; 崔军文等,1999; 葛肖虹等, 2002)。但由于特殊的地理位置和恶劣的气候条件,阿尔金山地区仍然是中国西部地质和矿产研究程度较低的地区之。近年来,在北阿尔金厘定了一条由早古生代洋壳俯冲过程中在海沟及其附近堆积形成的硅质岩、基性火山岩以及超基性岩等组成的蛇绿构造混杂岩带,即红柳沟-拉配泉蛇绿构造混杂岩带(何国琦等,1994; 郭召杰等,1998; 张旗等,2001),它是北阿尔金近东西构造带重要的组成部分(戚学祥等,2005),同时混杂岩带内也相继发现了榴辉岩、石榴石蓝片岩、高压变泥质岩等与洋壳俯冲有关的高压/低温变质岩(Zhang *et al.*, 2005; 张建新等, 2007)。在构造混杂岩带南侧发育了大量的早古生代花岗岩类,显然它们是对古大洋俯冲、消减直至陆陆碰撞造山作用的岩浆记录。众多地质工作者对此开展了研究并且取得了一些进展(陈宣华等,2001, 2003; 王小凤等,2004; 郝杰等,2006; 吴才来等, 2005, 2007)。然而对其形成的构造环境仍存在较大的争议。陈宣华等(2003)和戚学祥等(2005)分别对阿尔金北缘阔什布拉克岩体和恰什坎萨依花岗闪长岩体进行了研究,认为它们形成于岛弧的构造环境,戚学祥等(2003)还认为早古生代的弧岩浆岩并不是建立在前寒武纪的大陆地壳之上。郝杰等(2006)和吴才来等(2007)认为这些早古生代花岗岩形成于活动大陆边缘环境,代表着安第斯型陆缘弧岩浆岩。

另外对红柳沟-拉配泉蛇绿构造混杂岩所代表的洋盆俯冲极性目前也存在争议。

本文旨在对阿尔金北缘拉配泉地区出露的闪长岩和辉长岩开展 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征的研究并探讨其构造意义,为北阿尔金造山带早古生代构造格局及其演化提供新的约束资料。

1 区域地质背景

阿尔金造山带地处青藏高原的北部边缘,介于塔里木板块、柴达木微板块以及祁连-昆仑造山带之间,是由不同层次、不同时期和形成于不同构造环境的地质体所组成的造山带(许志琴等,1999)。刘良等(1999)把阿尔金山地区自北向南划分为阿北变质体、北阿尔金俯冲增生杂岩带、米兰河-金雁山地块和阿帕-茫崖构造混杂岩带(图 1a)。研究区在大地构造上位于米兰河-金雁山地块内,出露的岩石地层单位较多,有中元古界长城系巴什库尔干岩群,岩性为变碎屑岩夹少量碳酸盐岩及中基性火山岩,蓿县系塔普达坂群木孜萨依组由碎屑岩夹碳酸盐岩组成,中上奥陶统拉配泉组为一套基性、中酸性岛弧火山岩和陆缘浊积岩组成的火山-沉积地层及其晚古生代浅海相碎屑岩-碳酸盐岩沉积地层。由于受构造作用影响,长期多次的大规模构造活动在研究区发育了一系列近东西和北东的断裂,并导致多期次的岩浆侵入,其产物主要以早古生代和中生代花岗岩为主。

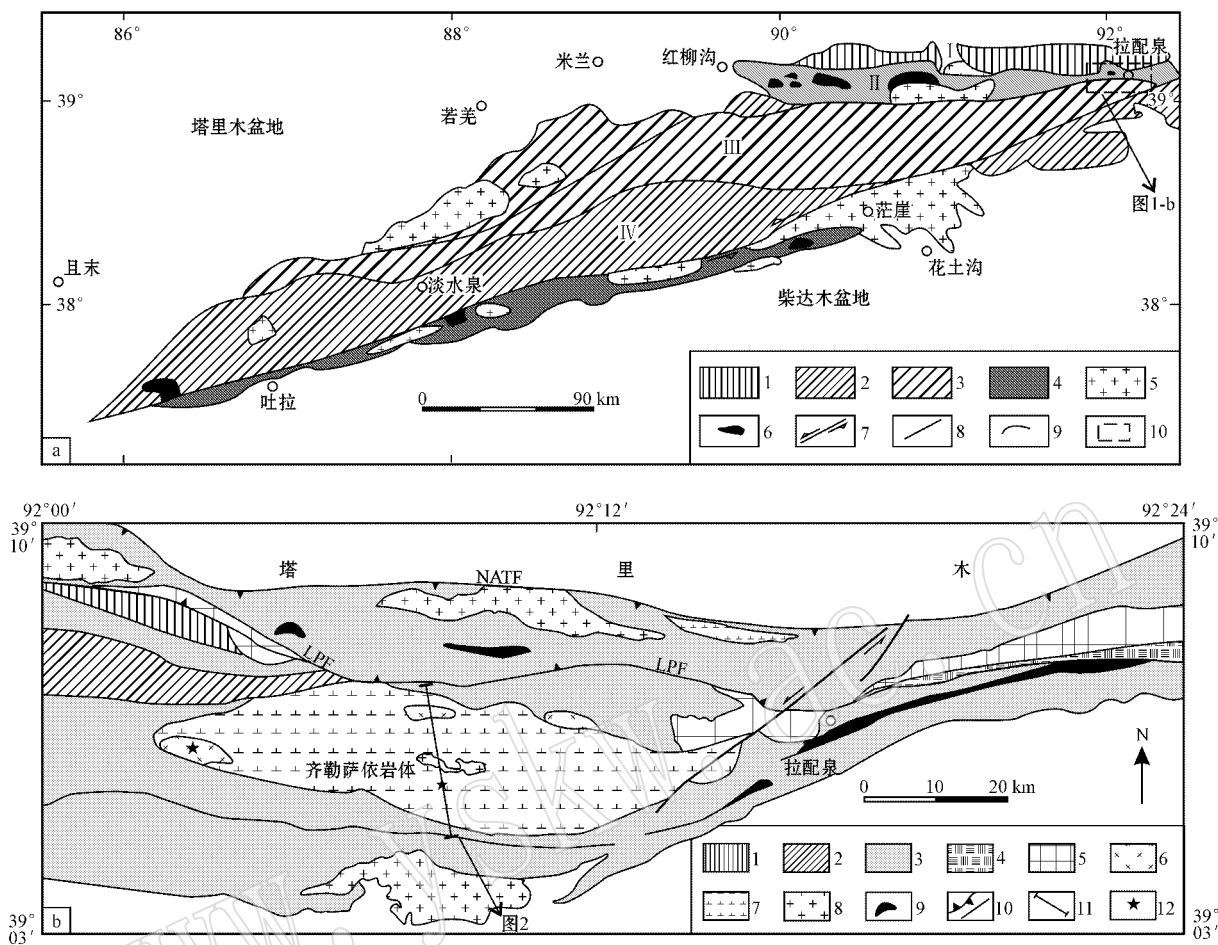


图 1 阿尔金构造带地质略图 (a 据刘良等,1999)和阿尔金北缘拉配泉地区地质略图 (b 据青海省地矿局区调综合地质大队 1:20 万俄博梁幅^①和陕西区域地质矿产研究院 1:5 万拉配泉幅^②修编)

Fig. 1 Geological and structural map of the Altun orogen (after Liu *et al.*, 1999) (a) and geological sketch map of Lapeiquan area on the northern margin of the Altun Mountains (b)

a: 1—晚太古代地层; 2—下元古界; 3—中上元古界; 4—古生界; 5—花岗岩岩石; 6—超镁铁质岩石; 7—走滑断裂; 8—断裂; 9—构造单元边界; 10—研究区域; I—阿北变质质地体; II—红柳沟—拉配泉构造混杂岩带; III—米兰河—金雁山地块; IV—阿帕—茫崖构造混杂岩带
 b: 1—长城系; 2—蓟县系木孜萨依组; 3—奥陶系拉配泉组; 4—二叠系棋盘组; 5—侏罗系大煤沟组; 6—辉长岩; 7—闪长岩; 8—花岗岩; 9—超基性岩; 10—断裂; 11—实测剖面; 12—采样位置; LPF—拉配泉断裂; NATF—阿尔金北缘断裂

a: 1—Late Archean; 2—Early Proterozoic; 3—Middle-late Proterozoic; 4—Paleozoic; 5—granitoid; 6—ultramafic rocks; 7—strike-slip fault; 8—fault; 9—boundaries of tectonic units; 10—study area; b: 1—Changcheng System; 2—Jixianian Muzisayi Formation; 3—Ordovician Lapeiquan Formation; 4—Permian Qipan Formation; 5—Jurassic Dameigou Formation; 6—gabbro; 7—diorite; 8—granitoid; 9—ultramafic rock; 10—fault; 11—stratigraphic section; 12—sampling location; LPF—Lapeiquan fault; NATF—northern margin fault of Altun

2 岩体地质概况及岩相学特征

齐勒萨依岩体位于新疆若羌县东北的拉配泉地区,处于拉配泉断裂南侧(图 1b),断裂北侧为红柳沟—拉配泉蛇绿构造混杂岩带。岩体在平面上呈椭圆形展布,并且具有同心环状的岩石类型分带特征,边部为辉长岩,向内为闪长岩岩体。岩体长轴呈 EW

向与区域构造线平行并环绕岩体的接触带,出露面积约 30 km²。岩体侵入中上奥陶统拉配泉组(O₂₋₃l)中,后被侏罗纪碱性二长花岗岩侵入,与上覆侏罗系康苏组(J_{1k})为断层接触。在野外可见闪长岩呈超动式侵入于辉长岩之上,同时在闪长岩体内部还发育大量地层火山岩的捕虏体和后期侵入的淡肉红色细粒二长花岗岩脉(图 2)。

辉长岩:岩石呈灰绿色,细粒辉长结构,块状构

① 青海省地矿局区调综合地质大队. 1986. 1:20 万俄博梁幅 J-46[9] 区域地质调查报告.

② 陕西省区域地质矿产研究院. 2006. 新疆若羌县拉配泉一带 1:5 万区域地质矿产调查报告.

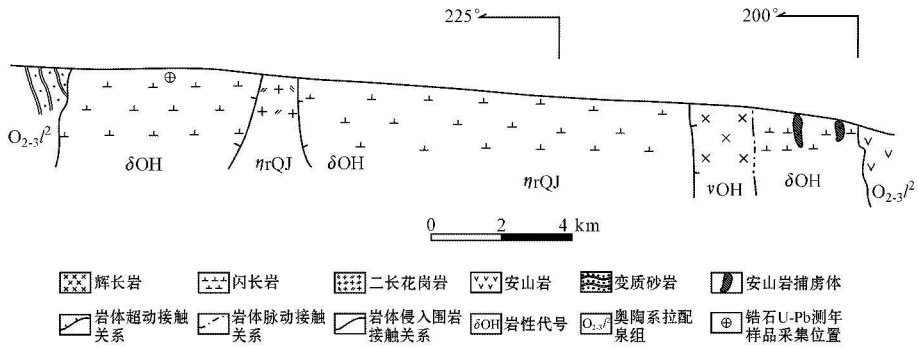


图 2 阿尔金北缘拉配泉地区齐勒萨依岩体实测剖面图

Fig. 2 Stratigraphic section of Qilesayi pluton in Lapeiquan area on the northern margin of the Altun Mountains

造。主要矿物成分为斜长石(约 50%)和辉石(约 30%),次要矿物为角闪石(约 10%),副矿物有磁铁矿、磷灰石等,次生自变质矿物为纤闪石、绿帘石、黝帘石、绢云母、绿泥石。斜长石($A_n = 56$),粒度 0.5~1.0 mm,略拉长粒状简单互嵌,聚片双晶发育,晶粒内少量绢云母部分进入解理平行排列;辉石,多呈自形-半自形柱状及短柱状,粒径多数小于 2 mm,个别为 2.0~3.5mm;普通角闪石呈亮黄绿-蓝绿色多色性,0.4~2 mm,似柱状,互嵌集成不连续条带

分布于斜长石间(3a)。

细粒闪长岩:岩石呈灰绿色,具细粒结构,块状构造。主要矿物成分有斜长石(约 55%)和角闪石(约 35%),副矿物为磷灰石、榍石、白钛矿。斜长石($A_n = 46 \sim 48$),呈自形长板状,粒度 0.5~1.5 mm,显示聚片双晶和个别的卡钠复合双晶;角闪石,呈淡黄-深绿色多色性,长柱状半自形,粒度 0.8~2.0 mm,斜长石与角闪石两种矿物相互杂乱穿插,紧密接触,应属同期结晶的产物(图 3b)。

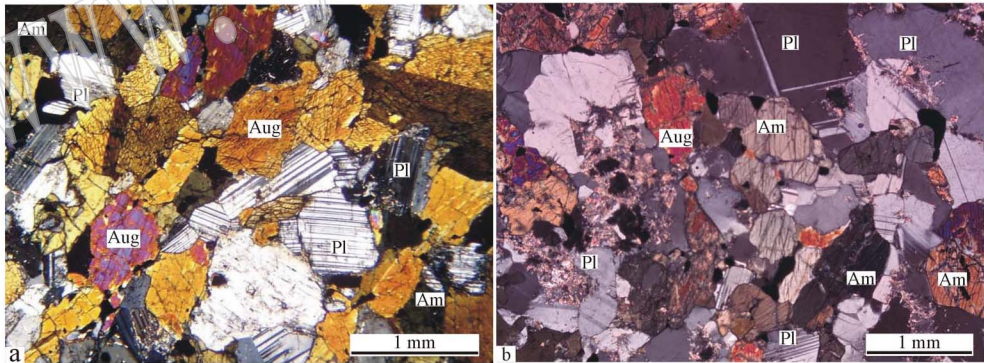


图 3 阿尔金北缘拉配泉地区辉长岩(a)和闪长岩(b)的显微照片

Fig. 3 Microphotographs of gabbro sample 1707-7 and diorite sample D2490-1 from Lapeiquan

Pl—斜长石; Am—角闪石; Aug—辉石

Pl—plagioclase; Am—amphibole; Aug—augite

3 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年

3.1 测试方法

定年样品辉长岩(D1707-7)和闪长岩(D2190-1)均采自拉配泉地区齐勒萨依岩体中,地理坐标分别

为 $N39^{\circ}06'14''$ 、 $E92^{\circ}03'32''$ 和 $N39^{\circ}05'03''$ 、 $E92^{\circ}10'38''$ 。岩石样品在核工业 203 所采用常规方法进行粉碎,并用浮选和电磁选方法进行分选,最后在双目镜下挑选出形态较为完整、无裂痕、无包裹体的锆石作为测定对象。将分选出来的锆石样品置于环氧树脂中,然后用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂

充分固化后抛光使锆石露出一个平面,最后对锆石进行可见光显微照相、阴极发光(CL)显微图像和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素组成测定。

锆石的阴极发光(CL)显微照相在西北大学大陆动力学教育部重点实验室的 Cameca 电子探针仪器上完成,采用美国 Gatan 公司生产的阴极荧光谱仪进行锆石内部结构分析,分析电压为 15 kV,电流为 19 nA。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定由西北大学大陆动力学教育部重点实验室的激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)仪完成。激光剥蚀系统是配备有 193 nm ArF-excimer 激光器的 Geolas200M(Microlas Gottingen Germany),分析采用激

光剥蚀孔径 30 μm ,剥蚀深度 20~40 μm ,激光脉冲 10 Hz,能量 32~36 mJ,锆石的同位素组成以锆石 91500 为外标进行校正(Wiedenbeck *et al.*, 1995),微量元素组成以玻璃标样 NISTSRM610 作外标, ^{29}Si 作为内标元素进行校正(Gao *et al.*, 2002; Yuan *et al.*, 2004)。锆石同位素数据采用 GLITTER 程序,普通铅校正采用 Anderson 等(2002)的方法,年龄计算使用 Isoplot(ver3.0)完成(Ludwig *et al.*, 2003),LA-ICP-MS 分析的详细方法和流程见袁洪林等(2003)。

3.2 结果分析

阴极发光图像显示(图 4)辉长岩样品锆石内部

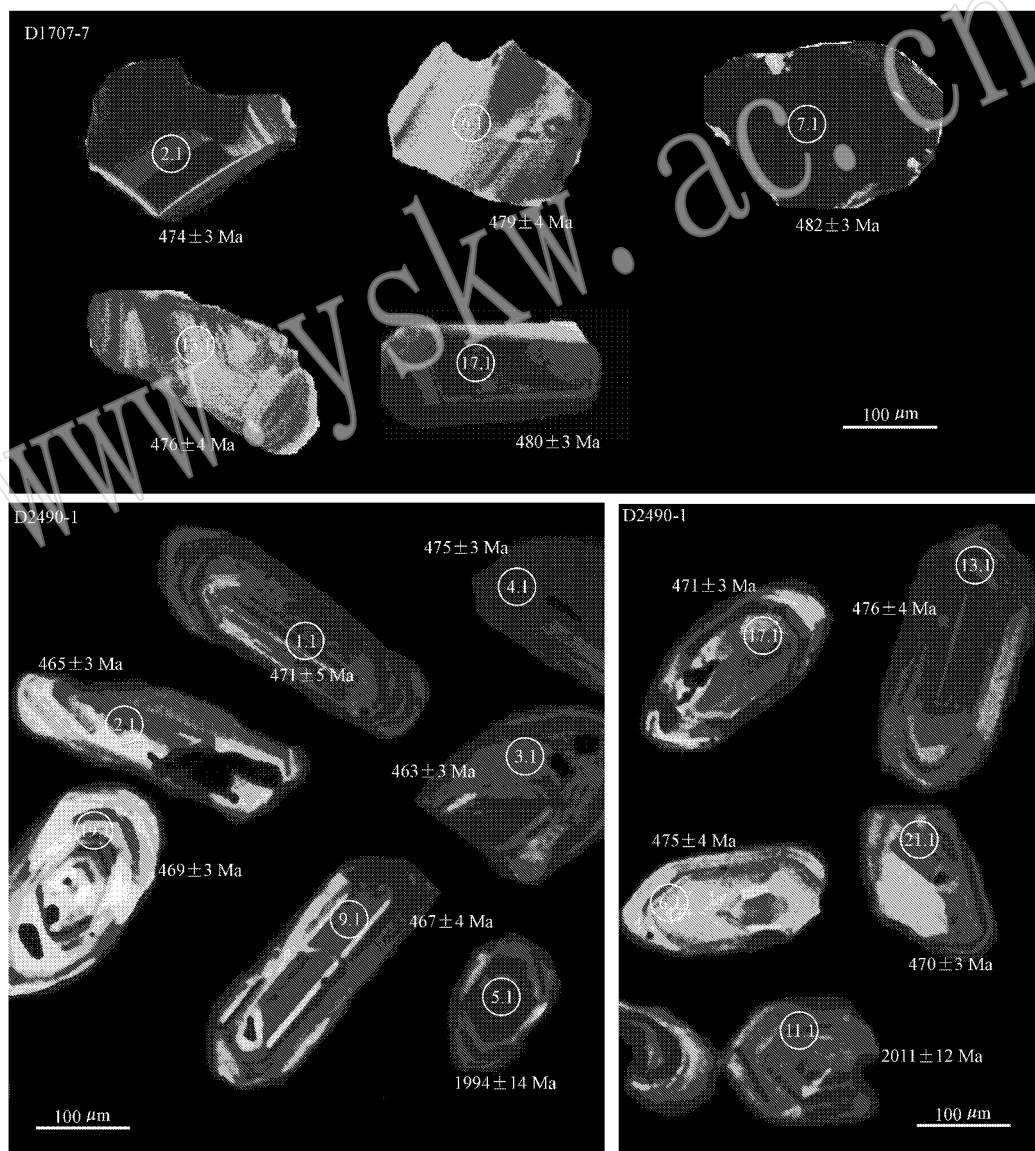


图 4 辉长岩(1707-7)和闪长岩(D2490-1)代表性锆石阴极发光图像

Fig. 4 Cathodoluminescence images of zircons from gabbro sample 1707-7 and diorite sample D2490-1 from Lapeiquan

有 3 种结构 略显条带的均一结构、条带状结构和振荡环结构。所有锆石无新生环带,反映岩浆成因的生长纹清晰可见,其亮度变化不大。闪长岩锆石具有清晰的韵律环带结构,少数锆石具有明显的核部,可能是由岩浆在结晶过程中捕获围岩形成的。

辉长岩和闪长岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 分析结果见表 1。辉长岩 17 粒锆石 U、Th 含量分别介于 $129.31 \times 10^{-6} \sim 529.16 \times 10^{-6}$ 和 $62.92 \times 10^{-6} \sim 211.11 \times 10^{-6}$ 之间,锆石的 Th/U 比值介于 0.45~0.67 之间。闪长岩中 22 粒锆石 U、Th 含量分别介于 $41.92 \times 10^{-6} \sim 256.11 \times 10^{-6}$ 和 $29.89 \times 10^{-6} \sim 151.78 \times 10^{-6}$ 之间,锆石的 Th/U 比值介于 0.21~1.00 之间。在锆石的 U-Pb 谐和曲线图中,辉长岩

样品 D1707-7 中 17 个数据分析点均位于 U-Pb 谐和线上或其附近的一个很小的区域内,表面年龄变化于 469~488 Ma,其加权平均年龄为 477.5 ± 3.3 Ma (MSWD=4.3) (图 5a),应代表辉长岩的侵位年龄。从闪长岩样品 D2190-1 中锆石的谐和曲线图(图 5b)中可以看出,年龄结果可以分为两组:第 1 组表面年龄为 1974~2011 Ma,而且都在谐和线附近,其中 3 粒锆石的加权平均年龄为 2019 ± 32 Ma (MSWD=1.5),这组年龄可能反映了闪长岩的继承源岩年龄或者可能是捕获锆石的年龄;第 2 组表面年龄为 461~483 Ma,也与谐和线拟合较好,19 粒锆石的加权平均年龄为 469.7 ± 3.4 Ma (MSWD=4.1),代表闪长岩的侵位年龄。

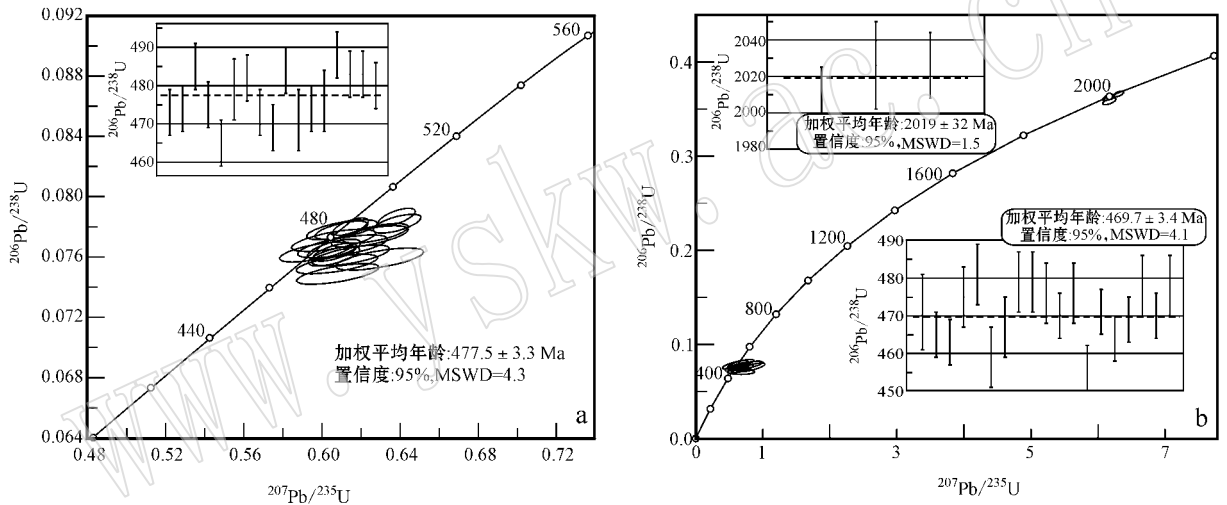


图 5 拉配泉地区辉长岩(D1707-7)和闪长岩(D2490-1)中 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 Concordia diagram showing zircon LA-ICPMS U-Pb dating results of gabbro sample 1707-7 and diorite sample D2490-1 from Lapeiquan

4 地球化学特征

样品的主量元素和微量元素分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。主量元素用 XRF 光谱测定,分析精度一般优于 2%,微量元素在 ICP-MS 上测定,分析精度一般优于 2%~5%。

辉长岩和闪长岩代表性样品的主量元素和微量元素分析结果见表 2。由表可以看出辉长岩岩石化学成分变化不大, SiO_2 含量介于 46.15%~49.96%, Na_2O = 2.16%~3.54%, K_2O = 0.45%~1.30%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 介于 2.72~4.80 之间,显示钠质钙碱性岩浆岩的特征; $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 和 MgO 含量较高,

分别介于 10.77%~16.89% 和 5.15%~7.49% 之间, $\text{Mg}^{\#}$ 值的变化范围在 39~59 之间,其中 3 个样品的 $\text{Mg}^{\#}$ 值大于 42。闪长岩 SiO_2 含量变化小并略偏碱性,介于 52.06%~54.23% 之间; $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 介于 1.10~2.66 之间,亦显示富钠的特点; MgO 含量(5.79%~6.46%,平均为 6.06%)较高, $\text{Mg}^{\#}$ 值为 58.63~62.45,显示了高镁的特征。

在球粒陨石标准化稀土元素分布型式图上,辉长岩样品呈近平坦型或轻稀土元素轻微富集型(图 6a), ΣREE 为 $87.15 \times 10^{-6} \sim 157.02 \times 10^{-6}$,轻重稀土元素分异不明显, LREE/HREE 为 4.62~6.10, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 变化于 2.14~5.41, δEu 为 0.90~1.08,平均为 1.00,无 Eu 异常。闪长岩在稀土元素配分曲

表 1 拉配泉地区辉长岩(DI707-7)和闪长岩(D2490-1)样品 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年代学分析结果
Table 1 Zircon LA-ICPMS U-Pb dating results of gabbro (DI707-7) and diorites (D2490-1) from Lapeiquan

分析 点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U		同位素比值				年龄/Ma									
	U	Th	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$					
辉长岩(DI707-7)																		
1.1	219.77	118.84	0.54	0.058 58	0.001 61	0.614 68	0.016 23	0.076 10	0.000 56	0.000 14	473	3	487	10	552	61	471	3
2.1	317.95	166.99	0.53	0.057 64	0.001 01	0.606 57	0.009 15	0.076 32	0.000 49	0.000 23	474	3	481	6	516	22	483	5
3.1	281.26	134.93	0.48	0.059 20	0.001 06	0.638 44	0.009 98	0.078 21	0.000 51	0.000 26	485	3	501	6	574	23	519	5
4.1	315.20	211.11	0.67	0.057 44	0.001 17	0.606 15	0.011 06	0.076 52	0.000 54	0.000 24	475	3	481	7	508	28	464	5
5.1	201.97	127.01	0.63	0.058 91	0.001 73	0.608 16	0.017 23	0.074 87	0.000 56	0.000 14	465	3	482	11	564	65	463	3
6.1	153.43	88.36	0.58	0.057 00	0.001 71	0.605 94	0.017 53	0.077 10	0.000 60	0.000 14	479	4	481	11	491	68	478	3
7.1	336.09	180.27	0.54	0.058 67	0.001 34	0.627 49	0.013 69	0.077 57	0.000 53	0.000 13	482	3	495	9	555	51	480	3
8.1	208.75	129.67	0.62	0.057 80	0.001 15	0.606 15	0.010 76	0.076 05	0.000 53	0.000 24	473	3	481	7	522	27	466	5
9.1	268.40	142.83	0.53	0.058 35	0.001 68	0.607 66	0.017 00	0.075 53	0.000 53	0.000 16	469	3	482	11	543	65	468	3
10.1	529.16	249.77	0.47	0.057 14	0.000 85	0.614 68	0.007 42	0.078 01	0.000 47	0.000 19	484	3	487	5	497	16	481	4
11.1	135.36	67.95	0.50	0.060 18	0.001 82	0.629 51	0.018 40	0.075 86	0.000 60	0.000 15	471	4	496	11	610	67	468	3
12.1	235.93	121.71	0.52	0.056 69	0.001 47	0.596 61	0.014 92	0.076 33	0.000 54	0.000 14	474	3	475	9	479	59	474	3
13.1	129.31	62.92	0.49	0.057 72	0.001 83	0.610 45	0.018 74	0.076 70	0.000 62	0.000 15	476	4	484	12	519	71	475	3
14.1	498.56	279.26	0.56	0.058 85	0.000 87	0.638 24	0.007 73	0.078 64	0.000 48	0.000 18	488	3	501	5	562	16	478	4
15.1	475.31	222.70	0.47	0.056 87	0.001 09	0.609 90	0.011 04	0.077 78	0.000 49	0.000 13	483	3	483	7	487	43	483	3
16.1	278.05	159.63	0.57	0.056 88	0.001 43	0.610 21	0.014 78	0.077 81	0.000 54	0.000 13	483	3	484	9	487	57	483	3
17.1	172.93	77.46	0.45	0.058 56	0.001 57	0.624 58	0.016 04	0.077 36	0.000 58	0.000 14	480	3	493	10	551	60	479	3
闪长岩(D2490-1)																		
1.1	41.92	37.65	0.90	0.060 47	0.002 07	0.060 47	0.002 07	0.075 87	0.000 76	0.020 00	471	5	498	13	620	53	454	9
2.1	104.00	38.16	0.37	0.061 62	0.001 36	0.061 62	0.001 36	0.074 83	0.000 56	0.020 00	465	3	500	8	661	30	459	6
3.1	110.86	82.71	0.39	0.059 33	0.001 20	0.059 33	0.001 20	0.074 53	0.000 53	0.020 00	463	3	484	7	579	27	450	5
4.1	105.98	29.61	0.28	0.123 22	0.001 76	0.123 22	0.001 76	0.362 42	0.002 76	0.510 00	1994	13	1999	10	2003	11	1861	19
5.1	76.95	20.07	0.26	0.124 82	0.001 90	0.124 82	0.001 90	0.358 26	0.002 88	0.580 00	1974	14	2000	11	2026	12	1994	23
6.1	54.70	41.24	0.75	0.060 97	0.001 72	0.060 97	0.001 72	0.076 51	0.000 67	0.010 00	475	4	504	11	638	42	475	7
7.1	30.62	28.08	0.92	0.060 55	0.001 70	0.060 55	0.001 70	0.077 40	0.000 68	0.020 00	481	4	506	11	623	42	493	8
8.1	110.92	60.79	0.55	0.060 80	0.001 61	0.060 80	0.001 61	0.073 81	0.000 61	0.010 00	459	4	489	10	632	39	446	6
9.1	146.74	74.22	0.51	0.059 23	0.002 36	0.059 23	0.002 36	0.075 21	0.000 71	0.020 00	467	4	486	15	576	89	465	3
10.1	193.56	41.60	0.21	0.062 10	0.001 42	0.062 10	0.001 42	0.077 15	0.000 59	0.020 00	479	4	515	8	678	32	482	6
11.1	59.92	17.51	0.29	0.124 82	0.001 64	0.124 82	0.001 64	0.366 05	0.002 57	0.010 00	2011	12	2019	9	2026	9	1938	16
12.1	238.34	58.78	0.25	0.061 56	0.002 24	0.061 56	0.002 24	0.077 14	0.000 67	0.020 00	479	4	511	14	659	80	474	3
13.1	92.57	43.72	0.47	0.060 32	0.001 77	0.060 32	0.001 77	0.076 71	0.000 61	0.020 00	476	4	501	11	615	65	473	3
14.1	256.11	151.78	0.59	0.057 40	0.001 55	0.057 40	0.001 55	0.075 67	0.000 56	0.020 00	470	3	477	10	507	61	469	3
15.1	204.68	81.48	0.40	0.060 07	0.002 01	0.060 07	0.002 01	0.076 64	0.000 65	0.020 00	476	4	499	13	606	74	473	3
16.1	133.10	58.01	0.44	0.062 50	0.001 84	0.062 50	0.001 84	0.073 29	0.000 57	0.010 00	456	3	497	11	691	64	450	3
17.1	33.71	29.89	0.89	0.057 88	0.000 97	0.057 88	0.000 97	0.075 72	0.000 48	0.020 00	471	3	480	6	525	20	446	4
18.1	128.72	112.83	0.88	0.057 52	0.001 20	0.057 52	0.001 20	0.074 60	0.000 53	0.020 00	464	3	472	7	512	29	442	5
19.1	62.12	62.24	1.00	0.060 16	0.001 12	0.060 16	0.001 12	0.075 52	0.000 51	0.020 00	469	3	494	6	609	24	471	4
20.1	86.16	64.61	0.75	0.062 33	0.002 12	0.062 33	0.002 12	0.076 95	0.000 66	0.020 00	478	4	515	13	685	74	473	3
21.1	137.11	105.59	0.77	0.058 80	0.001 38	0.058 80	0.001 38	0.075 55	0.000 54	0.030 00	470	3	485	9	560	52	467	3
22.1	112.20	89.55	0.80	0.061 07	0.001 64	0.061 07	0.001 64	0.076 90	0.000 59	0.020 00	478	4.0	507.0	10.0	642.0	59	476	3

表 2 拉配泉地区辉长岩和闪长岩主量元素 ($w_B/\%$) 微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 分析结果Table 2 Major elements ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) compositions of gabbro and diorites from Lapeiquan

岩性 样号	辉长岩				闪长岩					
	D1707-6	D1707-7	D1744-1	D2216-2	D2478-6	D2488-4	D2490-1	D1977-7	D1982-2	D1987-6
SiO ₂	47.67	46.61	49.96	46.15	52.06	53.97	53.18	52.90	54.23	53.04
TiO ₂	0.92	1.50	1.10	1.75	0.61	0.87	0.54	1.08	0.95	0.86
Al ₂ O ₃	15.34	13.47	13.47	14.40	18.03	16.23	16.88	14.70	15.41	15.83
Fe ₂ O ₃	3.62	8.74	4.70	9.36	5.51	5.01	4.23	3.97	4.87	4.23
FeO	7.51	7.34	8.37	8.47	3.34	3.98	4.05	5.97	5.43	4.88
MnO	0.13	0.26	0.20	0.22	0.10	0.12	0.14	0.18	0.11	0.20
MgO	7.49	6.04	6.58	5.15	5.79	5.94	6.23	6.46	6.06	5.87
CaO	7.67	10.76	10.58	9.11	7.51	7.88	7.21	7.18	6.99	7.15
Na ₂ O	3.54	2.17	2.16	3.25	2.68	2.07	2.98	3.62	2.86	2.43
K ₂ O	1.30	0.58	0.45	0.97	1.64	1.88	1.47	1.36	1.95	2.03
P ₂ O ₅	0.32	0.40	0.16	0.26	0.11	0.13	0.16	0.19	0.17	0.10
LOI	3.81	1.80	2.54	1.33	2.93	2.78	2.76	2.70	2.90	2.68
Total	99.32	99.67	100.27	100.42	100.31	100.86	99.83	100.31	101.93	99.30
FeO ^T	12.39	13.69	12.15	15.20	8.30	8.49	7.86	9.54	9.81	8.69
Na ₂ O/K ₂ O	2.72	3.74	4.80	3.35	1.63	1.10	2.03	2.66	1.47	1.20
Mg [#]	59.33	45.45	50.55	39.00	59.40	59.47	62.45	58.67	56.43	58.63
Sr	378.00	301.00	110.00	360.00	168.00	187.00	190.00	293.00	265.00	242.00
Rb	29.20	12.40	2.26	16.90	122.00	76.90	88.00	54.30	64.80	72.10
Ba	686.00	240.00	398.00	470.00	445.00	870.00	668.00	1064.00	764.00	931.00
Th	3.65	0.67	1.59	3.44	5.54	3.67	4.32	3.30	4.21	5.01
Ta	0.67	0.29	0.52	0.37	0.55	0.52	0.48	0.44	0.49	0.52
Nb	13.00	5.20	8.82	6.70	11.30	10.20	11.10	9.88	10.50	10.90
Zr	77.00	25.80	52.60	71.90	36.10	125.00	78.70	160.00	145.30	116.20
Hf	2.48	1.30	1.80	2.52	1.52	3.43	4.20	5.52	5.21	3.80
Sc	34.30	44.90	46.20	38.00	22.80	24.50	36.20	32.60	33.10	28.70
Cr	202.00	48.40	140.00	24.20	84.30	156.80	235.60	229.00	152.30	117.90
Ni	45.64	18.72	32.65	15.33	162.00	178.00	155.00	145.00	189.00	132.00
U	1.23	0.30	0.62	0.91	1.64	1.54	1.06	0.97	1.17	1.25
La	21.20	14.10	8.85	15.70	26.30	18.30	22.50	17.30	19.70	18.70
Ce	44.50	28.60	17.50	30.60	56.30	52.50	50.10	47.50	48.90	47.70
Pr	5.87	4.62	2.47	4.23	7.47	6.65	6.89	7.06	7.17	8.58
Nd	25.20	22.70	11.00	18.80	30.00	27.80	24.50	21.10	28.50	32.60
Sm	5.56	5.69	2.71	4.40	5.42	6.04	5.85	5.23	6.66	5.47
Eu	1.75	2.28	0.97	1.71	2.07	1.83	1.62	1.72	2.01	1.52
Gd	6.26	7.20	3.73	5.37	6.47	5.43	6.41	5.95	6.39	6.37
Tb	0.96	1.12	0.68	0.83	0.92	0.74	0.84	0.93	0.75	0.86
Dy	5.98	6.84	4.72	5.30	5.28	6.14	6.07	6.21	5.21	5.93
Ho	1.26	1.45	1.02	1.07	1.11	1.33	1.29	1.37	1.15	1.41
Er	3.45	3.92	3.02	3.01	3.30	2.98	3.37	3.99	3.06	3.75
Tm	0.55	0.66	0.52	0.52	0.45	0.49	0.50	0.57	0.52	0.40
Yb	2.81	3.20	2.96	2.69	2.99	3.49	2.24	3.74	3.29	4.04
Lu	0.47	0.56	0.51	0.47	0.43	0.48	0.30	0.55	0.43	0.45
Y	31.20	36.00	26.50	27.60	31.20	35.50	36.20	37.00	33.90	32.60
δEu	0.90	1.09	0.93	1.07	1.07	0.96	0.80	0.94	0.93	0.79
ΣREE	125.82	102.94	60.65	94.70	148.51	134.19	132.49	123.22	133.74	137.79
LREE/HREE	6.10	4.62	5.11	4.18	6.10	4.62	5.11	4.18	4.73	4.45
(La/Yb) _N	5.41	3.16	2.14	4.19	6.12	3.94	7.01	3.68	4.37	2.83
La/Nb	1.63	2.71	1.00	2.34	1.63	2.71	1.00	2.34	2.33	1.79
Ba/Nb	52.77	46.15	45.12	70.15	0.43	0.80	0.33	0.70	0.95	0.99
Zr/Nb	5.92	4.96	5.96	10.73	3.70	6.40	6.51	7.02	4.60	4.11

线(图 6b)上显示轻稀土元素富集,重稀土元素分馏不明显,ΣREE 为 $123.82 \times 10^{-6} \sim 148.71 \times 10^{-6}$ (平均 130.87×10^{-6}),LREE/HREE 为 4.18~6.01, $(La/Yb)_N$ 比值为 2.83~7.01,δEu 为 0.60~0.90 (平均 0.74),具弱的 Eu 负异常。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图 6c 和 6d)辉长岩和闪长岩分布型式总体相似,即岩石样品均富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Th、U 和轻稀土元素 La、Ce 和 Sm,而相

对亏损高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf 等,且闪长岩比辉长岩更加亏损 Nb 和 Ta,二者总体显示了俯冲带岩浆岩的特征(Kelemen *et al.*, 2003)。另外,辉长岩 Zr 含量($25.8 \times 10^{-6} \sim 77.0 \times 10^{-6}$)和 Nb/Zr 比值(4.96~10.73,平均为 6.89)与岛弧拉斑玄武岩较为接近,而闪长岩具有高的 Cr($84.3 \times 10^{-6} \sim 235.6 \times 10^{-6}$)、Ni($132 \times 10^{-6} \sim 198 \times 10^{-6}$)含量。

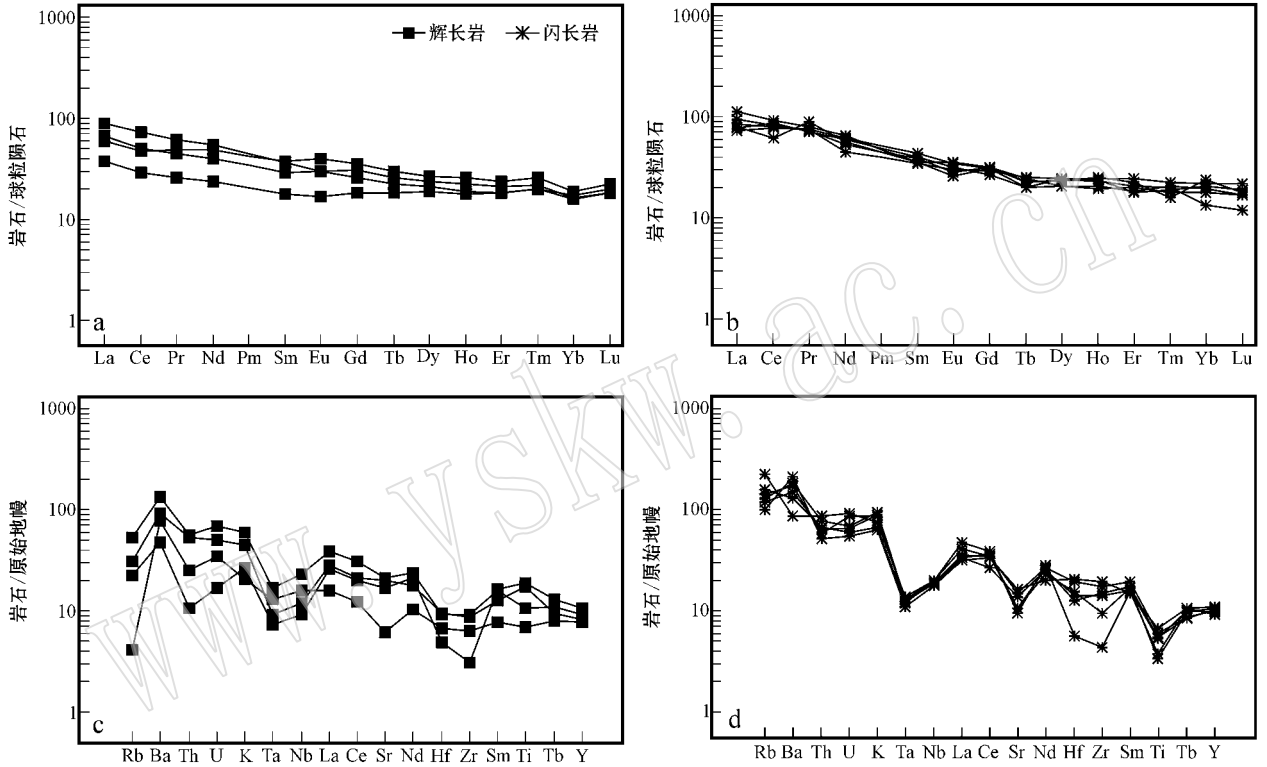


图 6 稀土元素配分曲线图(a,b)和微量元素蛛网图(c,d)(球粒陨石和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns(a, b) and primitive mantle-normalized spidergrams of trace elements(c, d) of gabbro and diorites from Lapeiquan (chondrite and primitive mantle data from Sun and McDonough, 1989)

5 讨论

刘永顺等(2009)在该岩体不同部位取闪长岩同位素年龄样,曾获得测年值 472.3 ± 0.8 Ma。本次所测的辉长岩和闪长岩锆石 U-Pb 年龄分别为 477.5 ± 3.3 Ma 和 469.7 ± 3.4 Ma,分别代表了二者侵位年龄,因此认为齐勒萨依岩体主体侵位于早奥陶世,这与吴才来等(2005, 2007)分别对巴什考供盆地南缘巨斑花岗岩和巴什考供-斯米尔布拉克岩体石英闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果(474 Ma

和 481.6 ± 5.6 Ma)及郝杰等(2006)对金雁山花岗闪长岩体单颗粒锆石(467.1 ± 6 Ma)的定年结果近一致。这些年龄信息揭示了北阿尔金在早中奥陶世存在一次重要的岩浆事件。从岩石组合上,这些侵入岩组成了北阿尔金早古生代的辉长岩-闪长岩-石英闪长岩-花岗闪长岩-花岗岩等 5 种岩石类型组合,构成了基性-中性-酸性的较完整的岩浆演化序列。从地球化学特征看,这两类岩石均富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE),相对亏损高场强元素(HFSE)(郝杰等, 2006;吴才来等, 2005, 2006),总体反映了消减带岩浆岩的特征。研究表

明,具有消减带特征的岩浆可以出现在多种构造环境中,由于大陆地壳的物质组成具有与消减带岩浆相似的地球化学特征(Rudnick and Gao, 2003),由陆壳物质部分熔融形成的酸性岩浆通常继承了消减带特征,这为利用花岗岩确定构造背景带来了很大的不确定性。然而,本次研究的辉长岩具有相对较高的 $Mg^{\#}$ 值(45.55~59.33)和 Cr、Ni 含量,而且稀土元素配分形式大多比较平坦(La/Yb)_N = 2.14~5.41,表明该辉长岩岩浆的 Nb、Ta 亏损不大可能是因板内岩浆受地壳混染所致,其地球化学组成可以用于推测其形成时的构造背景(蔡克大等,2007)。

难溶于水的高场强元素如 Nb-Ta、Ti、Zr-Hf 等活性较弱,在风化和蚀变作用过程中往往保存于蚀变残留物中,这些元素是构造环境判别中最重要和常用的元素(马英军等,1999)。拉配泉地区辉长岩在 2 Nb-Zr/4-Y、Th-Hf/3-Nb/16 和 La/Nb-La 图解上,主要落入火山弧玄武岩和岛弧玄武岩(VAB)区域内(图 7a、7b、7c),并且显示 $La/Nb > 1$,明显不同于 MORB 和 OIB,在 Th/Yb-Nb/Yb 图解上(图 7d)样品落于大陆弧的范围,表明拉配泉地区的辉长岩可能是活动陆缘弧岩浆活动的产物。这一结果也得到闪长岩构造环境判别的印证,在不同构造环境

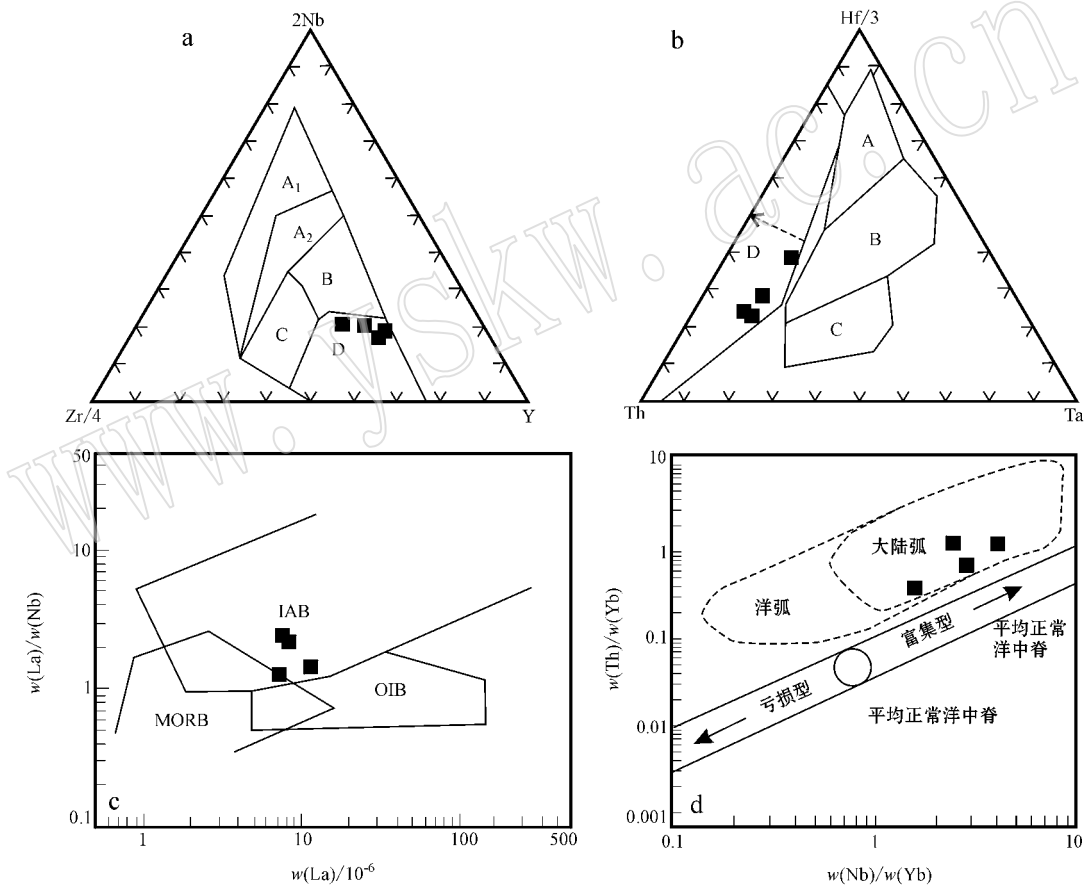


图 7 拉配泉地区辉长岩的构造环境判别图解

Fig. 7 Discrimination diagram of tectonic environment of gabbro in Lapeiquan area

a 为 Nb-Zr-Y 图解(Meschede, 1986): A₁—板内玄武岩; A₂—板内碱性玄武岩和板内拉斑玄武岩; B—异常洋脊玄武岩(E型 MORB); C—板内拉斑玄武岩和火山弧玄武岩; D—正常洋脊玄武岩(N型 MORB)和火山弧玄武岩; b 为 Hf-Th-Ta 图解(Wood, 1980): A—N型 MORB; B—E型 MORB 和板内拉斑玄武岩; C—板内碱性玄武岩; D—岛弧拉斑玄武岩(Hf/Th>3.0)和钙碱性玄武岩(Hf/Th<3.0); c 为 La/Nb-La 图解(李曙光, 1993): IAB—岛弧玄武岩; OIB—洋岛玄武岩; MORB—洋脊玄武岩; d 为 Th/Yb-Nb/Yb 图解(据 Pearce and Peate, 1995)

a—Nb-Zr-Y diagram (after Meschede, 1986): A₁—intraplate basalts; A₂—intraplate alkali basalts and intraplate tholeiites; B—E-type MORB; C—intraplate tholeiites and volcanic-arc basalts; D—N-type MORB and volcanic-arc basalts; b—Hf-Th-Ta diagram (Wood, 1980): A—N-type MORB; B—E-type MORB and intraplate tholeiites; C—alkali intraplate basalts; D—volcanic-arc basalts, island-arc tholeiites plot in field D where Hf/Th>3.0 and calc-alkaline basalts where Hf/Th<3.0; c—La/Nb-La diagram (Li Shuguang, 1993): IAB—volcanic-arc basalts; OIB—ocean island basalt; MORB—mid-ocean ridge basalt; d—Th/Yb-Nb/Yb diagram (after Pearce and Peate, 1995)

花岗岩非活动元素判别图上(Pearce *et al.*, 1984), 闪长岩样品落入火山弧花岗岩区(图 8a, 8b)。该图中火山弧花岗岩区包括 Maniar 和 Piccoli(1989)分类中的岛弧花岗岩类和大陆弧花岗岩类。为了进一步确定其形成的构造环境,笔者采用了 Michael 和 Eva(2000)中酸性火山岩的 Th/Yb - Ta/Yb 构造环境判别图解,结果显示闪长岩样品全部投影到活动大陆边缘范围内(图 8d),而在 $R_2 - R_1$ 图解(图 8c)中,样品落入板块碰撞前消减地区花岗岩区域。因此本次研究的辉长岩和闪长岩均形成于活动大陆边缘环境,为活动陆缘弧岩浆活动的产物,这与郝杰等(2006)的认识是一致的。另外,闪长岩中 3 粒锆石

得到 2019 ± 32 Ma 的加权平均年龄,这一结果与胡霏琴等(2001)报道的原阿尔金山岩群灰色片麻岩的 Sm-Nd 模式年龄 t_{DM} 值(1.82~1.94 Ga)相近,意味着其岩浆可能来源于由早前寒武纪岩石构成的陆壳物质的部分熔融或是遭受了古老陆壳物质的强烈混染,同时也反映了米兰河-金雁山地块的早前寒武纪基底可能主要由古元古代和古元古代末的物质组成,进一步揭示了这些侵入岩体是建立了在陆壳的基础之上。

在该岩体的北侧发育红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带,近年来在混杂岩带内相继发现榴辉岩和蓝片岩、高压变泥质岩石、深海硅质岩、枕状玄武岩和席

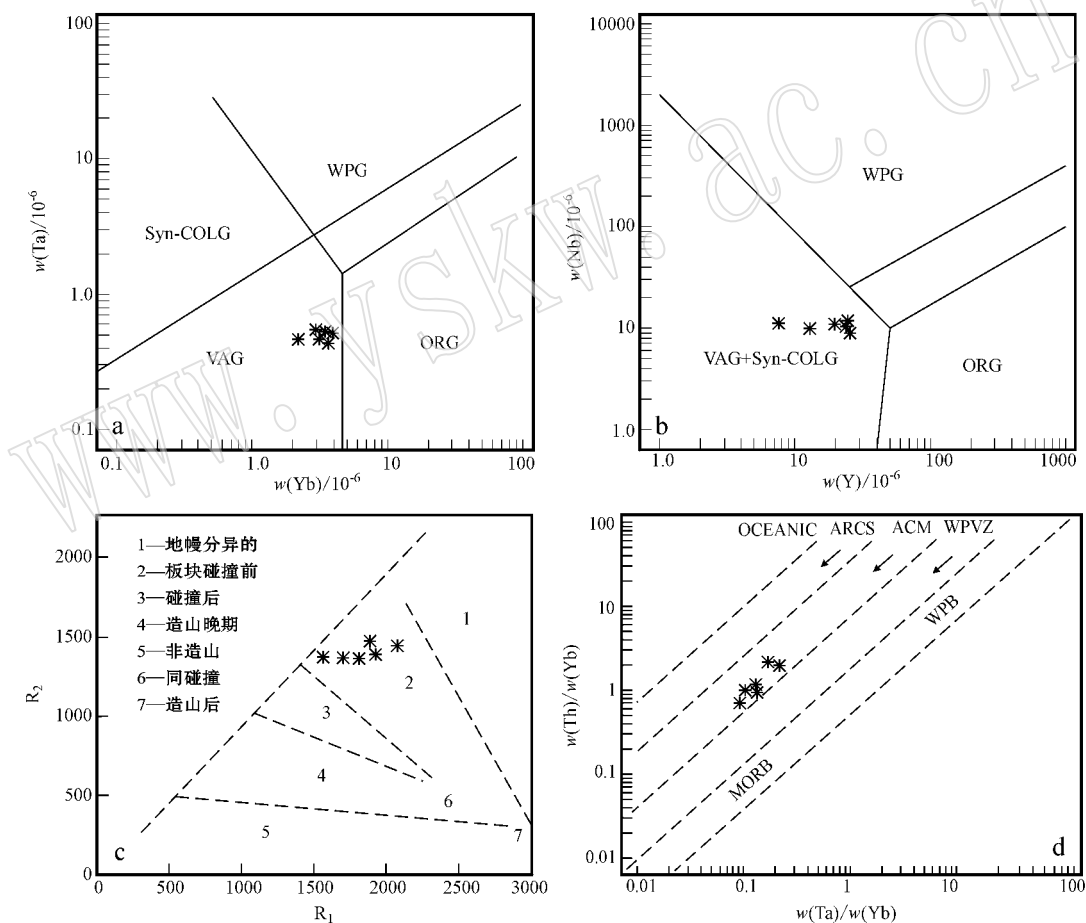


图 8 闪长岩构造环境判别图解

Fig. 8 Tectonic environment discrimination diagram of diorites from Lapeiquan

a 和 b 分别为 Ta - Yb 和 Nb - Y 图解(据 Pearce and Nigel, 1984): VAG—火山弧花岗岩; ORG—洋脊花岗岩; WPG—板内花岗岩; S-COLG—同碰撞花岗岩; c 为 $R_2 - R_1$ 图解(据 Batchelor and Bowden, 1985); d 为 Th/Yb - Ta/Yb 图解(据 Michael and Eva, 2000): WPVZ—板内火山岩带; ACM—活动大陆边缘; ARCS—大洋岛弧; WPB—板内玄武岩; MORB—大洋中脊玄武岩

a and b are Ta - Yb and Nb - Y diagrams(after Pearce and Nigel, 1984): VAG—volcanic arc granites; ORG—oceanic ridge granites; WPG—intraplate granites; S-COLG—syn-collisional granites; c is $R_2 - R_1$ diagram; d is Th/Yb - Ta/Yb diagram(after Michael and Eva, 2000): WPVZ—intraplate volcanic zones; ACM—active continental margins; WPB—intraplate basalt; MORB—mid-ocean ridge basalt

状岩墙群,为北祁连俯冲碰撞杂岩带的西延部分(许志琴等,1999;刘良等,1999;Zhang and Meng, 2005 杨经绥等,2008)。此外在构造混杂岩带和米兰河-金雁山地块中,还存在着由双峰式火山岩和陆缘浊积岩组成的火山-沉积岩地层,其中 Gehrels 等(1999)获得拉配泉地区这套火山-沉积岩中流纹岩年龄为 480 Ma,而红柳沟和卡拉塔格变质砂岩(复理石沉积)中分别获得主期年龄为 482 和 487 Ma 的碎屑锆石年龄谱系(王小凤等,2004),包括本次侵入该套地层的辉长岩的年龄为 477.5 ± 3.3 Ma,表明这套火山-沉积地层应属于早中奥陶系。这就意味着在阿尔金北缘存在着以红柳沟-拉配泉为代表的古洋盆以及由辉长岩和花岗岩类组成的深成侵入体和以早古生代火山-沉积岩组合为代表的古火山-岩浆弧带构成的活动陆缘构造格局,进一步佐证了北阿尔金发育早中奥陶世的陆缘岩浆弧。这将对早古生代期间北阿尔金古洋陆构造格局和俯冲碰撞造山过程提供了重要的约束。

正如前所述,齐勒萨依岩体在产出上位于红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带的南侧,二者以近东西向发育的断裂为界。笔者获得拉配泉地区齐勒萨依岩体中辉长岩年龄为 477.5 ± 3.3 Ma,与杨经绥等(2008)报道的米兰红柳沟蛇绿混杂岩中堆晶辉长岩年龄(479 ± 8 Ma)相一致,他们认为堆晶辉长岩的年龄代表蛇绿岩的形成时代,地幔橄榄岩和堆晶岩的成分及其堆晶岩组合特征揭示了该蛇绿岩是 SSZ 构造背景的产物。最近张志诚等(2009)获得了东段阿克赛青崖子附近蛇绿混杂岩中辉长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 521 ± 12 Ma,辉长岩的岩石地球化学特征也表明其可能既保留了形成于 MORB 的背景信息,也记录了 SSZ 环境改造的结果,郭召杰等(1998)获得阿克塞以东半鄂博图沟残留在蛇绿岩中辉长岩的 Sm-Nd 等时线年龄 829 ± 60 Ma,但张旗等(2001)认为郭召杰等测试样品不属于蛇绿岩的岩石组合,因此认为 829 ± 60 Ma 不能代表蛇绿岩的形成时代。笔者对这 4 类辉长岩进行了构造环境判别,在 $\text{FeO}^T/\text{MgO} - \text{TiO}_2$ 判别图解(图 9)上,拉配泉地区齐勒萨依岩体和半鄂博图沟的辉长岩均投影在岛弧拉斑玄武岩(IAB)区域内,红柳沟堆晶辉长岩由于 TiO_2 含量低,未投在任何的区域,阿克赛青崖子投影在洋中脊玄武岩(MORB)区域内,表明这 4 个不同位置的辉长岩可能形成于不同的构造环境,其成因也可能有所不同。在用辉长岩确定阿尔金北缘蛇绿

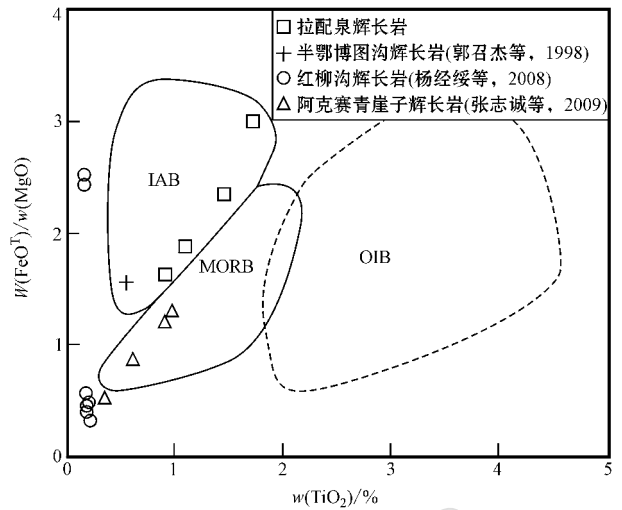


图 9 $\text{FeO}^T/\text{MgO} - \text{TiO}_2$ 判别图解

(据 Pearce and Cann, 1973)

Fig. 9 $\text{FeO}^T/\text{MgO} - \text{TiO}_2$ diagrams of gabbroic rocks

(after Pearce and Cann, 1973)

IAB—岛弧拉斑玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩; OIB—洋岛玄武岩

IAB—*island arc tholeiite*; MORB—*ocean mid-ridge basalt*;

OIB—*ocean island basalt*

岩混杂岩形成年龄的同时,许多学者对玄武岩和蛇绿岩也进行了相关定年工作,如刘良等(1999)根据红柳沟蛇绿岩中玄武岩样品获得的 Sm-Nd 等时线年龄 508.3 ± 41.4 Ma,提出洋壳形成在早古生代早期,闭合于加里东末期;车自成等(2002)曾根据贝克滩洋岛玄武岩的 524 Ma 的 Sm-Nd 全岩等时线年龄和地层中的化石,认为阿尔金北缘蛇绿岩形成于晚寒武—早奥陶世,董连慧等(2010)报道了 2009 年完成的阔什布拉克 1:5 区调获得的红柳沟蛇绿岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 529 Ma,洋脊拉斑玄武岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 754~763 Ma。这些年龄信息共同揭示了北阿尔金山红柳沟-拉配泉蛇绿岩所代表的大洋扩张时代可能从南华纪一直持续到早寒武世。至于如何认识这些辉长岩年龄的地质意义,需要今后开展大量的研究工作。

6 结论

基于对拉配泉地区齐勒萨依岩体野外调查、岩相学分析、锆石 U-Pb 年龄及地球化学的综合研究,可以得出以下两点结论:

(1) 北阿尔金拉配泉地区齐勒萨依岩体中闪长岩和辉长岩的岩石地球化学表明,二者形成于类似

于安第斯山的活动陆缘弧的构造环境。

(2) 阿尔金北缘齐勒萨依岩体中辉长岩和闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 477.5 ± 3.3 Ma (MSWD=4.3) 和 469.7 ± 3.4 Ma (MSWD=1.5), 分别代表了二者的侵位年龄, 表明北阿尔金与俯冲相关的陆缘型岩浆岩的形成时代为早中奥陶世, 同时也揭示了以红柳沟-拉配泉蛇绿岩为代表的古洋盆在早中奥陶世发生了向南俯冲作用。

References

- Batchelor R A and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation granitoid rock series using multicationic parameters [J]. *Chemical Geology*, 48 : 43~55.
- Cai Keda, Yuan Chao, Sun Min, *et al.* 2007. Geochemical characteristics and ^{39}Ar - ^{40}Ar ages of the amphibolites and gabbros in Tarlang area : implications for tectonic evolution of the Chinese Alta [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (5) : 877~888 (in Chinese with English abstract).
- Che Zicheng, Liu Liang, Liu Hongfu, *et al.* 1995. Discovery and occurrence of high-pressure metapelitic rocks from Altun Mountain areas, Xinjiang Autonomous Region [J]. *Chinese Science Bulletin*, 40 (23) : 1988~1991 (in Chinese with English abstract).
- Che Zicheng, Liu Liang and Luo Jinhai. 2002. Tectonics of China and Adjacent Region [M]. Beijing : Science Press, 207~369 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xuanhua, George G, Wang Xiaofeng, *et al.* 2003. Granite from north Altyn Tagh, NW China : U-Pb geochronology and tectonic setting [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 22 (4) : 294~298 (in Chinese).
- Chen Xuanhua, Wang Xiaofeng, Yang Feng, *et al.* 2001. Tectonic environments of magmatism in Early Paleozoic in the north Altyn Tagh, China [J]. *Geomechanics*, 7 (3) : 193~200 (in Chinese with English abstract). Cui Junwen, Tang Zhemin, Deng Jinfu, *et al.* 1999. Altun Fault System [M]. Beijing : Geological Publishing House, 1~65 (in Chinese with English abstract).
- Dong Lianhui, Zhu Zhixin, Qu Xun, *et al.* 2010. Spatial distribution, geological feature and latest research progress of the main ophiolite zones in Xinjiang, NW-China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (10) : 2894~2904 (in Chinese with English abstract).
- Gao S, Liu X M, Yuan H L, *et al.* 2002. Analysis of forty-two major and trace elements of USGS and NIST SRM glasses by LA-ICP-MS [J]. *Geostand. Newsl*, 26 : 181~195.
- Ge Xiaohong, Liu Yongjiang and Ren Shoumai. 2002. Uplift dynamics of the Qinghai-Tibet Plateau and Altun fault [J]. *Geology in China*, 29 (4) : 346~350 (in Chinese with English abstract).
- Gehrels G, Yin A and Chen X. 1999. Preliminary U-Pb geochronologic studies along the Altyn Fault, west China [J]. *Eos Trans. AGU*, 80 (17), Fall Meet. Suppl., F1 018.
- Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng and Wang Jianjun. 1998. Sm-Nd isochron age of ophiolite zone in northern margin of Altun Mountains and its tectonic significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 43 (5) : 456~458.
- Hao Jie, Wang Erqi, Liu Xiaohan, *et al.* 2006. Jinyanshan collisional orogenic belt of the early Paleozoic in the Altun Mountains : evidence from single zircon U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic dating for the arc magmatite and ophiolite mélange [J]. *Acta Geologica Sinica*, 22 (11) : 2743~2752 (in Chinese with English abstract).
- He Guoqi, Li Maosong, Liu Dequan, *et al.* 1994. Crustal Evolution and Mineralization in Paleozoic of Xinjiang, China [M]. Urumchi : People Publishing House of Xinjiang, 43~47 (in Chinese with English abstract).
- Hu Aiqin, Zhang Guoxin, Chen Yibing, *et al.* 2001. A Model of division of the continental crust basement and the time scales of the major geological events in the Xinjiang-based on studies of isotopic geochronology and geochemistry [J]. *Xinjiang Geology*, 19 (1) : 12~19 (in Chinese with English abstract).
- Kelemen P B, Yogodzinski G M and Scholl D W. 2003. Along-strike variation in the Aleutian island arc : Genesis of high Mg[#] andesites and implications for continental crust [A]. *Inside the Subduction Factory* [C]. Washington D C : American Geophysical Union, 223~276.
- Li Shuguang. 1993. Ba/Th-Nb/La discrimination of tectonic environment of Ophiolite generation [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9 (2) : 146~157 (in Chinese with English abstract).
- Liu Liang, Che Zicheng, Wang Yan, *et al.* 1999. The tectonic characters and geotectonic setting of high-pressure metamorphic rock belts in Altun Mountain [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15 (1) : 57~64 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongshun, Yu Haifeng, Xin Houtian, *et al.* 2009. Tectonic units division and Precambrian significant geological events in Altyn Tagh Mountain, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 28 (10) : 1430~1438 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. User's manual for isoplot 3.00 [A]. Berkeley Geochronology Center Special Publication [C], 4 : 46.
- Ma Yingjun and Liu Congqiang. 1999. Trace element geochemistry in the process of chemical weathering : for example biotite granite weatherings crust in Longnan area, Jiangxi Province [J]. *Chinese Science Bulletin*, 44 (22) : 2433~2437 (in Chinese with English abstract).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of American Bulletin*, 101 : 635~643.
- Meschede M A. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram [J]. *Chem. Geol.*, 56 : 207~218.
- Michael P G and Eva S S. 2000. From continents to island arcs : A geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks [J]. *Canada Mineralogy*, 38 : 1065~1073.
- Pearce J A and Cann J R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 19 : 290~300.

- Pearce J A, Nigel BW, Harris, *et al.* 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25 : 956~983.
- Pearce J A and Peate D W. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas[J]. *Annu. Rev. Sci.*, 23 : 251~285.
- Qi Xuexiang, Li Haibing, Wu Cailai, *et al.* 2005. The zircon SHRIMP U-Pb dating of the Qiaoshikayi granodiorite in Northern Altun[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(6): 571~576 (in Chinese with English abstract).
- Rudnick R L and Gao S. 2003. Composition of the continental crust [A]. Holland H D and Turekian K K. *The Crust Vol. 3 Treatise on Geochemistry*[C]. Oxford : Elsevier-Pergamon, 1~64.
- Sobel E R and Arnaud N A. 1999. A possible middle Paleozoic suture in the Altyn Tagh, NW China[J]. *Tectonics*, 18(1): 64~74.
- Wood D A. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 50 : 11~30.
- Sun S S and McDonoug W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts : Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in Ocean Basins*[C]. *Geol. Soc. Spec. Pub.*, 42 : 315~345.
- Wang Xiaofeng, Chen Xuanhua, Chen Zhengle, *et al.* 2004. Geological Setting for Metallogenesis and Prospecting of Ore Deposits in the Altyn Tagh area[M]. Beijing : Geological Publishing House, 65~218 (in Chinese with English abstract).
- Wiedenbeck M, Alle P and Corfu F. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses[J]. *Geostand. News*, 19 : 1~23.
- Wu Cailai, Yang Jingsui, Yao Shangzhi, *et al.* 2005. Characteristics of the granitoid complex its zircon SHRIMP dating at the south margin of the Bashikaogong Basin, North Altun, NW[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 849~858 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Yao Shangzhi, Zeng Lingsen, *et al.* 2007. Characteristics of the granitoid complex its zircon SHRIMP dating at the south margin of the Bashikaogong Basin-Simierbulake, North Altun, NW[J]. *Science in China (Series D)*, 37(1): 10~26 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Zhang Jianxin, *et al.* 1999. Comparison of tectonic units in two sides of the Altyn Tagh fault and lithospheric shear[J]. *Acta Geologica Sinica*, 73 : 193~205 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Shi Rendeng, Wu Cailai, *et al.* 2008. Petrology and SHRIMP age of the Hongliugou ophiolite at Milan, north Altun, at the northern margin of the Tibet plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1567~1584 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, *et al.* 2003. LA-ICPMS zircon U-Pb dating and rare earth element analyses for China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(14): 1511~1520 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Honglin, Gao Shan, Liu Xiaoming, *et al.* 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Geanalytical and Geostandard Newsletters*, 28(3): 353~370.
- Zhang J X, Meng F C and Yang J S. 2005. A new HP/LT metamorphic terrane in the northern Altyn Tagh, western China[J]. *International Geology Review*, 47 : 371~386.
- Zhang Jianxin, Meng Fancong, Yu Shengyao, *et al.* 2007. ³⁹Ar-⁴⁰Ar geochronology of high-pressure/low-temperature blueschist and eclogite in the north Altyn Tagh and their tectonic implications[J]. *Geology in China*, 34(4): 558~564 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi and Zhou Guoqing. 2001. *Ophiolite of China*[M]. Beijing : Science Press, 6~48 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhicheng, Guo Zhaojie and Song Biao. 2009. SHRIMP zircon dating of gabbro from the ophiolitemélange in the northern Altyn Tagh and its geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3): 568~576 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡克大,袁超,孙敏,等. 2007. 阿尔泰塔塔尔浪地区斜长角闪岩和辉长岩的形成时代、地球化学特征和构造意义[J]. *岩石学报*, 23(5): 877~888.
- 车自成,刘良,刘洪福,等. 1995. 阿尔金山地区高压变质泥质岩石的发现及其产出环境[J]. *科学通报*, 40(14): 1298~1300.
- 车自成,刘良,罗金海. 2002. 中国及其邻区区域大地构造学[M]. 北京 : 科学出版社, 207~369.
- 陈宣华, Gehrels G, 王小凤, 等. 2003. 阿尔金山北缘花岗岩的形成时代及其构造环境探讨[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 22(4): 294~298.
- 陈宣华, 王小凤, 杨风, 等. 2001. 阿尔金山北缘早古生代岩浆活动的构造环境[J]. *地质力学学报*, 7(3): 193~200.
- 崔军文, 唐哲民, 邓晋福, 等. 1999. 阿尔金断裂系[M]. 北京 : 地质出版社, 1~65.
- 董连慧, 朱志新, 曲迅, 等. 2010. 新疆蛇绿岩的分布、特征及最新研究进展[J]. *岩石学报*, 26(10): 2894~2904.
- 葛肖虹, 刘永江, 任收麦. 2002. 青藏高原隆升动力学与阿尔金断裂[J]. *中国地质*, 29(4): 346~350.
- 郭召杰, 张志诚, 王建军. 1998. 阿尔金北缘蛇绿岩的 Sm-Nd 等时线年龄及其大地构造意义[J]. *科学通报*, 43(18): 1981~1984.
- 郝杰, 王二七, 刘小汉, 等. 2006. 阿尔金山脉中金雁山早古生代碰撞造山带 : 弧岩浆岩的确定与岩体锆石 U-Pb 和蛇绿混杂岩 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学研究的证据[J]. *岩石学报*, 22(11): 2743~2752.
- 何国琦, 李茂松, 刘德权, 等. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿[M]. 乌鲁木齐 : 新疆人民出版社, 43~47.
- 胡霭琴, 张国新, 陈义兵, 等. 2001. 新疆大陆基底分区模式和主要地质事件的划分[J]. *新疆地质*, 19(1): 12~19.
- 李曙光. 1993. 蛇绿岩生成构造环境的 Ba/Th - Nb/La 判别图[J]. *岩石学报*, 9(2): 146~157.

- 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, 5(1): 57~64.
- 刘永顺,于海峰,辛后田,等. 2009. 阿尔金山地区构造单元划分和前寒武纪重要地质事件[J]. 地质通报, 28(10): 1430~1438.
- 马英军,刘丛强. 1999. 化学风化作用过程中的微量元素地球化学——以江西龙南黑云母花岗岩风化壳为例[J]. 科学通报, 44(22): 2433~2437.
- 戚学祥,李海兵,吴才来,等. 2005. 北阿尔金恰什坎萨依花岗岩闪长岩的 SHRIMP-U-Pb 定年及其地质意义[J]. 科学通报, 50(6): 571~576.
- 王小凤,陈宣华,陈正乐,等. 2004. 阿尔金地区成矿地质条件与远景预测[M]. 北京:地质出版社, 65~218.
- 吴才来,杨经绥,姚尚志,等. 2005. 北阿尔金巴什考供盆地南缘花岗岩杂岩体特征及锆石 SHRIMP 定年[J]. 岩石学报, 21(3): 846~858.
- 吴才来,姚尚志,曾令森,等. 2007. 北阿尔金巴什考供盆地-斯米尔布拉克花岗岩杂岩体特征及锆石 SHRIMP 定年[J]. 中国科学(D 辑), 21(3): 846~858.
- 许志琴,杨经绥,张建新,等. 1999. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制[J]. 地质学报, 73(3): 193~205.
- 杨经绥,史仁灯,吴才来,等. 2008. 北阿尔金地区米兰红柳沟蛇绿岩的岩石学特征和 SHRIMP 定年[J]. 岩石学报, 24(7): 1567~1584.
- 袁洪林,吴福元,高山,等. 2003. 东北地区新生代侵入岩的激光锆石探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J]. 科学通报, 48(4): 1511~1520.
- 张建新,孟繁聪,于胜尧,等. 2007. 北阿尔金 HP/LT 蓝片岩和榴辉岩的 Ar-Ar 年代学及其构造意义[J]. 中国地质, 34(4): 558~564.
- 张旗,周国庆. 2001. 中国蛇绿岩[M]. 北京:科学出版社, 46~48.
- 张志诚,郭召杰,宋彪. 2009. 阿尔金北缘蛇绿混杂岩中辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 25(3): 568~576.

更正

经作者提出,发表于本刊 2011 年第 30 卷第 6 期 1132~1138 页,署名为马向贤、郑国东、梁收运、魏丽娟、梁明亮的论文《黄铁矿风化作用及其工程地质意义》,以下表述不当或欠妥,现特此更正,并对由此给读者带来的不便表示歉意。

① 中文摘要:第 4 行“导致工程建筑的膨胀破坏”改为“导致工程建筑的非均匀膨胀破坏”;第 6 行“一些重视”改为“一定程度的重视”;第 7 行“导致的工程地质问题”后增加“尤其是风化机理与危害过程”。② 前言部分:倒数第 8 行“虽然”改为“尽管”。③ 第 1 节:第 2 行“在地质体中常呈现多种多样的结晶形态”改为“在地质体中常以多种多样的结晶形态出现”;倒数第 2 行“导致大范围的不均匀凸起,产生很多工程地质问题”改为“产生大范围的不均匀凸起,导致很多工程地质问题”。④ 第 2 节:第 2 段第 4 行“初始阶段后”加“,”;第 7 段第 3 行“被氧化后的 SO_4^{2-} ”改为“被氧化后产生的 SO_4^{2-} ”;第 7 段第 9 行“这种不均匀膨胀造成的地质工程破坏更严重”改为“从而不均匀膨胀造成的地质工程破坏将更为严重”。⑤ 第 3 节:第 1 段第 1 行“黄铁矿引发的”改为“黄铁矿氧化风化引发的”;第 3.1 节第 1 行“由于硫酸盐还原菌具群居性”改为“硫酸盐还原菌具有典型的群居性”;第 3.3 节第 1 行“壁顶发生凸起”改为“壁顶出现凸起”;第 6 行“导致隧道和涵洞等壁顶发生凸起”改为“导致隧道和涵洞等壁顶出现非均匀的凸起”;第 7 行“发生破坏”改为“被破坏”;第 3.4 节第 8 行“导致灾害”改为“导致地质灾害”;第 3.5 节第 7 行“会流到巷道一般为钢铁或混凝土等材料制成的支护结构上”改为“难免会流到由钢铁或混凝土等材料制成的支护结构上”;第 12~13 行,删除“此处不再阐述”;第 3.6 节第 9 行“,”改为“。”。⑥ 第 4 节:倒数第 1 行“维修”改为“维护”。⑦ 第 5 节:第 2 段第 1 行“重视黄铁矿的地球化学机理研究”改为“重视黄铁矿风化的地球化学机理研究”;第 2 段倒数第 2 行“活动状况”改为“活动状况的信息”;第 3 段第 2 行“大多数以避开黄铁矿”改为“大多数以避开黄铁矿发育区带”;第 3 段第 3 行“但效果欠佳后”加“,”;第 3 段第 4 行“特别是生物化学处理方法”改为“特别是生物化学处理方法的应用”;第 4 段第 2 行“相结合”改为“有机结合”;“逐步提出”改为“创新发展”;第 4 段第 3 行“减少甚至杜绝黄铁矿带给人类的危害”改为“尽量减少甚至杜绝黄铁矿带给人类的危害”。