

新疆阿舍勒铜锌矿区潜玄武安山岩的岩石 地球化学特征及其地质意义

吴玉峰, 杨富全, 刘 锋

(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)

摘要: 对新疆阿舍勒铜锌矿区潜玄武安山岩进行了岩石学、岩石地球化学和同位素地球化学研究, 结果表明: 岩石具有中等的 SiO_2 (51.90% ~ 52.85%)、 MgO (4.44% ~ 5.08%)、 Al_2O_3 (14.94% ~ 16.11%)、 TiO_2 (0.99% ~ 1.03%) 含量, 较低的 K_2O (0.01% ~ 0.27%) 含量, 属于低钾拉斑玄武岩系列; 岩石具有较低的稀土元素总量, $\Sigma\text{REE} = 38.07 \times 10^{-6} \sim 41.70 \times 10^{-6}$, 亏损轻稀土元素, $\text{LREE}/\text{HREE} = 0.57 \sim 0.61$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.84 \sim 0.91$, 具有明显 Eu 正异常 ($\delta\text{Eu} = 1.13 \sim 1.23$); 富集 Sr、Ba、Th 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素, 具有洋中脊玄武岩 (MORB) 和岛弧拉斑玄武岩 (IAB) 的特征, 形成于岛弧 (或弧前) 环境; 具有相对高的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值 (+6.9 ~ +7.6), 表明其原始岩浆来源于俯冲流体交代地幔楔的部分熔融, 没有明显深海沉积物加入。结合阿尔泰山南缘的区域地质资料及潜玄武安山岩的地球化学特征, 认为阿尔泰山南缘在晚古生代处于活动大陆边缘, 阿舍勒盆地处于岛弧 (或弧前) 背景。

关键词: 潜玄武安山岩; 地球化学; Sr-Nd 同位素; 岛弧背景; 阿舍勒

中图分类号: P588.13; P59

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)01-0065-16

Geochemical characteristics of basaltic andesite subvolcanic rocks in the Ashele Cu-Zn deposit and their geological significance

WU Yu-feng, YANG Fu-quan and LIU Feng

(Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Land and Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Geology, geochemistry and isotopic geochemistry are reported for the subvolcanic rocks from the Ashele Cu-Zn deposit. The rocks are basaltic andesites belonging to low-K tholeiite series, and are characterized by intermediate SiO_2 (51.90% ~ 52.85%), MgO (4.44% ~ 5.08%), Al_2O_3 (14.94% ~ 16.11%), TiO_2 (0.99% ~ 1.03%) values and low K_2O (0.01% ~ 0.27%) content. They have low REE values ($\Sigma\text{REE} = 38.07 \times 10^{-6} \sim 41.70 \times 10^{-6}$) and exhibit LREE depletion with LREE/HREE ratio of 0.57 ~ 0.61 and $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ ratio of 0.84 ~ 0.91, and positive Eu anomaly. The trace elements are characterized by enrichment of Sr, Ba, and Th and depletion of Nb, Ta, Zr and Hf. They show both compositional characteristics of the mid-ocean ridge basalt (MORB) and the island arc basalt (IAB). Relatively high $\epsilon\text{Nd}(t)$ values (+6.9 ~ +7.6) suggest that their primitive magma was possibly generated by partial melting of a metasomatic mantle source modified by the subducted slab-derived fluid rather than by the slab-derived melt. Combined with the tectonic evolution of the southern margin of the Altay, the authors hold that the southern margin of the Altay was in an active continental margin setting during the late Paleozoic, and the Ashele Basin was in an island arc or

收稿日期: 2015-05-20; 接受日期: 2015-08-02

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAB06B03-02); 国家自然科学基金项目(41272103)

作者简介: 吴玉峰(1983-), 男, 博士后, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: sdwyufeng02@163.com; 通讯作者: 杨富全(1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 从事矿床地质、地球化学研究, E-mail: fuquanyang@163.com。

forearc setting.

Key words: basaltic andesite subvolcanic rock; geochemistry; Sr-Nd isotopes; island arc setting; Ashele

Fund support: National Key Technologies R & D Program (2011BAB06B03-02); National Natural Science Foundation of China Program (41272103)

阿尔泰造山带自西向东横跨哈萨克斯坦、俄罗斯、中国和蒙古,是中亚造山带的重要组成部分(Sengor *et al.*, 1993; Xiao *et al.*, 2009, 2010),经历了板块俯冲、碰撞和造山后的地壳垂向增生过程(王涛等, 2005; 童英等, 2007)。该带构造活动和造山作用复杂,岩浆活动强烈(何国琦等, 1994; Chen and Jahn, 2002; Windley *et al.*, 2002; Xiao *et al.*, 2009; Cai *et al.*, 2011a, 2011b)。中国阿尔泰造山带作为阿尔泰造山带重要组成部分,发育泥盆纪火山岩及其与之有关的多金属矿床,成为研究阿尔泰地区构造演化与成矿作用的热点地区。前人对区内火山岩及火山盆地做了大量研究工作,对其形成时代、物质来源及演化、构造环境及与成矿作用的关系取得了丰硕的成果(Chai *et al.*, 2009, 2014; Xu *et al.*, 2010; Wan *et al.*, 2010a, 2010b; Pirajno *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2012; 刘伟等, 2013; Yang *et al.*, 2013, 2014; He *et al.*, 2015)。

阿尔泰造山带南缘发育 4 个 NW 向斜列的泥盆纪火山沉积盆地,位于西北端的阿舍勒盆地因发育有著名的阿舍勒铜锌矿床而备受关注。有关矿床的含矿火山岩、矿床地质特征、矿床地球化学、构造及年代学等方面已做了大量研究工作(陈毓川等, 1996; Wang *et al.*, 1998; 牛贺才等, 2006; 高珍权等, 2010; 宋国学等, 2010; Wan *et al.*, 2010a; 杨富全等, 2013; Yang *et al.*, 2014; 吴玉峰等, 2015),认为阿舍勒铜锌矿形成早中泥盆世(Yang *et al.*, 2014)的大陆裂谷环境(陈毓川等, 1996)或成熟岛弧环境(高珍权等, 2010)。柴凤梅等(2013)对矿区出露的花岗质岩体进行了年代学和岩石地球化学的研究,认为阿舍勒盆地早中泥盆世处于活动大陆边缘环境。可见阿舍勒盆地形成构造背景仍具有争议。前人对阿舍勒盆地岩浆作用的研究主要集中在赋矿层位阿舍勒组火山岩以及矿区侵入岩,对齐也组火山岩研究较为薄弱,从而限制了对晚泥盆世阿舍勒盆地构造演化的认识。晚泥盆世齐也组呈喷发不整合覆于阿舍勒组之上,发育中酸性火山岩,同时发育多个古火山机构,并被潜火山岩充填。阿舍勒盆地火山地层因普遍遭受绿片岩相变质作用而变

形强烈,而位于古火山机构中的潜火山岩遭受变质程度相对较弱,为研究火山岩形成构造背景提供了良好的地质条件。晚泥盆世齐也组与阿舍勒组在时空上有密切联系,研究齐也组火山岩能够认识阿舍勒盆地晚泥盆世的地质背景,结合前人研究成果对阿舍勒盆地构造背景有很好的限定作用。本文拟在前人研究基础上,对阿舍勒铜锌矿区齐也组古火山机构中的潜玄武安山岩进行岩石学、岩石地球化学和同位素研究,以期揭示阿舍勒铜锌矿形成后的地质背景,丰富阿舍勒盆地的构造演化,为阿尔泰南缘构造演化提供地质资料。

1 区域地质背景

新疆阿尔泰造山带位于新疆北部,呈北西向展布,位于西伯利亚板块与哈萨克斯坦-准噶尔板块结合部位,是哈萨克斯坦阿尔泰巨型成矿带的东延部分(杨富全等, 2006)。该造山带构造活动剧烈,北西-南东向断裂发育,将阿尔泰造山带分为北阿尔泰构造带、中阿尔泰构造带、南阿尔泰构造带以及额尔齐斯构造带(Yuan *et al.*, 2007)。

阿舍勒盆地位于南阿尔泰构造带的西南缘,发育阿舍勒大型铜锌矿。阿舍勒盆地大地构造上位于西伯利亚板块的南阿尔泰晚古生代活动大陆边缘的大洋岛弧(牛贺才等, 2006; Wan *et al.*, 2010a)。区域出露地层主要有:上志留统-下泥盆统康布铁堡组,分布在阿舍勒盆地西北角,主要岩性为低角闪岩相-高绿片岩相变质酸性火山岩、火山碎屑岩和陆源碎屑岩(图 1);下中泥盆统托克萨雷组,分布于马尔卡库里断裂西侧,主要岩性为滨-浅海相沉积岩;下中泥盆统阿舍勒组,位于阿舍勒盆地中部,与上覆上泥盆统齐也组呈角度不整合接触,为一套海相中酸性、基性火山岩、火山碎屑岩为主的火山-沉积岩夹碳酸盐岩;上泥盆统齐也组为一套浅海-半深海相中酸性火山岩,分布于盆地中北部;下石炭统红山嘴组,为一套滨-浅海相火山岩-碎屑沉积岩夹碳酸盐岩(陈毓川等, 1996),与下伏上泥盆统呈角度不整合接触。

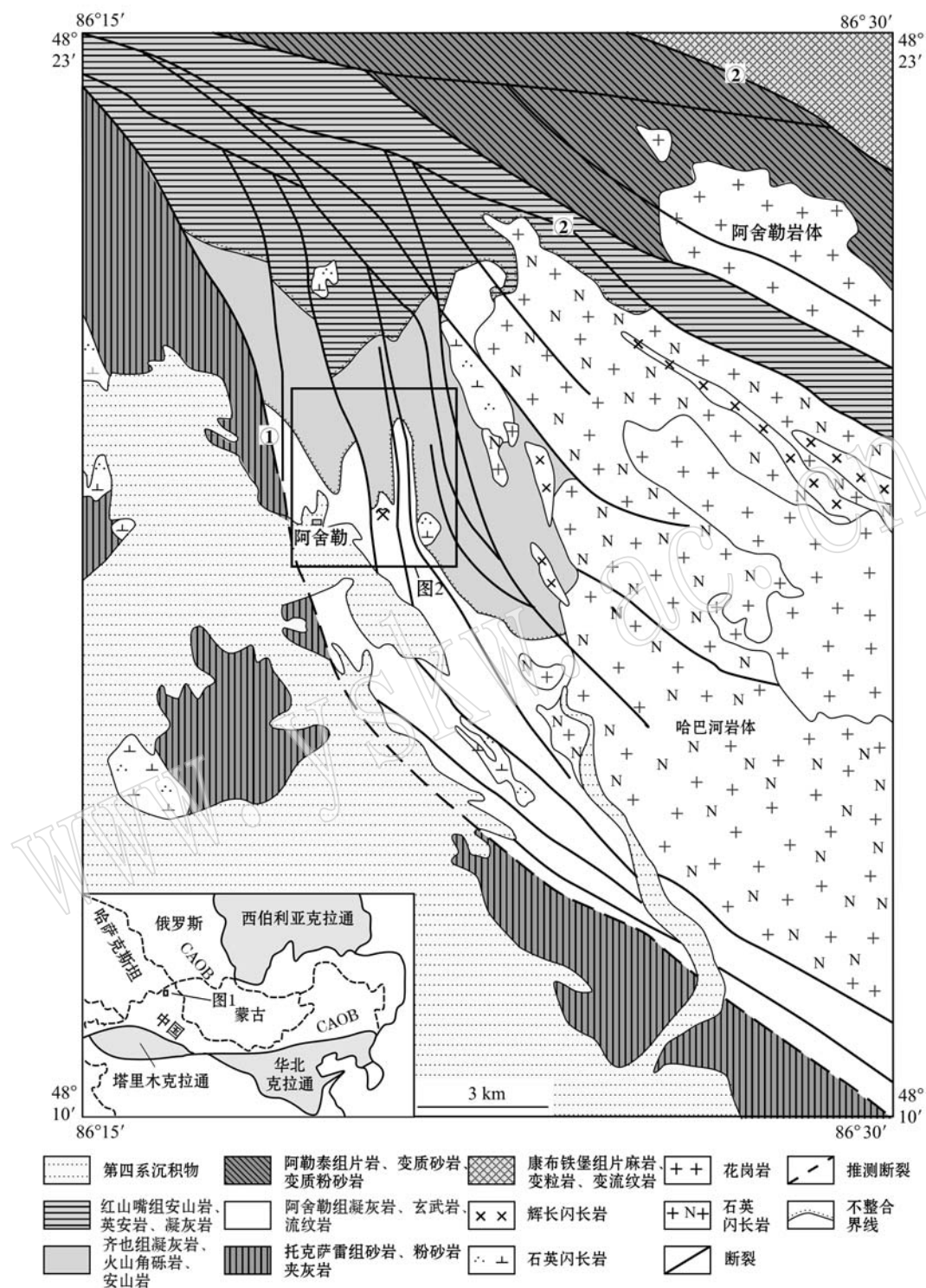


图 1 阿舍勒盆地地质略图[据新疆地质矿产勘查局第四地质大队(1989)^①修改]

Fig. 1 Regional geological sketch map of the Ashele Basin (modified after No. 4 Geological Party of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 1989^①)

① 新疆地质矿产勘查局第四地质大队. 1989. 新疆萨尔布拉克和齐叶幅 1:20 万地质图.

阿舍勒铜锌矿区主要出露阿舍勒组和齐也组(图2)。阿舍勒组分为两个岩性段:第1岩性段为滨-浅海相、远火山口相火山-沉积碎屑岩-碳酸盐岩建造,以凝灰岩为主,夹沉(含角砾)凝灰岩、灰岩及晶

屑凝灰岩;第2岩性段为一套以基性喷发占优势的细碧-角斑岩建造,下部为凝灰岩、沉凝灰岩、含角砾凝灰岩,顶部夹玄武岩、灰岩、重晶石岩;中部凝灰岩、角砾凝灰岩、沉凝灰岩,顶部夹硅质岩、重晶石

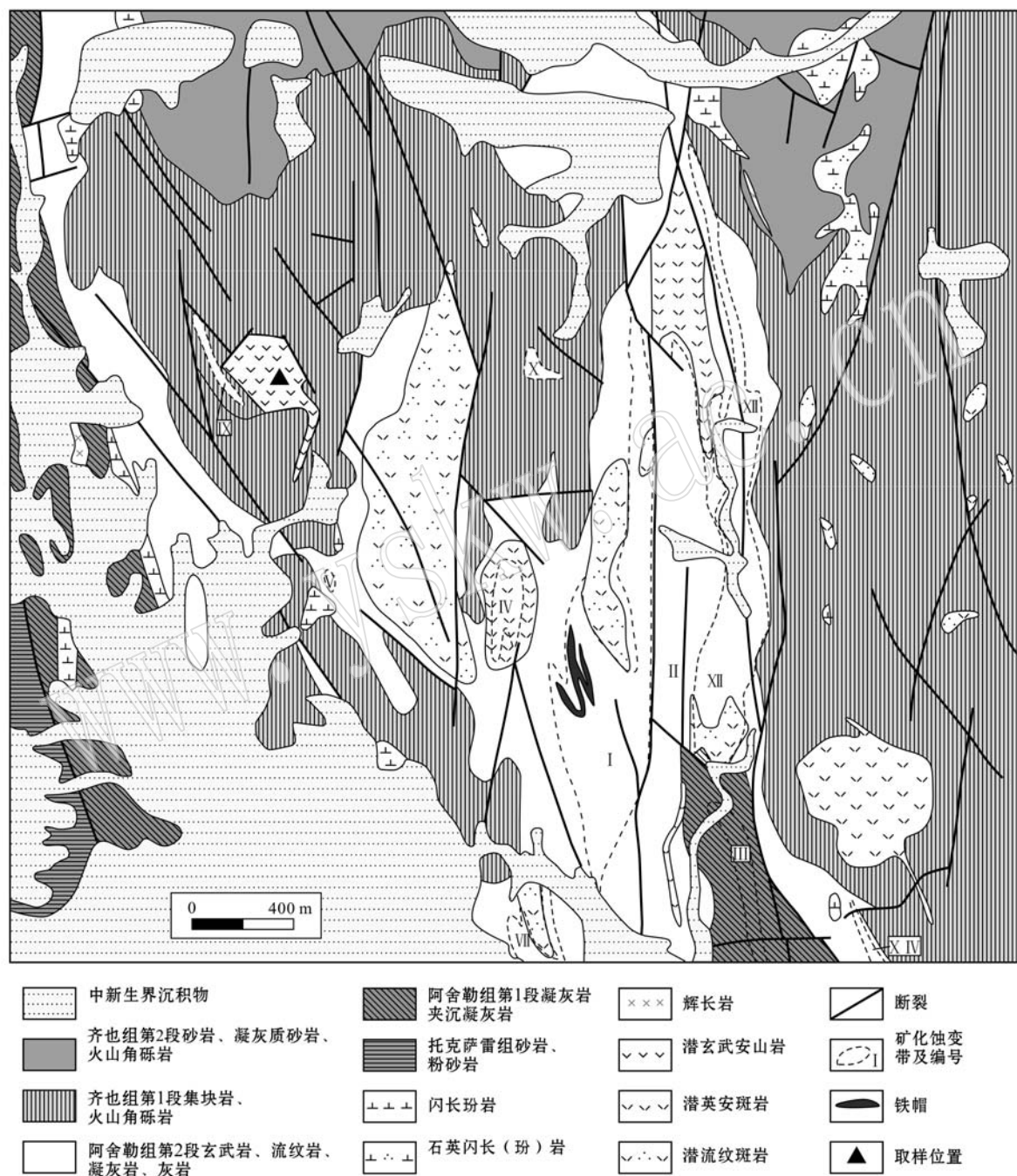


图2 阿舍勒铜锌矿区地质略图(据新疆地质矿产勘查局第四地质大队,1989^①修改)

Fig. 2 Geological sketch map of the Ashele Cu-Zn deposit (modified after No. 4 Geological Party of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 1989^①)

① 新疆地质矿产勘查局第四地质大队. 1989. 新疆萨尔布拉克和齐叶幅 1:20 万地质图.

岩、灰岩;上部玄武岩、流纹岩,夹凝灰岩、角砾凝灰岩。矿化主要产于阿舍勒组第2岩性段,是阿舍勒盆地主要的含矿层位。中上泥盆统阿勒泰组为一套海相类复理石碎屑沉积岩建造。上泥盆统齐也组呈喷发不整合覆于阿舍勒组之上,分为两个岩性段:第1岩性段为集块岩、火山角砾岩、角砾凝灰岩、集块熔岩、凝灰质砂岩、凝灰质粉砂岩,少量流纹岩、角砾凝灰岩、含铁碧玉岩;第2岩性段为砂岩、粉砂岩、凝灰质(砂)粉砂岩、(含角砾)凝灰岩、沉火山角砾岩、流纹岩,晚期发育潜火山岩。本次研究的潜玄武安山岩样品取自阿舍勒矿区北部上泥盆统齐也组第2岩性段呈中心式喷发的潜玄武安山岩。

矿区潜火山岩发育,主要有(石英)闪长岩、(石英)闪长玢岩、潜玄武安山岩、潜英安岩、潜流纹斑岩,少量辉长岩脉(柴凤梅等, 2013; Yang *et al.*, 2014)。矿区构造复杂,强烈变形和断裂构造发育,主要断裂呈近南北走向,其次是北西向、北东向、东西向。矿区受玛尔卡库里大断裂影响韧性剪切变形发育,岩石片理化强烈,发育糜棱岩、碎裂岩、石香肠、肠状构造、拉伸线理等(陈毓川等, 1996; 吴玉峰

等, 2015)。

2 岩体地质概况及岩相学

本次研究的潜玄武安山岩为晚泥盆世齐也组第2岩性段基性火山岩,位于古火山机构中。该火山口中心位于阿舍勒村北 1.2 km 处,现代地貌为正地形,平面上呈近圆形,直径约 1 km,由齐也组第1段火山岩组成。晚期潜玄武安山岩,属潜火山岩相,沿喷发主通道侵入(图 3a),其四周的集块岩、火山集块岩、火山角砾凝灰岩等层状火山岩大致呈环状展布,具中心式喷发特征(图 2)。充填于古火山管道的潜玄武安山岩呈蝌蚪状,因而称为蝌蚪岩体(陈毓川等, 1996),岩体内柱状节理发育(图 3b),说明岩体形成深度很浅。火山管道围岩是齐也组第1段下部的一套集块角砾级火山碎屑岩(图 3c),其喷发相是位于该火山口北部的安山岩、安山质角砾岩及安山质火山碎屑岩。该火山机构属于齐也旋回的古火山机构。据其凝灰质粉砂岩夹层含放射虫化石,该火山机构为深水环境喷发沉积。

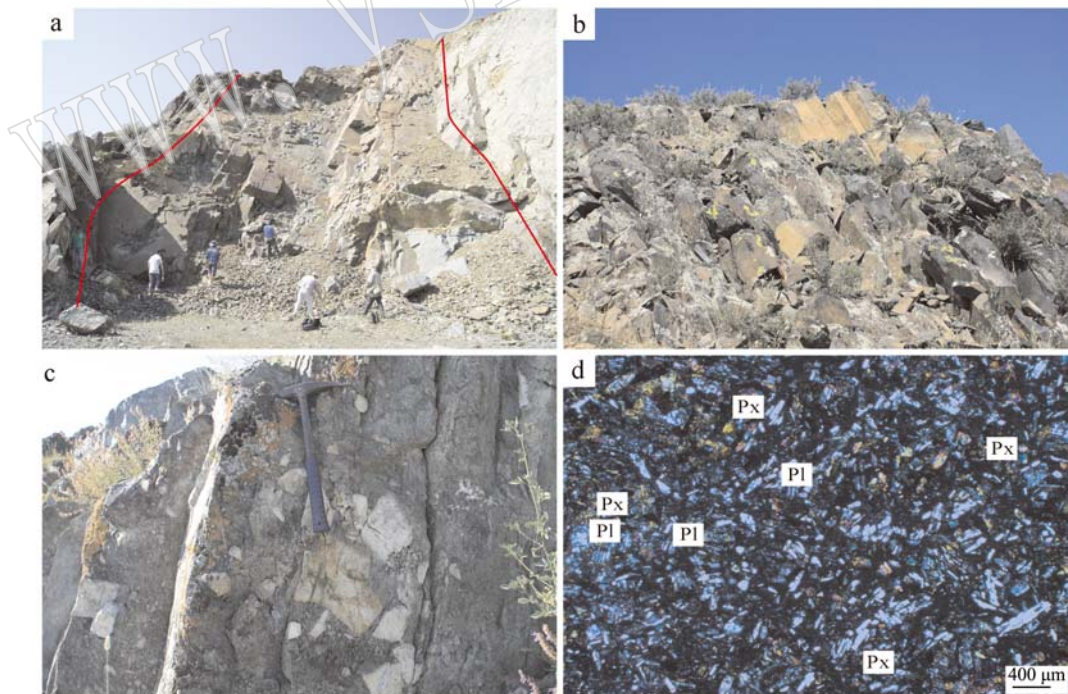


图 3 潜玄武安山岩野外及镜下照片

Fig. 3 Photographs and photomicrographs of basaltic andesite subvolcanic rocks

a—近直立产出的火山颈,岩层边界由平行于岩颈边界的层节理控制; b—潜玄武安山岩柱状节理; c—火山口近源相火山角砾岩; d—潜玄武安山岩,板状斜长石(Pl)与少量辉石(Px)组成交织结构,正交偏光
a—volcanic plug, the roughly vertical rock boundaries are controlled by inner layer joints parallel to the plug rim; b—basaltic andesite subvolcanic rocks with columnar joint; c—volcanic breccia in proximal facies; d—basaltic andesite subvolcanic rocks, which consist of plagioclase (Pl) and pyroxene (Px) in a pilotaxitic texture, crossed nicols

潜玄武安山岩手标本呈青灰色,块状构造,变余少斑结构,基质似交织结构。岩石由斑晶和基质组成。斑晶(1%~5%)由斜长石组成,半自形板状,零星分布,粒度0.3~1.3 mm,具绿帘石化、绿泥石化等,表面较脏。基质由斜长石(65%~80%)、暗色矿物假像(20%~35%)组成,粒度<0.3 mm。斜长石呈半自形板条状,平行或近平行分布构成似交织结构,具不均匀绿帘石化、黝帘石化等。暗色矿物均被绿帘石、纤闪石、绿泥石等交代呈假像,杂乱分布(图 3d)。

3 样品分析测试

本次研究采集了位于蝌蚪破火山口中的 9 件潜玄武岩山岩进行地球化学分析。其主量元素、微量元素以及稀土元素分析测试在国家地质实验测试中心完成。主量元素采用熔片 XRF 方法(国家标准 GB/T14506.28-1993 监控),在 X 荧光光谱仪 3083E 上测定,用波长色散 X 射线荧光光谱仪进行测量,用国家级标准物质制作校准曲线。稀土元素和微量元素采用 Teflon 溶样罐进行熔样,然后采用 Finnigan MAT 公司生产的双聚焦高分辨 ICP-MS 进行测定(标准 DZ/T0223-2001 监控),相对标准偏差优于 5%。

Sr-Nd 同位素测定在中国地质调查局天津地质调查中心通过热点离子质谱法测定。Rb、Sr、Sm、Nd 通过同位素分流获得,误差范围分别为 2%、0.5%~1%,0.5% 和 0.5%。所有测试样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 统一采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 以及 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行标准化处理。分析过程中 NBS-987 Sr 标准和 JND1 Nd 标准分别为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710264 \pm 4(2\sigma)$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512104 \pm 3(2\sigma)$ 。

4 分析测试结果

潜玄武安山岩主量元素分析(表 1)表明, SiO_2 含量为 51.90%~52.85%, MgO 含量为 4.44%~5.08%, Al_2O_3 含量为 14.94%~16.11%, K_2O 含量为 0.01%~0.27%, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量为 2.75%~4.48%, $\text{Mg}^\#[(\text{Mg}^\# = 100 \text{ Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}))]$ 为 44~47。 TiO_2 含量为 0.99%~1.03%, 与岛弧区火山岩的 TiO_2 含量相当(Pearce, 1983; Zhang *et al.*, 2008), 低于典型大洋中脊拉斑玄武岩 TiO_2 含量

(1.5%, Pearce, 1983)。潜玄武安山岩样品烧失量(LOI)中等($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = 2.59\% \sim 3.49\%$), 在 Wilson(1989)的 TAS 火山岩判别图解中, 样品落入中基性玄武安山岩区(图 4a), 同时落在亚碱性区域, 表明样品属于亚碱性系列岩石, 在 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图解中, 样品落入低钾拉斑系列(图 4b)。在 Harker 图解(图 5)中, Al_2O_3 、 MnO 、 TiO_2 、 FeO 、 CaO 含量具有明显的随 SiO_2 含量升高而降低的趋势, 而其他元素含量随 SiO_2 含量变化而变化的趋势不明显, 显示了岩浆结晶分异演化的特点。

潜玄武安山岩的稀土元素总量(ΣREE)为 $38.07 \times 10^{-6} \sim 41.10 \times 10^{-6}$ 。 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值较为集中, 在 0.57~0.61 之间, 轻重稀土元素分异明显; 轻稀土元素(LREE)的分馏系数 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 为 0.84~0.91, 轻重稀土元素的分馏系数 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 0.84~0.91, 重稀土元素(HREE)的分馏系数 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 为 1.00~1.14。Eu 显示正异常($\delta\text{Eu} = 1.13 \sim 1.23$), 表明原始岩浆在上升过程中没有发生斜长石的结晶分异作用, 这与潜玄武安山岩基质中斜长石的堆晶现象一致, 同时斜长石的堆晶同样引起微量元素 Sr 的富集(图 6b)。在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(图 6a)上, 所有样品具有相同的变化趋势, 均为 LREE 相对亏损、HREE 相对富集的左倾特点, 具有典型 N-MORB 稀土元素地球化学特征, 表明潜玄武安山岩来自于亏损的软流圈地幔。

潜玄武安山岩相容元素 Cr 和 Ni 含量较低(分别为 $9.18 \times 10^{-6} \sim 16.80 \times 10^{-6}$ 和 $5.50 \times 10^{-6} \sim 9.53 \times 10^{-6}$), 低于原生玄武岩浆($\text{Ni} = 300 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$, $\text{Cr} = 300 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$; Frey *et al.*, 1978; Hess, 1992), 表明潜玄武安山岩经历了显著的橄榄石、单斜辉石以及铁钛氧化物等镁铁质矿物的分离结晶。潜玄武安山岩 Nb、Ta 含量较低($\text{Nb} = 0.38 \times 10^{-6} \sim 0.44 \times 10^{-6}$), Zr/Hf 值为 27~29, 低于原始地幔(Zr/Hf 值为 36.27), 远高于大陆地壳比值(Zr/Hf 值为 11), 表明原始岩浆在上升过程中受到一定程度地壳物质的混染。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图中(图 6b), 富集大离子亲石元素(LILE)Ba 和 Sr, 高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Zr、Hf 相对亏损, 总体表现为与俯冲带相关的大陆或岛弧岩浆作用的特点(Kelemen *et al.*, 2003)。

齐也组潜玄武安山岩产于晚泥盆世齐也组火山岩中, 其形成时间晚于阿舍勒组。前人对阿舍勒组火山岩及潜火山岩做了大量年代学研究, 获得阿舍

表 1 阿舍勒铜矿区潜玄武安山岩的主量($w_B/\%$)、微量($w_B/10^{-6}$)元素组成Table 1 Major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) element data for basaltic andesite subvolcanic rocks in the Ashele Cu-Zn deposit

样品号	ASL-15	ASL-16	ASL-17	ASL-18	ASL-19	ASL-20	ASL-43	ASL-44	ASL-45
SiO ₂	51.90	52.49	52.32	51.94	52.56	51.96	52.74	51.57	52.85
TiO ₂	1.01	0.99	1.00	1.01	1.00	1.02	0.99	1.03	0.99
Al ₂ O ₃	15.90	15.47	15.78	15.80	15.49	15.65	15.43	16.11	14.94
Fe ₂ O ₃	4.90	4.99	4.67	4.76	4.61	4.27	6.51	5.35	5.26
FeO	7.98	7.49	7.90	7.65	7.76	8.28	6.07	7.76	7.22
MnO	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.17	0.19	0.19
MgO	4.72	4.44	4.51	4.59	4.64	4.84	4.60	4.68	5.08
CaO	8.34	7.62	7.45	8.80	8.31	7.29	7.77	6.11	6.71
Na ₂ O	2.62	3.36	2.82	2.70	2.65	2.74	3.07	4.45	4.22
K ₂ O	0.16	0.03	0.02	0.05	0.21	0.27	0.01	0.03	0.04
P ₂ O ₅	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
H ₂ O ⁺	2.56	2.78	3.32	2.54	2.42	2.94	3.08	2.94	2.64
CO ₂	0.17	0.34	0.17	0.17	0.17	0.43	0.17	0.26	0.26
Total	100.52	100.26	100.22	100.27	100.08	99.96	100.68	100.55	100.47
Mg [#]	44	44	44	45	45	46	45	44	47
A/CNK	0.81	0.80	0.87	0.78	0.79	0.87	0.81	0.88	0.78
A/NK	3.57	2.8	3.41	3.54	3.40	3.28	3.07	2.20	2.15
Sc	47.00	45.80	46.80	47.70	44.90	43.00	45.00	46.10	43.70
V	440.00	440.00	421.00	455.00	434.00	407.00	442.00	450.00	424.00
Cr	16.80	10.70	13.90	11.00	10.10	9.18	13.00	12.40	10.70
Co	38.40	35.00	31.30	37.40	38.00	35.20	37.90	27.60	34.50
Ni	9.53	6.95	7.28	6.74	6.49	5.50	7.36	6.95	6.57
Cu	44.50	41.50	43.70	42.00	43.10	38.70	41.40	35.60	40.90
Zn	84.20	82.80	80.40	77.50	81.30	75.60	80.40	87.60	81.10
Ga	16.50	15.80	16.00	17.50	15.50	15.20	16.80	15.70	13.30
Rb	1.26	0.21	0.57	0.35	1.55	2.16	0.15	0.39	0.47
Ba	104.00	20.70	18.10	30.90	105.00	120.00	12.40	29.70	23.60
Th	0.48	0.45	0.48	0.46	0.43	0.44	0.42	0.45	0.43
U	0.17	0.19	0.19	0.18	0.16	0.15	0.19	0.19	0.23
Nb	0.43	0.40	0.44	0.41	0.38	0.39	0.38	0.38	0.39
Ta	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
La	2.21	1.99	2.15	2.23	2.02	2.05	2.00	2.09	2.01
Ce	5.68	5.37	5.53	5.66	5.21	5.26	5.25	5.42	5.18
Pb	2.30	2.24	2.44	2.19	2.04	1.72	2.79	1.70	1.66
Pr	0.84	0.79	0.81	0.83	0.76	0.75	0.78	0.81	0.76
Sr	186.00	151.00	160.00	162.00	171.00	147.00	289.00	154.00	151.00
Nd	4.54	4.32	4.36	4.43	4.11	4.06	4.30	4.33	4.06
Zr	19.10	19.30	18.40	19.30	18.90	18.00	18.80	19.70	18.80
Hf	0.68	0.68	0.67	0.69	0.70	0.69	0.65	0.74	0.67
Sm	1.57	1.53	1.64	1.61	1.47	1.50	1.48	1.51	1.52
Eu	0.73	0.69	0.72	0.77	0.67	0.66	0.70	0.69	0.68
Gd	2.27	2.12	2.28	2.31	2.11	2.11	2.06	2.30	2.09
Tb	0.40	0.39	0.40	0.40	0.36	0.38	0.37	0.41	0.37
Dy	2.61	2.62	2.62	2.78	2.42	2.38	2.52	2.74	2.55
Y	15.60	15.20	15.50	15.90	15.00	14.40	15.30	15.70	15.10
Ho	0.61	0.55	0.58	0.60	0.56	0.58	0.53	0.61	0.56
Er	1.79	1.73	1.79	1.88	1.76	1.76	1.73	1.91	1.73
Tm	0.26	0.23	0.25	0.28	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Yb	1.76	1.66	1.70	1.76	1.67	1.68	1.71	1.67	1.64
Lu	0.23	0.25	0.26	0.26	0.24	0.25	0.24	0.28	0.26
ΣREE	41.10	39.44	40.59	41.70	38.61	38.07	39.22	40.72	38.76
LR/HR	0.61	0.59	0.60	0.59	0.58	0.60	0.59	0.57	0.58
(La/Yb) _N	0.90	0.86	0.91	0.91	0.87	0.88	0.84	0.90	0.88
(La/Sm) _N	0.91	0.84	0.85	0.89	0.89	0.88	0.87	0.89	0.85
(Gd/Yb) _N	1.07	1.06	1.11	1.09	1.05	1.04	1.00	1.14	1.05
δEu	1.18	1.17	1.14	1.22	1.16	1.13	1.23	1.13	1.17

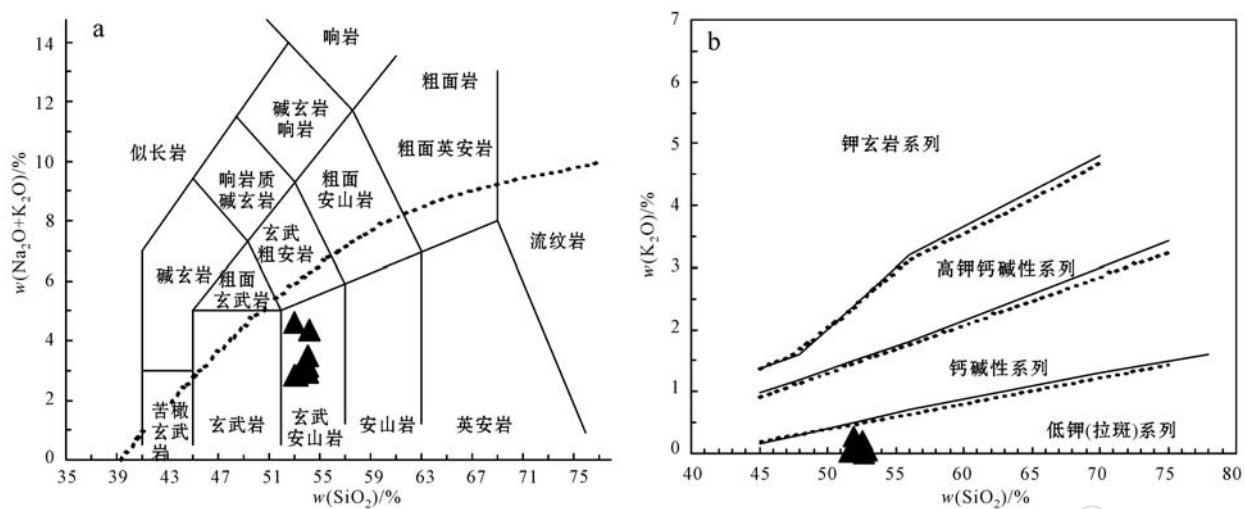


Fig. 4 Diagrams of TAS (after Le Bas *et al.*, 1986) and K_2O versus SiO_2 (after Rickwood, 1989) of basaltic andesite subvolcanic rocks

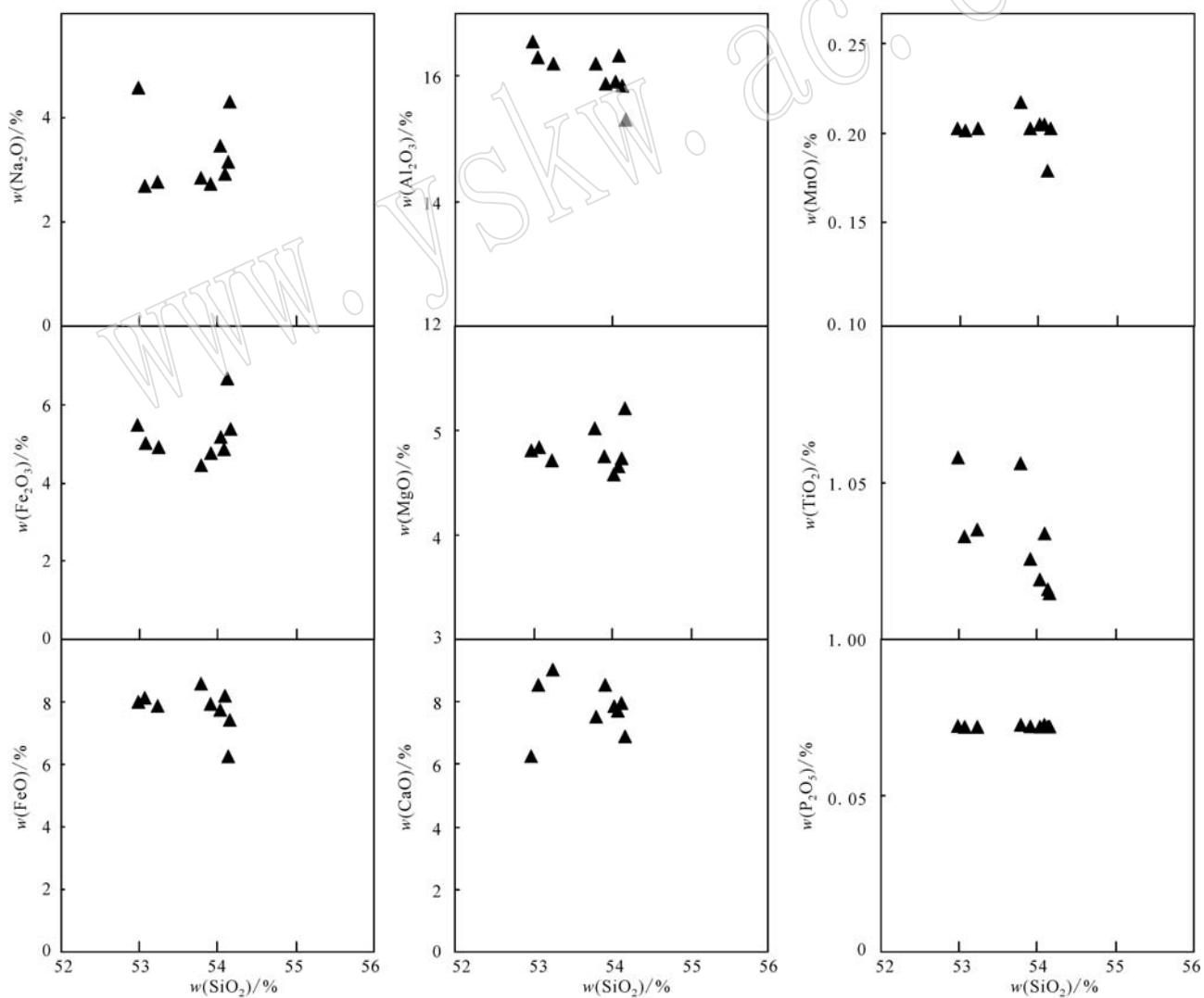


Fig. 5 Harker diagrams showing chemical variations of basaltic andesite subvolcanic rocks

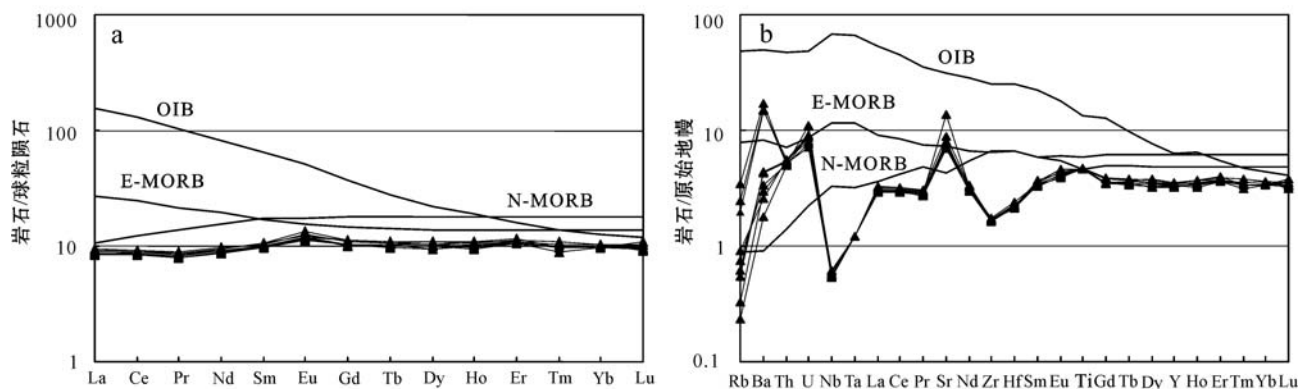


图 6 潜玄武安山岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(a, 标准化值据 Talor and McLennan, 1985)和原始地幔标准化微量元素分布图(b, 标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a, normalizing values after Talor and McLennan, 1985) and primitive mantle normalized trace element diagrams (b, normalizing values after Sun and McDonough, 1989) of basaltic andesite subvolcanic rocks

勒组火山岩系形成时代为早中泥盆世(杨富全等, 2013), 而已知阿舍勒组最晚形成流纹岩的加权平均年龄为 375 ± 3 Ma (Wan *et al.*, 2010a)。由于阿舍勒盆地齐也组研究程度较低, 其形成时代未能很好限定。潜玄武安山岩 Zr 含量较低, 本次研究未能获得理想的锆石来测得锆石年代学数据。鉴于阿舍勒最晚流纹岩年龄为 375 ± 3 Ma, 本次 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 计算所用年龄为推测年龄 $t = 375$ Ma。潜玄

武安山岩的 Sr-Nd 同位素组成(表 2)表明, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值变化范围为 $0.7044 \sim 0.7055$, 高于现代典型大洋中脊新鲜玄武岩($0.7023 \sim 0.7044$); $\epsilon\text{Nd}(t)$ 变化范围为 $+6.9 \sim +7.6$, 显示非常亏损的同位素特征。在 $\epsilon\text{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解(图 7)中, 潜玄武安山岩分布较为分散, 全部落在大洋玄武岩形成的地幔阵列(mantle array)的右侧。

表 2 阿舍勒铜锌矿区潜玄武安山岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 2 Sr-Nd isotopic compositions of the basaltic andesite subvolcanic rocks in the Ashele Cu-Zn deposit

样号	$w_B/10^{-6}$		$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$w_B/10^{-6}$		$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\epsilon\text{Nd}(t)$	t_{2DM}
	Rb	Sr					Sm	Nd						
ASL12-20	2.38	166.1	0.0415	0.704672	9	0.70445	1.51	4.20	0.2169	0.513077	16	0.51254	7.6	506
ASL12-43	0.30	271.8	0.0031	0.705523	6	0.70551	1.49	4.12	0.2188	0.513050	6	0.51254	7.0	556
ASL12-45	0.68	164.3	0.0120	0.705211	5	0.70515	1.49	4.10	0.2205	0.513086	6	0.51255	7.6	506

5 讨论

5.1 火山岩系列

确定火山岩系列对研究火山岩的构造背景非常重要(Zhang *et al.*, 2008, 2009)。齐也组潜玄武安山岩具有较低的 Nb/Y 值($0.02 \sim 0.03$), 远低于 0.7, 表明其属于亚碱性岩石(Winchester and Floyd, 1977)。在 $\text{FeO}^* - \text{FeO}^*/\text{MgO}$ 图解(图 8)中, 所有样品落入拉斑玄武岩区域, 表明齐也组潜玄武安山岩属拉斑玄武岩系列。

5.2 构造环境分析

对于新疆北部阿尔泰晚古生代构造环境, 目前具有几种不同认识: 大陆边缘裂谷(韩宝福等, 1991; 陈毓川等, 1996), 弧后盆地-岛弧系统(牛贺才等, 1999; Windley *et al.*, 2002; Xu *et al.*, 2003;), 活动大陆边缘(王涛等, 2005; Yuan *et al.*, 2007), 洋脊俯冲(Windley *et al.*, 2007; 沈晓明等, 2010; Cai *et al.*, 2011a)。阿尔泰广泛发育的高温变质作用、多金属成矿作用、埃达克质岩浆作用和大量花岗岩质体表明, 阿尔泰南缘在晚古生代处于活动大陆边缘并伴有洋脊俯冲(Jahn *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2006;

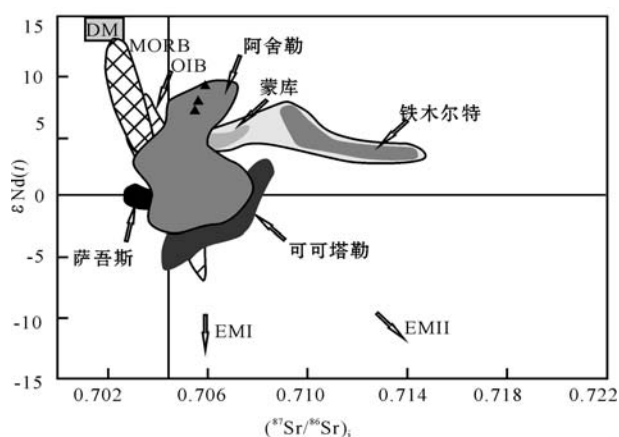


图 7 潜玄武安山岩 $\epsilon\text{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$

同位素图解(据刘伟等, 2013 及其相关参考文献)

Fig. 7 $\epsilon\text{Nd}(t)$ versus $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram of the basaltic andesitic subvolcanic rocks (after Liu Wei *et al.*, 2013 and related references)

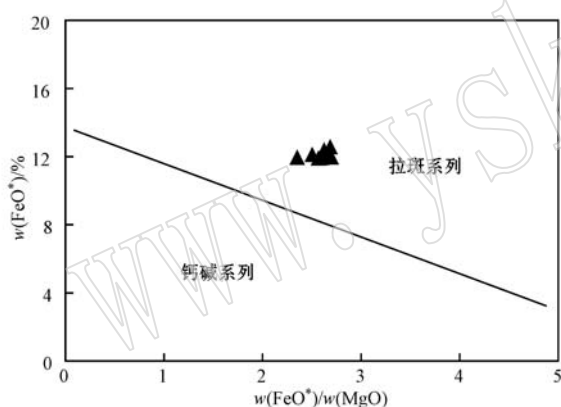


图 8 潜玄武安山岩 $\text{FeO}^* - \text{FeO}^*/\text{MgO}$ 图解
(据 Miyashiro, 1975)

Fig. 8 FeO^* versus FeO^*/MgO diagram of the basaltic andesitic subvolcanic rocks (after Miyashiro, 1975)

Yuan *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2009; Cai *et al.*, 2011a)。兼有岛弧玄武岩 (IAB) 和洋中脊玄武岩 (MORB) 特征的玄武质岩石可形成于弧后盆地 (Gribble *et al.*, 1998; Encarnacion *et al.*, 1999; Xu *et al.*, 2003) 或产生于受俯冲洋脊影响的岛弧 (或弧前) 环境 (Karsten *et al.*, 1996; Sission *et al.*, 2003; Windley *et al.*, 2007)。库尔提蛇绿岩具有岛弧火山岩和似洋中脊玄武岩的特点, 被认为形成于弧后盆地系统 (Xu *et al.*, 2003)。阿舍勒盆地位于库尔提蛇绿岩弧后盆地的西南侧, 地理或构造位置更靠近板块缝合线, 与岛弧 (或弧前) 位置相吻合。

牛贺才等 (1999) 在阿舍勒组火山岩中识别出类玻镁安山岩、拉斑玄武岩及流纹英安岩, 具有前弧地区典型的岩石组合。岩石地球化学特征研究表明拉斑玄武岩形成于岛弧环境。富蕴西南沙尔布拉克玻安岩的研究结果 (张海祥等, 2003) 也一同显示, 阿尔泰山南缘在中泥盆世可能为靠近古亚洲洋海沟的前弧环境, 为洋脊俯冲在前弧环境下产出的特殊岩石类型 (沈晓明等, 2010)。

齐也组火山岩以玄武岩、玄武安山岩及英安岩为主, 分布相对局限, 古火山机构发育, 具有中心式喷发的穹状火山或层状火山, 类似于岛弧火山活动的特点。在火山岩构造判别图 Nb - Zr - Y (图 9a) 中, 潜玄武安山岩均落入 MORB 型玄武岩区域内, 与其稀土元素地球化学性质完全一致。在 $\text{TiO}_2 - \text{MnO} - \text{P}_2\text{O}_5$ 图解 (图 9b) 中, 潜玄武安山岩落入岛弧拉斑玄武岩区域, 在 Ti - Zr - Y 判别图解 (图 9c) 中, 由于具有较低的 Zr 含量, 样品落在岛弧拉斑玄武岩区域以外靠近岛弧拉斑玄武岩区域。在 Th/Yb - Ta/Yb 图解 (图 9d) 中, 样品落入大洋岛弧范围内, 在 V - Ti 图解 (图 9e) 中, 样品落入岛弧拉斑玄武岩区域。潜玄武安山岩样品具有消减带信息, 在 Zr/Y - Zr 图解 (图 9f) 中, 样品落入岛弧玄武岩区域。依据上述特征推断阿舍勒盆地潜玄武安山岩构造背景为洋内岛弧背景。

5.3 源区特征

蝌蚪岩体为低钾拉斑潜玄武安山岩, 具有介于岛弧火山岩和洋中脊拉斑玄武岩的 TiO_2 含量。潜玄武安山岩稀土元素总量较低, 显示轻稀土元素亏损的分布模式, 具有典型 N-MORB 稀土元素地球化学特征, 表明其来自亏损的软流圈地幔。源于软流圈地幔的岩浆以高的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值 (约为 +8)、低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值 (0.703) 和高的 Zr/Ba 值 (大于 0.2) 为特征, 而源于岩石圈地幔的岩浆具有低的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值、高 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 Zr/Ba 值 (Ormerod, 1988; DePaolo and Daley, 2000), 潜玄武安山岩 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值为 +6.9 ~ +7.6, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 介于 0.704 4 ~ 0.705 5 之间, Zr/Ba 值在 0.18 ~ 1.52 之间 (平均 0.67), 这些特征反映了其源区为软流圈地幔。

在微量元素配分曲线上, 显示了 Rb、Ba 的低度富集和 Nb、Ta、Zr、Hf 亏损, 尤其是 Nb 更明显, 与典型大洋中脊 MORB 型玄武岩明显不同。样品 La/Nb 值为 4.9 ~ 5.5, 远小于典型陆壳岩石 ($\text{La}/\text{Nb} > 12$), 表明陆壳物质对潜玄武安山岩同化混染作用不明显。

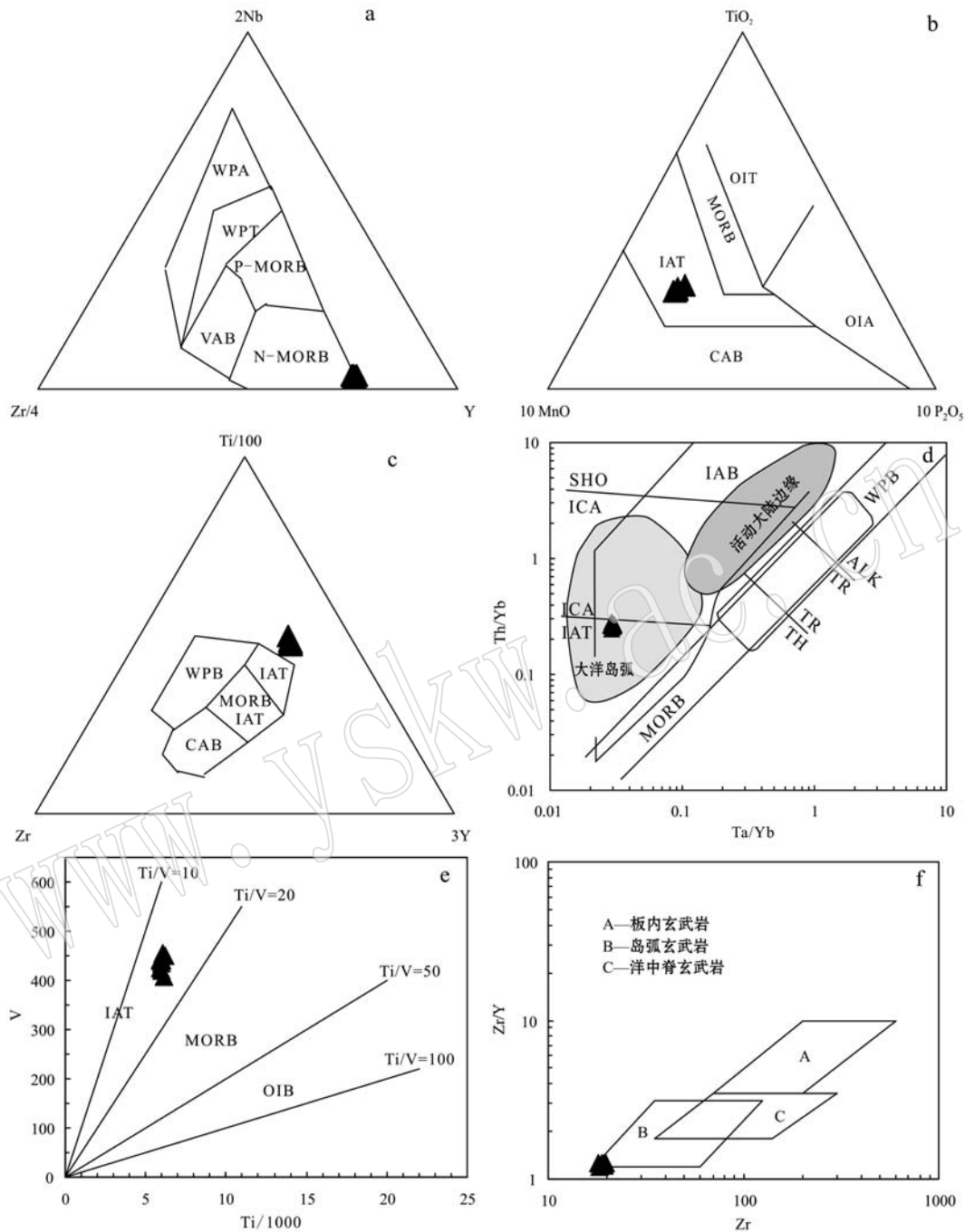


图 9 潜玄武安山岩构造判别图

Fig. 9 Tectonic discrimination diagrams of basaltic andesite subvolcanic rocks

a—Nb—Zr—Y 图解(底图据 Meschede, 1986); b—TiO₂—MnO—P₂O₅ 图解(底图据 Mullen, 1983); c—Ti—Zr—Y 图解(底图据 Peace and Cann, 1973); d—Th/Yb—Ta/Yb 图解(底图据 Pearce, 1983); e—V—Ti 图解(底图据 Shervais, 1982); f—Zr/Y—Zr 图解(底图据 Pearce and Norry, 1979); WPA—板内碱性玄武岩; WPT—板内拉斑玄武岩; VAB—火山弧玄武岩; (N-)MORB—洋中脊玄武岩; P-MORB—富集型洋中脊玄武岩; OIT—洋岛拉斑玄武岩; OIA—洋岛碱性玄武岩; IAT—岛弧拉斑玄武岩; CAB—钙碱性玄武岩; WPB—板内玄武岩; SHO—钾玄岩; IAB—岛弧玄武岩; ICA—岛弧钙碱性玄武岩; TH—拉斑玄武岩; TR—过渡性玄武岩; ALK—碱性玄武岩; OIB—洋岛玄武岩

a—Nb—Zr—Y diagram (after Meschede, 1986); b—TiO₂—MnO—P₂O₅ diagram (after Mullen, 1983); c—Ti—Zr—Y diagram (after Peace and Cann, 1973); d—Th/Yb—Ta/Yb diagram (after Pearce, 1983); e—V—Ti diagram (after Shervais, 1982); f—Zr/Y—Zr diagram (after Pearce and Norry, 1979); WPA—within plate alkaline; WPT—within plate tholeiite; VAB—volcanic arc basalt; (N-)MORB—middle ocean ridge basalt; P-MORB—plume MORB; OIT—ocean island tholeiite; OIA—ocean island alkaline basalt; IAT—island arc tholeiite; CAB—calc-alkaline basalt; WPB—within plate basalt; SHO—shoshonite; IAB—island arc basalt; ICA— island arc calc-alkaline basalt; TH—tholeiite; TR—transitional basalt; ALK—alkali basalt; OIB—ocean island basalt

WPB—within plate basalt; SHO—shoshonite; IAB— island arc basalt; ICA— island arc calc-alkaline basalt; TH—tholeiite; TR—transitional basalt; ALK—alkali basalt; OIB—ocean island basalt

然而原始地幔、MORB 以及 OIB 的 La/Nb 值接近 1, 说明可能是洋壳或者俯冲流体加入的结果。岛弧火山岩岩浆源区主要是受俯冲洋壳或沉积物析出流体以及俯冲板片熔融形成的熔体交代的地幔楔(Pearce and Peate, 1995; Scaillet and Prouteau, 2001)。在俯冲环境中, 地幔楔部分熔融过程中, 由于金红石、榍石等含钛矿物残留在地幔楔中, 是产生的岩浆亏损 Nb、Ta 和 Ti, 与其他不相容元素发生分离。在地幔楔中 Zr、Hf 较 Sm、Nd 在俯冲板片流体中相对板片熔体具有更低的溶解度, 因而可用 $(\text{Ta}/\text{La})_N$ 和 $(\text{Hf}/\text{Sm})_N$ 来区分岛弧岩浆来自流体交代地幔还是

熔体交代地幔(Fleche *et al.*, 1998)。在 $(\text{Hf}/\text{Sm})_N - (\text{Ta}/\text{La})_N$ 图解(图 10a)中, 样品落在俯冲流体交代的地幔楔范围内, 指示岩浆来自俯冲流体交代的地幔的部分熔融。俯冲环境中, Ba 和 U 富集在俯冲流体中, 而 Th 主要来自沉积物(Hawkesworth *et al.*, 1997)。在 $\text{Ba}/\text{Zr} - \text{Th}/\text{Zr}$ 图解(图 10b)中, 潜玄武安山岩样品投影区域与俯冲流体参与形成的岛弧岩浆趋势一致, 表明地幔源区主要遭受俯冲流体的交代作用, 沉积物参与较少, 为洋内岛弧。

在岛弧区, 洋壳和沉积物向岩石圈深部再循环过程中, 高场强元素倾向留在难熔矿物相中, 或者在

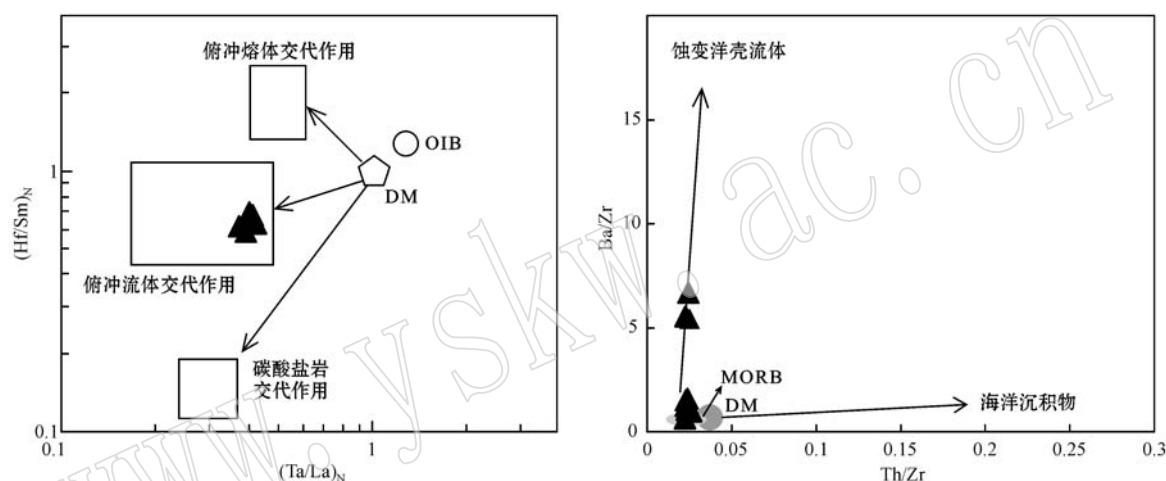


图 10 $(\text{Hf}/\text{Sm})_N - (\text{Ta}/\text{La})_N$ 相关图(a)(据 Fleche *et al.*, 1998)和 $\text{Ba}/\text{Zr} - \text{Th}/\text{Zr}$ 相关图(b)(据 Ishizuka *et al.*, 2003)

Fig. 10 Diagrams of $(\text{Hf}/\text{Sm})_N - (\text{Ta}/\text{La})_N$ (a) (after Fleche *et al.*, 1998) and $\text{Ba}/\text{Zr} - \text{Th}/\text{Zr}$ (b) (after Ishizuka *et al.*, 2003)

流体与上覆地幔楔相互作用过程中高场强元素具有较其他不相容元素高的固/液分配系数, 从而造成高场强元素的亏损。岛弧环境下的软流圈地幔是萃取出 N-MORB 之后留下的方辉橄橄榄岩, 比 N-MORB 源区的地幔具有更加亏损的 REE, 更加难容。来自俯冲带流体的加入, 降低其固相线温度从而发生部分熔融。由于地幔源区强烈亏损, 同时由于消减带带入流体富集大离子亲石元素, 从而形成富集部分大离子亲石元素, 亏损轻稀土及 Nb、Ta 元素。

综上所述, 阿尔泰南缘在晚古生代处于活动大陆边缘, 古亚洲洋向北向西伯利亚板块俯冲, 形成一套与俯冲作用相关的岛弧火山岩以及完整的前弧和弧后盆地系统, 阿舍勒盆地处于岛弧(或弧前)背景。

6 结论

(1) 阿舍勒蝌蚪岩体潜玄武安山岩具有中等 SiO_2 (51.90% ~ 52.85%)、 MgO (4.44% ~ 5.08%)、 Al_2O_3 (14.94% ~ 16.11%)、 TiO_2 (0.99% ~ 1.03%) 含量, 低的 K_2O (0.01% ~ 0.27%) 含量。岩石属于低钾拉斑玄武岩系列。

(2) 岩石兼有洋中脊玄武岩(MORB)和岛弧拉斑玄武岩(IAT)的特征, 具有低的稀土元素总量 ($\Sigma\text{REE} = 38.07 \times 10^{-6} \sim 41.70 \times 10^{-6}$), 亏损轻稀土元素 ($\text{LREE}/\text{HREE} = 0.57 \sim 0.61$) 以及 Nb、Ta、Zr 和 Hf, 具有明显的 Eu 正异常 ($\delta\text{Eu} = 1.13 \sim 1.23$)。岩石形成于岛弧环境。相对高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (+6.9 ~ +7.6) 表明其

原始岩浆来源于俯冲流体交代地幔楔的部分熔融, 没有明显深海沉积物加入。

(3) 结合阿尔泰山带南缘的区域地质资料及阿舍勒盆地潜玄武安山岩的地球化学特征, 阿尔泰山南缘在晚古生代处于活动大陆边缘, 阿舍勒盆地处于岛弧(或弧前)背景。

References

- Cai Keda, Sun Min, Yuan Chao, *et al.* 2011a. Geochronology, petrogenesis and tectonic significance of peraluminous granites from the Chinese Altai, NW China[J]. *Lithos*, 127: 261~281.
- Cai Keda, Sun Min, Yuan Chao, *et al.* 2011b. Prolonged magmatism, juvenile nature and tectonic evolution of the Chinese Altai, NW China: Evidence from zircon U-Pb and Hf isotopic study of Paleozoic granitoids[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42: 949~968.
- Chai Fengmei, Mao Jinwen, Dong Lianhui, *et al.* 2009. Geochronology of metarhyolites from the Kangbutiebao Formation in the Kelang basin, Altay Mountains, Xinjiang: Implications for the tectonic evolution and metallogeny[J]. *Gondwana Research*, 16: 189~200.
- Chai Fengmei, Ouyang Liujin, Dong Lianhui, *et al.* 2013. Geochronology and genesis of the tonalite from the Ashele Cu-Zn deposit at the Southern Margin of Altay, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(1): 41~52 (in Chinese with English abstract).
- Chai Fengmei, Yang Fuquan, Liu Feng, *et al.* 2014. The Abagong apatite-rich magnetite deposit in the Chinese Altay Orogenic Belt: A Kiruna-type iron deposit[J]. *Ore Geology Reviews*, 57: 482~497.
- Chen B and Jahn B M. 2002. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of NW China and their tectonic implications[J]. *Geol. Mag.*, 139: 1~13.
- Chen Yuchuan, Ye Qingtong, Feng Jing, *et al.* 1996. Ore-forming Conditions and Metallogenic Prognosis of the Ashele Copper-zinc Metallogenic Belt, Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~330 (in Chinese with English abstract).
- DePaolo D J and Daley E E. 2000. Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithospheric thinning during continental extension[J]. *Chemical Geology*, 169: 157~185.
- Encarnacion J, Mukasa S B and Evans C A. 1999. Subduction components and generation of arc-like melts in the Zambales ophiolite, Philippines: Pb, Sr and Nd isotopic constrains[J]. *Chemical Geology*, 156: 343~357.
- Fleche M R, Camire G and Jenner G A. 1998. Geochemistry of post-Acadian, Carboniferous continental intraplate basalts from the Maritimes Basin, Magdalen Islands, Quebec, Canada[J]. *Chemical Geology*, 148(3~4): 115~136.
- Frey F A, Green D H and Roy R D. 1978. Integrated models of basalt petrogenesis: a study of quartz tholeiites to olivine melilitites from south eastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data[J]. *Journal of Petrology*, 19: 463~513.
- Gao Zhenquan, Fang Weixuan, Hu Ruizhong, *et al.* 2010. Tectonic setting and geochemical characteristics of dacite andesite-basalt volcanic rocks in Ashele copper deposit, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 29(2): 218~229 (in Chinese with English abstract).
- Gribble R F, Stern R J, Newman S, *et al.* 1998. Chemical and isotopic composition of lavas from the Northern Mariana Trough: Implications for magmatogenesis in back-arc-basins[J]. *Journal of Petrology*, 39: 125~154.
- Han Baofu and He Guoqi. 1991. Geotectonic setting of Devonian volcanic rocks belt in southern margin of the Altay Mountains, China [J]. *Xinjiang Geoscience*, 3: 89~100 (in Chinese).
- Hawkesworth C, Turner S, Peate D, *et al.* 1997. Elemental U and Th variations in island arc rocks: implications for U-series isotopes[J]. *Chemical Geology*, 139: 207~221.
- He Guoqi, Li Maosong, Liu Dequan, *et al.* 1994. Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang, China[M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 1~437 (in Chinese).
- He Yulin, Sun Min, Cai Keda, *et al.* 2015. Petrogenesis of the Devonian high-Mg rock association and its tectonic implication for the Chinese Altai orogenic belt, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.02.014>
- Hess P C. 1992. Phase equilibria constraints on the origin of ocean floor basalt[A]. Morgan J P, Blackman D K and Sinton J M. *Mantle Flow and Melt Generation at Mid-ocean Ridges*[C]. *Geophysical Monograph* 71, American Geophysical Union, 67~102.
- Ishizuka O, Taylor R N, Milton J A, *et al.* 2003. Fluid-mantle interaction in an intra-oceanic arc: constraints from high-precision Pb isotopes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 211(3~4): 221~236.
- Jahn B M, Wu Fuyuan and Chen Bin. 2000. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic[J]. *Episodes*, 23: 82~92.
- Karsten J L, Klein E M and Sherman S B. 1996. Subduction zone geochemical characteristics in ocean ridge basalts from the southern Chile Ridge: Implications of modern ridge subduction systems for the Archean[J]. *Lithos*, 37: 143~161.
- Kelemen P B, Hanghøj K and Greene A R. 2003. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with emphasis on

- primitive andesite and lower crust[A]. Rudnick L. Treatise on Geochemistry, 3, The Crust[C]. Oxford: Elsevier, 593~659.
- Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, *et al.* 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. *Journal of Petrology*, 27(3): 745~750.
- Liu Wei and Liu XiuJin. 2013. Source region differences of volcanic host rocks and ore materials between eastern and western Altay Mountains during the Early-middle Devonian period, Xinjiang[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 34: 413~424 (in Chinese with English abstract).
- Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. *Chemical Geology*, 56(3): 207~218.
- Miyashiro A. 1975. Classification, characteristics and origin of ophiolites[J]. *The Journal of Geology*, 83: 249~281.
- Mullen E D. 1983. MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 62(1): 53~62.
- Niu Hecai, Xu Jifeng, Yu Xueyuan, *et al.* 1999. Discovery of rich-Mg volcanic rock series and its geological implication[J]. *Chinese Science Bulltine*, 44: 1 002~1 004 (in Chinese with English abstract).
- Niu Hecai, Yu Xueyuan, Xu Jifeng, *et al.* 2006. Late Paleozoic Volcanism and Associated Metallogenesis in the Altay Area, Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~184 (in Chinese with English abstract).
- Ormerod D S, Hawkesworth C J, Rogers N W, *et al.* 1988. Tectonic and magmatic transition in the Western Great Basin[J]. *Nature*, 333: 349~353.
- Pearce J A. 1983. Role of the subcontinental lithosphere in magma genesis at active continental margins[A]. Hawkesworth C J and Norry M J. *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*[C]. Nantwich Shiva, 230~249.
- Pearce J A and Cann J R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290~300.
- Pearce J A and Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69(1): 33~47.
- Pearce J A and Peate D W. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 251~286.
- Pirajno F, Seltnann R and Yang Y. 2011. A review of mineral systems and associated tectonic settings of northern Xinjiang, NW China[J]. *Geoscience Frontiers*, 2: 157~185.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 22(4): 247~263.
- Scaillet B and Prouteau G. 2001. Oceanic slab melting and mantle metasomatism[J]. *Science Progress*, 84(4): 335~354.
- Sengor A M C, Natalin B A and Burtman V S. 1993. Evolution of the Altai tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 364(22): 299~307.
- Shen Xiaoming, Zhang Haixiang and Ma Lin. 2010. Ridge subduction and possible evidences in Chinese Altay, Xinjiang[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 34: 181~195 (in Chinese with English abstract).
- Shervais J W. 1982. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 59: 101~118.
- Sisson V B, Pavlis T L, Roeske S M, *et al.* 2003. Introduction: An overview of ridge-trench interactions in modern and ancient settings[A]. Sisson V B, Roeske S M and Pavlis T L. *Geology of a Transpressional Orogen Developed During Ridge-Trench Interaction along the North Pacific Margin*[C]. Geological Society of America, *Special papers*, 371: 1~18.
- Song Guoxue, Qin Kezhang, Liu Tiebing, *et al.* 2010. The U-Pb ages, Hf isotope and REE patterns of older zircons from Devonian volcanic rocks in Ashele basin on the southern margin of Altai orogen and its geological significance[J]. *Acta Petrol. Sinica*, 26(10): 2 946~2 958 (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[J]. *Geological Society Special Publication*, 42: 313~345.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Oxford: Blackwell.
- Tong Ying, Wang Tao, Hong Dawei, *et al.* 2007. Ages and origin of the early Devonian granites from the north part of Chinese Altai Mountains and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1 933~1 944 (in Chinese with English abstract).
- Wan Bo, Zhang Lianchang and Xiang Peng. 2010a. The Ashele VMS-type Cu-Zn Deposit in Xinjiang, NW China Formed in a Rifted Arc Setting[J]. *Resource Geology*, 60: 150~164.
- Wan Bo, Zhang Lianchang, Xiao Wenjiao, *et al.* 2010b. Geological and geochemical characteristics and ore genesis of the Keketale VMS Pb-Zn deposit, Southern Altai Metallogenic Belt, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 37: 114~126.
- Wang Denghong, Chen Yuchuan and Mao Jinwen. 1998. The Ashele deposit: a recently discovered volcanogenic massive sulfide Cu-Zn deposit in Xinjiang, China[J]. *Resource Geology*, 48(1): 31~42.

- Wang Tao, Hong Dawei, Jahn B M, *et al.* 2006. Timing, petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen[J]. *Journal of Geology*, 114: 735~751.
- Wang Tao, Hong Dawei, Tong Ying, *et al.* 2005. Zircon U-Pb SHRIMP age and origin of post-orogenic Lamazhao granitic pluton from Altai orogen: its implications for continental growth[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 640~650(in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Jahn B M, Kovach V P, *et al.* 2009. Nd-Sr isotopic mapping of the Chinese Altai and implications for continental growth in the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 110: 359~372.
- Wang Yujing, Yuan Chao, Long Xiaoping, *et al.* 2011. Geochemistry, zircon U-Pb ages and Hf isotopes of the Paleozoic volcanic rocks in the northwestern Chinese Altai: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42: 969~985.
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*[M]. London: Unwin Hyman Press, 295~323.
- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geological discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 20: 325~343.
- Windley B F, Alexeev D, Xiao Wenjiao, *et al.* 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society of London*, 164: 31~47.
- Windley B F, Kröner A, Guo J, *et al.* 2002. Neoproterozoic to Palaeozoic geology of the Altai orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution[J]. *J. Geology*, 110: 719~739.
- Wu Yufeng, Yang Fuquan, Liu Feng, *et al.* 2015. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of sericite from the brittle ductile shear zone in the Ashele Cu-Zn ore district, Xinjiang[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(1): 121~126(in Chinese with English abstract).
- Xiao Wenjiao, Huang B C, Han Chunming, *et al.* 2010. A review of the western part of the Altaids: A key to understanding the architecture of accretionary orogens[J]. *Gondwana Research*, 18: 253~273.
- Xiao Wenjiao, Kröner A and Windley B F. 2009. Geodynamic evolution of Central Asia in the Paleozoic and Mesozoic[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1185~1188.
- Xu Jifeng, Castillo P R, Chen Fanrong, *et al.* 2003. Geochemistry of late Paleozoic mafic igneous rocks from the Kuerti area, Xinjiang, northwest China: Implications for back arc mantle evolution[J]. *Chemical Geology*, 193(1~2): 137~154.
- Xu Lingang, Mao Jingwen, Yang Fuquan, *et al.* 2010. Geology, geochemistry and age constraints on the Mengku skarn iron deposit in Xinjiang Altai, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39: 423~440.
- Yang Fuquan, Liu Feng, Li Qiang, *et al.* 2014. In situ LA-MC-ICP-MS U-Pb geochronology of igneous rocks in the Ashele Basin, Altai orogenic belt, northwest China: Constraints on the timing of polymetallic copper mineralization[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 477~496.
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Liu Feng, *et al.* 2013. A review of the geological characteristics and mineralization history of iron deposits in the Altai orogenic belt of the Xinjiang, Northwest China[J]. *Ore Geology Reviews*, 54: 1~16.
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Zheng Jianmin, *et al.* 2006. Geology and metallogenic model of the Altai large metallogenic belt in Kazakhstan [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 963~983(in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan, Qin Jihua, Liu Feng, *et al.* 2013. Ar-Ar dating of the ductile shear zones in the Yulckenhalasu Cu-(Mo) ore deposit[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(1): 1~10(in Chinese with English abstract).
- Yuan Chao, Sun Min, Xiao Wenjiao, *et al.* 2007. Accretionary orogenesis of the Chinese Altai: Insights from Paleozoic granitoids[J]. *Chemical Geology*, 242: 22~39.
- Zhang Haixiang, Niu Hecai, Yu Xueyuan, *et al.* 2003. geochemical characteristic of the Shaerbulake boninites and their tectonic significance, Fuyun County, northern Xinjiang, China[J]. *Geochemica*, 32(2): 155~160(in Chinese with English abstract).
- Zhang Li, Zheng Yi, Chen Yanjing, *et al.* 2012. Ore geology and fluid inclusion geochemistry of the Tiemurt Pb-Zn-Cu deposit, Altai, Xinjiang, China: A case study of orogenic-type Pb-Zn systems[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 69~79.
- Zhang Zhaochong, Mao Jingwen, Cai Jinhong, *et al.* 2008. Geochemistry of picrites and associated lavas of a Devonian island arc in the Northern Junggar terrane, Xinjiang (NW China): implications for petrogenesis, arc mantle sources and tectonic setting[J]. *Lithos*, 105(3~4): 379~395.
- Zhang Zhaochong, Zhou Gang, Kusky T M, *et al.* 2009. Late Paleozoic volcanic record of the Northern Junggar Terrane, Xinjiang, northwestern China: Major and trace element characteristics, Sr-Nd isotopic systematics and implications for tectonic evolution[J]. *Gondwana Research*, 16(2): 201~215.

附中文参考文献

柴凤梅, 欧阳刘进, 董连慧, 等. 2013. 新疆阿舍勒铜锌矿区英云闪

- 长岩年代学及地球化学[J]. 岩石矿物学杂志, 32(1): 41~52.
- 陈毓川, 叶庆同, 冯 京, 等. 1996. 阿舍勒铜锌矿带成矿条件和成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 1~145.
- 高珍权, 方维萱, 胡瑞忠, 等. 2010. 新疆阿舍勒铜矿英安-玄武-安山质火山岩的地球化学特征与构造背景[J]. 矿床地质, 29(2): 218~229.
- 韩宝福, 何国琦. 1991. 阿尔泰山南缘泥盆纪火山岩带的大地构造性质[J]. 新疆地质科学, 3: 89~100.
- 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, 1~437.
- 刘 伟, 刘秀金. 2013. 新疆阿尔泰山南缘早-中泥盆世东西部火山岩源区及矿床物质来源差异[J]. 地球学报, 34(4): 413~424.
- 牛贺才, 许继峰, 于学元, 等. 1999. 新疆阿尔泰山富镁火山岩系的发现及地质意义[J]. 科学通报, 09(25): 108~110.
- 牛贺才, 于学元, 许继峰, 等. 2006. 中国新疆阿尔泰山晚古生代火山作用及成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1~184.
- 沈晓明, 张海祥, 马 林. 2010. 洋脊俯冲及其在新疆阿尔泰山地区存在的可能证据[J]. 大地构造与成矿, 34(2): 181~195.
- 宋国学, 秦克章, 刘铁兵, 等. 2010. 阿尔泰山南缘阿舍勒盆地泥盆纪火山岩中古老锆石的 U-Pb 年龄、Hf 同位素和稀土元素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 26(10): 2946~2958.
- 童 英, 王 涛, 洪大卫, 等. 2007. 中国阿尔泰山北部山区早泥盆世花岗岩的年龄、成因及构造意义[J]. 岩石学报, 23(8): 1933~1944.
- 王 涛, 洪大卫, 童 英, 等. 2005. 中国阿尔泰山带后造山喇嘛昭花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄、成因及陆壳垂向生长意义[J]. 岩石学报, 21(3): 640~650.
- 吴玉峰, 杨富全, 刘 峰, 等. 2015. 新疆阿舍勒铜锌矿区脆韧性剪切带中绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学及其地质意义[J]. 地球学报, 36(1): 121~126.
- 杨富全, 毛景文, 郑建民, 等. 2006. 哈萨克斯坦阿尔泰山巨型成矿带的地质特征和成矿模型[J]. 地质学报, 80(7): 963~983.
- 杨富全, 秦纪华, 刘 峰, 等. 2013. 新疆准噶尔北缘玉勒肯哈腊苏铜(钼)矿区韧性剪切变形时代——来自白云母和黑云母 Ar-Ar 年龄的约束[J]. 大地构造与成矿学, 37(1): 1~10.
- 张海祥, 牛贺才, 于学元, 等. 2003. 新疆北部富蕴县沙尔布拉克坡安岩的地球化学特征及其构造意义[J]. 地球化学, 32(2): 155~160.

勘 误

由于作者和编辑部在稿件校对时的疏忽, 本刊 2015 年第 34 卷第 6 期发表的王文华等的《2013 年 1 月京津唐地区霾事件气溶胶单颗粒形貌及硫酸盐化特征》中图 8 能谱图中一个 Na 谱峰被误标为 Ca 的谱峰, 特此更正并向读者致歉, 正确的能谱图见下图。

