

新疆西天山备战基性—超基性岩年代学和岩石地球化学研究及其对铁成矿背景的制约

骆文娟¹, 张作衡¹, 段士刚¹, 蒋宗胜¹, 王大川², 陈杰²

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 对新疆西天山备战铁矿区附近的基性—超基性岩体——金云母辉石橄榄岩与侵入其中的闪长岩脉进行了年代学和岩石地球化学研究。金云母辉石橄榄岩中金云母⁴⁰Ar/³⁹Ar坪年龄为 298.1 ± 1.9 Ma, 该岩石的锆石 U-Pb 年龄为 302.5 ± 1.3 Ma, 与备战铁矿的成矿年龄相近。备战金云母辉石橄榄岩具有低 SiO₂ (42.51% ~ 50.82%)、Al₂O₃ (4.87% ~ 7.38%)、TiO₂ (0.25% ~ 0.77%) 和全碱 (Na₂O + K₂O = 0.87% ~ 1.87%) 含量, 而高 MgO (26.36% ~ 30.17%)、TFeO (12.33% ~ 15.99%) 含量的特征, 过渡元素丰度 (Cr = 523×10^{-6} ~ $7\,026 \times 10^{-6}$, Ni = 906×10^{-6} ~ $1\,088 \times 10^{-6}$, Co = 109×10^{-6} ~ 132×10^{-6}) 和 Mg[#] 值 (0.76 ~ 0.79) 均较高, 表明岩浆经历了橄榄石堆晶作用。由橄榄石最高 Fo 值 (0.79) 和岩石的 TFeO 含量计算得其母岩浆为玄武质岩浆。所有的岩石具有相似的稀土、微量元素配分模式, 均呈轻稀土元素富集的右倾型, 且重稀土元素较平坦 [(Gd/Lu)_N = 0.70 ~ 2.00], 明显富集大离子亲石元素 Rb、Ba、U、K, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti。总体上 Sr、Nd 同位素较均一, 金云母辉石橄榄岩的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i = 0.704 4 ~ 0.704 7, εNd(*t*) = 2.23 ~ 3.90, 闪长岩 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i = 0.704 4, εNd(*t*) = 3.79 ~ 4.07, 表明金云母辉石橄榄岩和闪长岩为同源演化的岩石。微量元素特征表明金云母辉石橄榄岩起源于尖晶石相, 源区为受俯冲流体或熔体交代的软流圈地幔。结合区域构造背景, 推测金云母辉石橄榄岩的形成与西天山造山带在晚古生代的山根拆沉引起的软流圈上涌有关, 而备战铁矿晚期成矿事件很可能形成于相同的深部动力学背景下。

关键词: 金云母氩氩年龄; 基性—超基性岩; 备战铁矿; 西天山; 地球动力学背景

中图分类号: P595; P597+.3; P588.12

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)05-0733-21

Geochronology and geochemistry of the Beizhan basic-ultrabasic pluton in West Tianshan, Xinjiang: Petrogenesis and geodynamical implications

LUO Wen-juan¹, ZHANG Zuo-heng¹, DUAN Shi-gang¹, JIANG Zong-sheng¹, WANG Da-chuan² and CHEN Jie²

(1. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper reports the characteristics of the Beizhan phlogopite pyroxene peridotite pluton and diorite veins from West Tianshan, Xinjiang. Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA ICP-MS) U-Pb zircon dating of the Beizhan phlogopite pyroxene peridotite yielded an age of 302.5 ± 1.3 Ma, and phlogopites from phlogopite pyroxene peridotite yielded a well-defined ⁴⁰Ar/³⁹Ar plateau age of 298.1 ± 1.9 Ma, which

收稿日期: 2017-11-17; 接受日期: 2018-07-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41503041); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项资金(K1412); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(2012CB416803); 中国地质调查局地质调查项目(DD20160124)

作者简介: 骆文娟(1986-), 女, 助理研究员, 主要从事海相火山岩型铁矿与相关的岩石学研究, E-mail: luowenjuan05@126.com。

show excellent agreement with the mineralization age of the Beizhan iron deposit. Beizhan phlogolite pyroxene peridotite exhibits relatively lower SiO_2 (42.51% ~ 50.82%), Al_2O_3 (4.87% ~ 7.38%), TiO_2 (0.25% ~ 0.77%), $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (0.87% ~ 1.87%), and higher MgO (26.36% ~ 30.17%), TFeO (12.33% ~ 15.99%) content. The high Cr (523×10^{-6} ~ $7\,026 \times 10^{-6}$), Ni (906×10^{-6} ~ $1\,088 \times 10^{-6}$), Co (109×10^{-6} ~ 132×10^{-6}) and $\text{Mg}^\#$ (0.76 ~ 0.79) values of the Beizhan phlogolite pyroxene peridotite suggest that olivine accumulation occurred in the magma. The calculation based on the highest Fo of olivine from phlogolite pyroxene peridotite and the TFeO content of the whole rocks suggest that its parent magma is basaltic affinity. All the rocks display LREE-enriched and flat HREE patterns, and show the enrichment of large ion lithophile elements (Rb, Ba, U, K) and the depletion of high field-strength elements (Nb, Ta, Zr, Hf, Ti), as well as the positive Pb anomaly. Phlogopite proxene peridotite has low initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of 0.704 4 ~ 0.704 7 and high $\varepsilon\text{Nd}(t)$ values of 2.23 ~ 3.90, and diorite has initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of 0.704 4 and $\varepsilon\text{Nd}(t)$ values of 3.79 ~ 4.07. These homogeneous Sr, Nd isotope compositions suggest that they were derived from the same source region. Furthermore, the trace element signature suggests that phlogolite pyroxene peridotite was derived from a spinel-facies asthenosphere mantle source, which had been modified by subduction-related melts/fluids. Combined with regional tectonic setting, the authors infer that the Beizhan phlogopite pyroxene peridotite was derived from the upwelling of asthenosphere mantle caused by the detachment of the West Tianshan orogenic root zone in Neopaleozoic. It is also suggested that the Beizhan iron deposit was formed under the same geodynamic setting.

Key words: phlogopite Ar-Ar age; basic-ultrabasic rock; Beizhan iron deposit; West Tianshan; geodynamic setting

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41503041); Fundamental Research Funds for the Central public welfare research institutes (K1412); National Key Basic Research Project (“973” Program) (2012CB416803); China Geological Survey Project (DD20160124)

中亚造山带主要形成于古亚洲洋的张开、俯冲、闭合过程的大背景下,是全球显生宙陆壳增生与改造最显著的地区,也是全球最大的增生造山带与大陆成矿域(Jahn *et al.*, 2000; Xiao *et al.*, 2008; Gao *et al.*, 2009; 高俊等, 2009; Xiao and Santosh, 2014)。在中亚造山带的众多成矿带中,阿吾拉勒铁成矿带近年来备受关注。其中备战、敦德、智博、查岗诺尔、松湖等铁矿主要赋存在石炭纪大哈拉军山组火山岩中,最新的年代学研究显示这些铁矿主要形成于晚石炭世,主要集中于320 ~ 300 Ma(洪为等, 2012; Zhang *et al.*, 2012a, 2012b; 李大鹏等, 2013; 蒋宗胜等, 2012),铁矿的形成与共生的火山岩或者侵入岩有关(洪为等, 2012; 张作衡等, 2012; Zhang *et al.*, 2012a, 2014a; Duan *et al.*, 2014, 2017; 段士刚等, 2014; Jiang *et al.*, 2014a)。然而,对于铁矿的赋矿地层——大哈拉军山组火山岩形成的大地构造背景存在不同观点,有大陆裂谷-地幔柱(车自成等, 1996; 夏林圻等, 2004; Xia *et al.*, 2004)、大陆减薄拉张(陈丹玲等, 2001)和活动大陆边缘弧等(Windley *et al.*, 1990; 姜常义等, 1995, 1996; Gao

et al., 1998; 卢华复等, 2001; Gao and Klemd, 2003; Zhu *et al.*, 2005; 钱青等, 2006; 孙林华等, 2007)。近年来,多数学者通过对含矿火山岩的地球化学研究,认为西天山阿吾拉勒海相火山岩型铁矿形成于与俯冲作用有关的活动大陆边缘弧(汪帮耀等, 2011; 蒋宗胜等, 2012; Zhang *et al.*, 2014c, 2015; Jiang *et al.*, 2014a; Duan *et al.*, 2014; 王腾等, 2015; 韩琼等, 2015a, 2015b; 田敬佳等, 2015; 张招崇等, 2016)。然而对于成矿的深部动力学机制仍存有争议,主要有造山带根部的拆沉(Sun *et al.*, 2008)、俯冲板片的断离(Yang *et al.*, 2012)、俯冲板片回卷(slab roll-back)(Tang *et al.*, 2010, 2012, 2014; Li *et al.*, 2015; Yan *et al.*, 2015)以及最新的观点热幔-冷壳背景下的高角度俯冲机制(张招崇等, 2016)。成矿过程的深部动力学机制的阐明对于解释矿床形成具有重要意义,可以从源头上探究矿床的形成。因此,阿吾拉勒铁成矿带深部动力学过程的研究对于研究铁矿形成是一个突破口。

此外,前人研究认为与矽卡岩型铁矿有关的含矿岩浆与洋壳的高角度俯冲有关,大多起源于地幔

楔的部分熔融,相比其他类型的矽卡岩矿床(如 Au、Cu、Zn、W、Mo、Sn),矽卡岩型铁矿的含矿岩浆具有较显著的地幔来源特征(Meinert *et al.*, 2005); Li 等(2008, 2009)提出大冶地区矽卡岩型矿床(主要为 Fe、Cu、Au、Mo 矿)的含矿岩浆起源于富集岩石圈地幔的部分熔融并经历了壳内低压分离结晶,且富集岩石圈地幔通常经历了俯冲板片熔体/流体的交代; Ray 等(1999)发现位于加拿大西岸的不列颠哥伦比亚省南部的矽卡岩型磁铁矿床的形成大多与基性-超基性岩有关。这些研究表明矽卡岩型铁矿与幔源岩浆存在着间接或直接的联系。前人研究认为阿吾拉勒铁成矿带中的备战铁矿为矽卡岩型铁矿(Zhang *et al.*, 2012a),那么该矿区可能有同时代的幔源岩浆岩产出,该区幔源岩浆岩的发现对于研究成矿的深部动力学过程具有重要意义。

笔者在备战铁矿区附近发现金云母辉石橄榄岩,这种岩石的磁铁矿含量较高,锆石 U-Pb 测年表明其大致形成于 300 Ma 左右,与备战矿区的成矿年龄相接近。这些特征似乎表明了这种超基性岩与备战铁矿的形成存在一定的联系。一般的矽卡岩型铁矿与中性/中酸性岩体有关,而这种岩石的发现为研究基性-超基性岩与类矽卡岩型铁矿的形成提供了罕见的机会,对指示其成矿的深部动力学背景具有重要意义。因此,本次研究以金云母辉石橄榄岩的成因研究为切入点,结合备战铁矿的矿床地质特征、矿石特征来研究其成矿的深部动力学特征,从而为阿吾拉勒成矿带的成矿背景提供制约。

1 区域地质背景

天山造山带形成于古生代与俯冲相关的增生活动,分布于中亚造山带的西南缘(Xiao *et al.*, 2013)。中国的西天山造山带夹于准噶尔板块和塔里木板块间,该造山带从北到南包括北天山弧增生体、伊犁板块、中天山复合弧地体、塔里木板块北缘。这些构造单元分别被北天山缝合带、尼古拉耶夫线-北那拉提缝合带和南天山缝合带分割(图 1, 王作勋等, 1990; Windley *et al.*, 1990; Allen *et al.*, 1992; Gao *et al.*, 1998, 2009; Zhang *et al.*, 2012b)。这些构造缝合带被认为分别形成于晚古生代北天山洋、早古生代帖尔斯洋和早古生代晚期-晚古生代天山洋的俯冲,并与准噶尔板块、伊犁-中天山板块和塔里木板块的拼合有关(Gao *et al.*, 2009; Qian *et al.*,

2009; Zhang *et al.*, 2012b)。该区晚古生代构造演化以俯冲为主,如伊犁板块下北天山洋的南向俯冲和南天山洋的北向俯冲(Gao *et al.*, 1998; Xiao *et al.*, 2008; 龙灵利等, 2008; Wang *et al.*, 2008)。

楔形伊犁板块是西天山的主要组成部分,伊犁板块的基底主要由中元古代到新元古代的片麻岩、碳酸盐岩和碎屑岩组成(Gao *et al.*, 1998; 李继磊等, 2009)。寒武纪碳酸盐岩和碎屑岩、奥陶纪火山岩和志留纪火山沉积岩分布于伊犁板块的南北边缘。泥盆纪在该区仅有花岗岩和海相沉积岩(王宝瑜等, 1994; Wang *et al.*, 2007)。石炭纪火山岩和火山碎屑岩在伊犁板块广泛分布,这被认为是由于北天山洋的南向俯冲(王强等, 2006; Wang *et al.*, 2007)或者南天山洋的北向俯冲(Zhu *et al.*, 2009)引起的。其中,石炭纪大哈拉军山组由安山岩、流纹岩、英安岩、凝灰质角砾岩和少量玄武岩以及灰岩和砂岩组成。该区二叠纪陆相砂岩和砾岩不整合地覆盖于老地层之上。

西天山的主要成矿带有别珍套-汗哈尕铜多金属成矿带、博罗科洛铜金成矿带和阿吾拉勒铁铜成矿带(图 1)。阿吾拉勒铁铜成矿带东段海相火山岩型铁矿主要赋存于石炭纪火山岩中,如查岗诺尔、智博、敦德、备战等。

2 矿区地质概况与基性-超基性岩岩石学特征

备战铁矿区位于阿吾拉勒铁成矿带的东段,矿区出露地层主要为下石炭统大哈拉军山组和阿克沙克组以及第四系冰川覆盖(图 2)。下石炭统大哈拉军山组几乎遍布整个矿区,构成巩乃斯复向斜两翼。北翼岩性主要为英安质凝灰岩,局部夹少量砂岩、大理岩化灰岩,出露厚度约 200 m,总体走向为近东西向,地层产状 $180^{\circ} \angle 52^{\circ} \sim 80^{\circ}$,局部凝灰岩硅化较强。南翼主要岩性为英安质凝灰岩、英安岩,局部夹含大理岩化灰岩,深部钻孔中局部夹玄武岩,地层产状为 $360^{\circ} \angle 60^{\circ} \sim 83^{\circ}$ 。南翼西部因钾长花岗岩体侵入缺失凝灰岩,矽卡岩化极强,中部的凝灰岩已全部蚀变为矽卡岩,东部蚀变较弱。与上覆下石炭系阿克沙克组为角度不整合接触。阿克沙克组主要分布于矿区的北部,构成巩乃斯复向斜核部,以碳酸盐岩、细碎屑岩组合为主。矿区范围内岩浆活动活跃,侵入岩在矿区南部、西南部较发育,主要为晚石炭

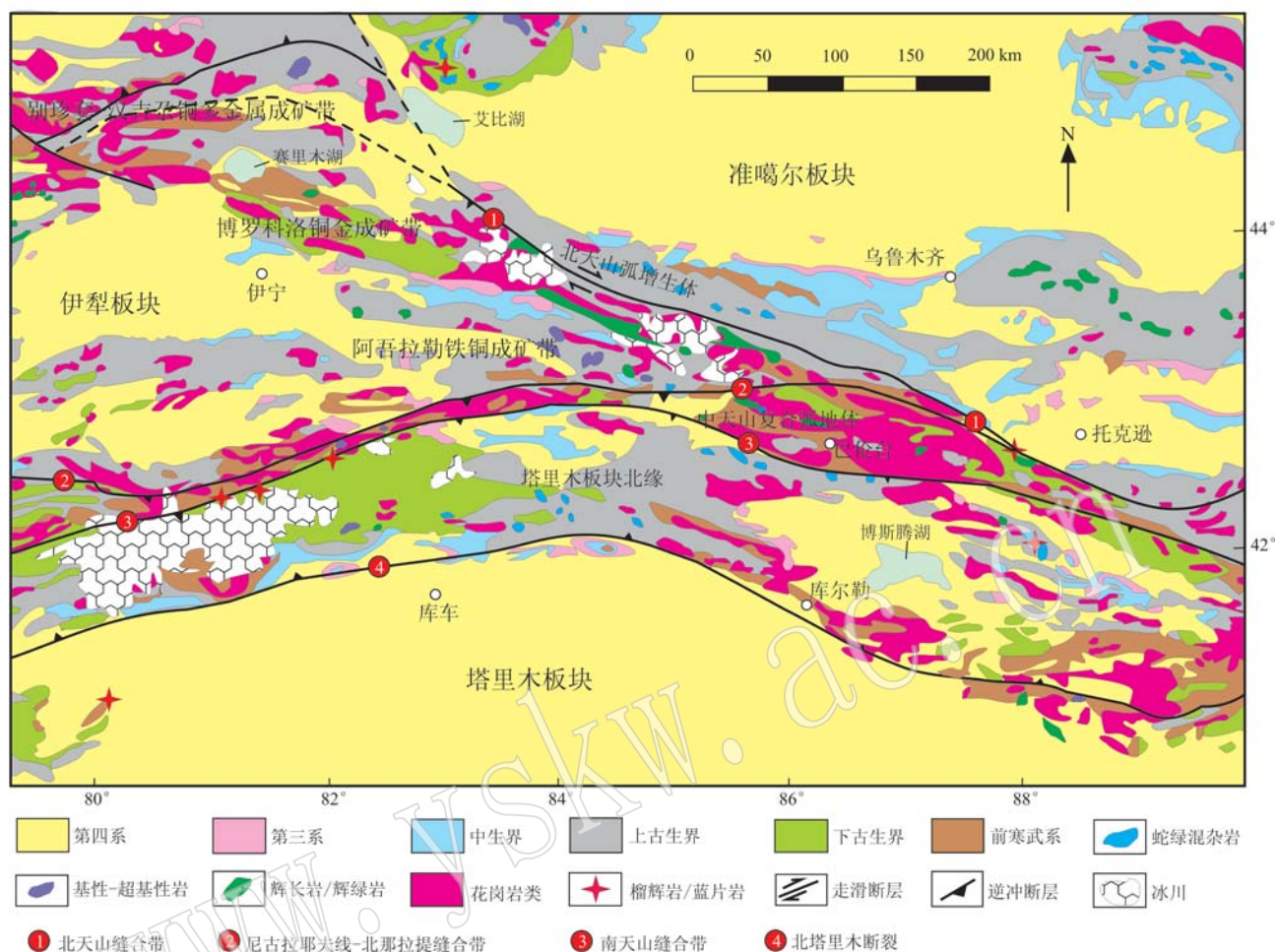


图1 西天山造山带构造图(据 Gao *et al.*, 2009; Long *et al.*, 2011)

Fig. 1 Tectonic map of the West Tianshan Orogen (after Gao *et al.*, 2009; Long *et al.*, 2011)

世钾长花岗岩和二长花岗岩,早石炭世石英闪长岩和钾长花岗岩,晚石炭世金云母辉石橄榄岩,矿区还发育花岗斑岩及花岗闪长岩脉、闪长岩脉、辉绿岩脉等脉岩。矿区北部岩浆活动则较弱,未见大岩体,仅见少量闪长岩脉、辉绿岩脉等脉岩。矿区大规模断裂构造不发育,但由于处于尼勒克断裂和拉尔敦断裂两条大断裂之间,地层之间的层间小错动明显,小规模断裂、节理发育。

备基性-超基性岩体位于备战铁矿区西南约3 km处,侵入于大哈拉山组地层中(图2)。岩体呈北东-南西走向,宽约600 m,长约1 500 m,出露面积约1 km²,岩体较均一,分异不明显,以金云母辉石橄榄岩为主,岩体中有闪长岩脉侵入,该岩脉与矿区内普遍发育的辉绿岩脉、闪长岩脉属于同源同期岩脉。

金云母辉石橄榄岩呈黄黑色,具有明显球状风

化(图3a),矿物组成主要为橄榄石(30%~40%)、斜方辉石(20%~30%)、金云母(20%~30%)及少量斜长石、单斜辉石和次生角闪石,岩石局部斜长石为5%~10%。橄榄石呈半自形-他形粒状,被金云母或斜方辉石包裹,呈包橄结构。橄榄石蛇纹石化析出磁铁矿,呈网脉状。磁铁矿沿着金云母解理缝析出(图3b、3d)。斜方辉石被金云母或角闪石交代(图3b、3c)。斜长石呈他形充填在辉石之间。

闪长岩呈灰白色至灰黑色,中粒结构,块状构造,主要矿物为斜长石(65%)、角闪石(30%),次要矿物单斜辉石(5%),角闪石大多已经蚀变为黑云母、绿泥石,副矿物以磁铁矿为主,并含少量钛铁矿。钛铁矿为粒间矿物,磁铁矿一般与蚀变矿物(黑云母、绿泥石)伴生,有的包裹于蚀变辉石和角闪石中。

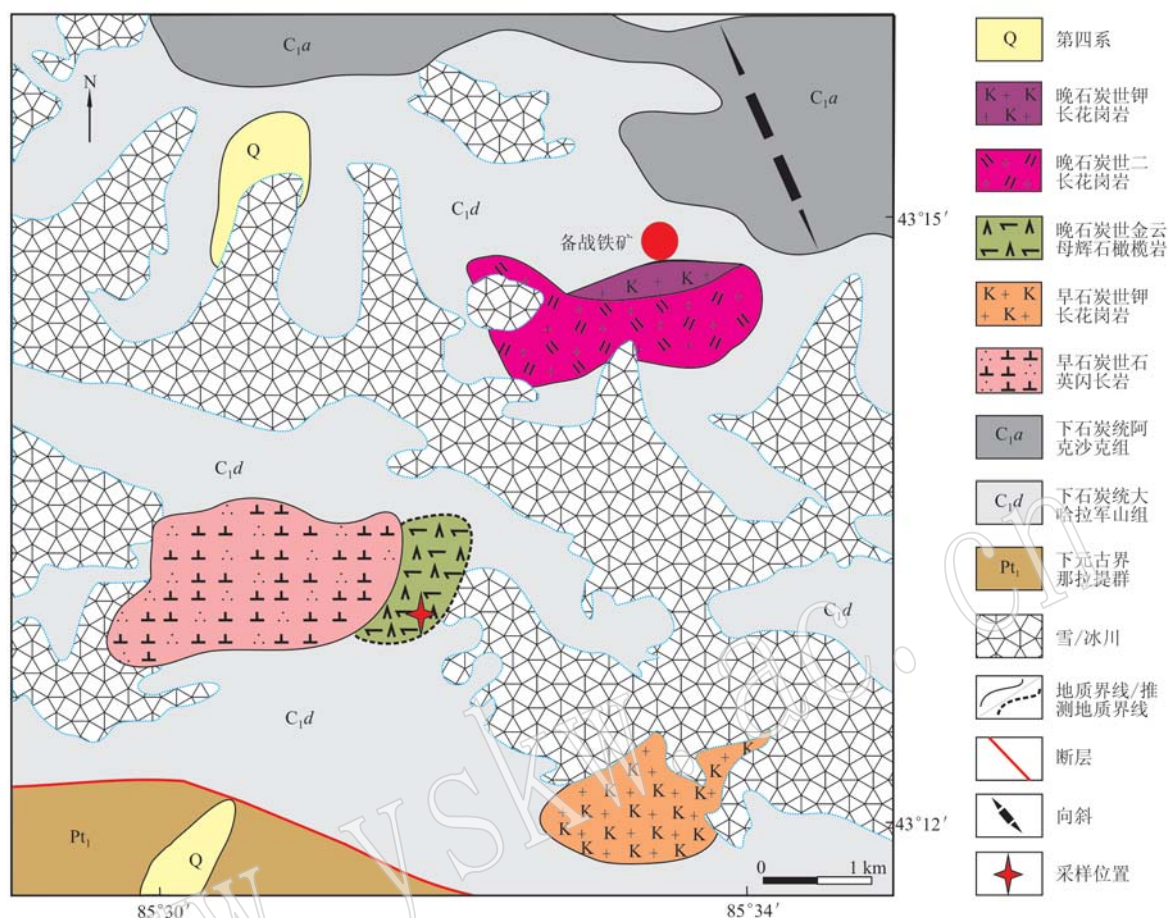


图2 备战铁矿区地质简图(据新疆地矿局第十一地质大队, 2012)^①

Fig. 2 Sketch geological map of the Beizhan iron ore district (after No. 11 Geological Party of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, 2012)^①

3 实验方法

全岩主量元素在国家地质实验测试中心采用XRF方法完成,其中XRF测得的样品全铁含量减去用容量法测得的FeO含量,得到样品 Fe_2O_3 含量,分析误差小于5%;全岩微量元素在国家地质实验测试中心采用ICP-MS的方法完成,分析误差2%~5%。

金云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄在中国地质科学院地质研究所同位素实验室完成。将金云母辉石橄榄岩破碎、筛选至80目,挑选纯的金云母(纯度>99%)用超声波清洗。清洗后的样品被封进石英瓶中送中国原子能科学研究院的核反应堆中接受中子照射。样品的阶段升温加热使用石墨炉,每一个阶

段加热30 min,净化30 min。质谱分析是在多接收稀有气体质谱仪Helix MC上进行的,每个峰值均采集20组数据。所有的数据在回归到时间零点值后再进行质量歧视校正、大气氩校正、空白校正和干扰元素同位素校正。中子照射过程中所产生的干扰同位素校正系数通过分析照射过的 K_2SO_4 和 CaF_2 来获得,其值为: $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}}=0.000\ 238\ 9$, $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}}=0.004\ 782$, $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}}=0.000\ 806$ 。 ^{37}Ar 经过放射性衰变校正, ^{40}K 衰变常数 $\lambda=5.543\times 10^{-10}/\text{a}$ (Steiger and Jäger, 1977);用ISOPLLOT程序计算坪年龄及正等时线(Ludwig, 2001)。坪年龄误差以 2σ 给出。详细实验流程见文献(陈文等, 2006; 张彦等, 2006)。

① 新疆地矿局第十一地质大队. 2012. 新疆和静县查岗诺尔-备战铁矿一带1:5万地质矿产图.

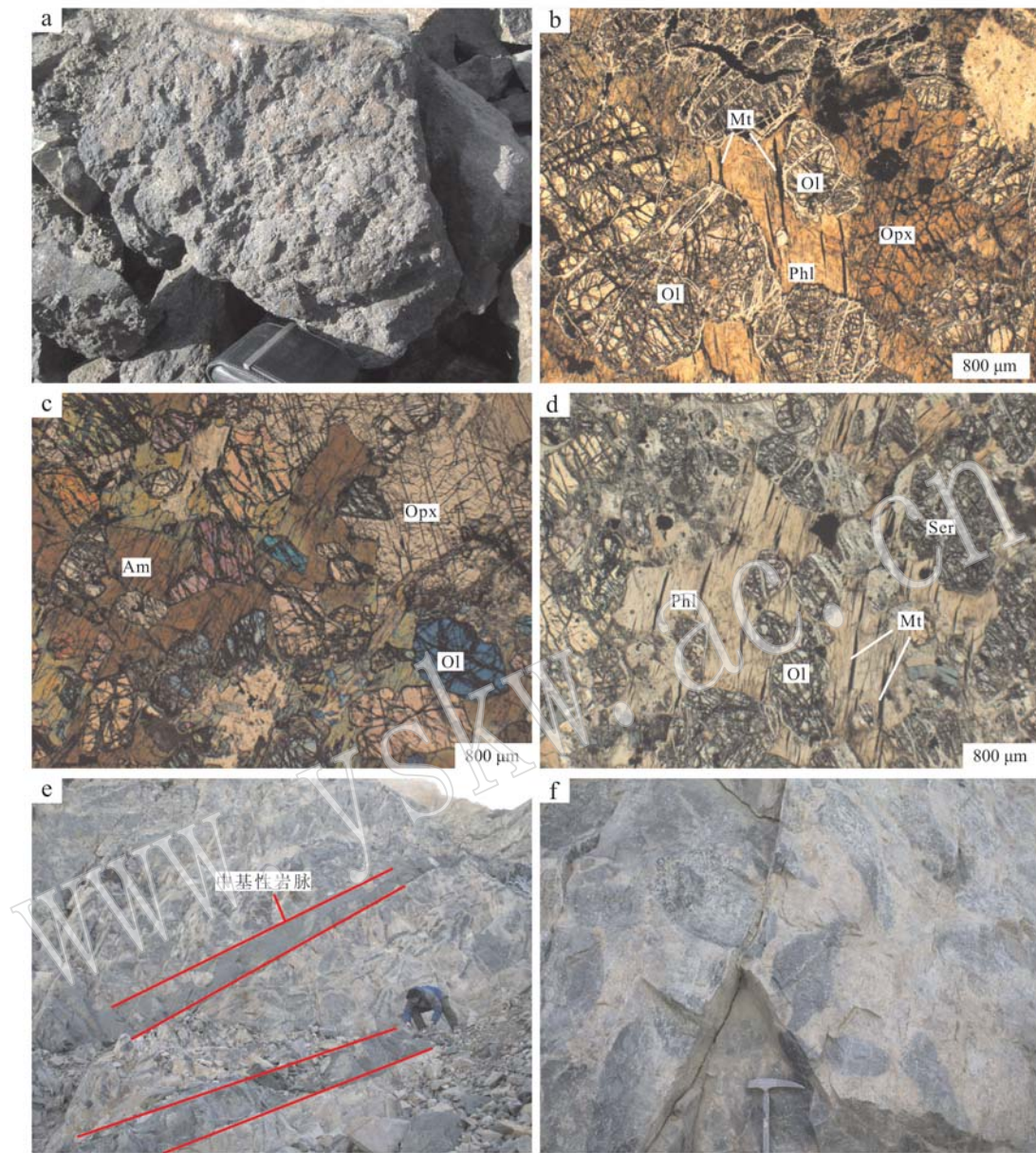


图3 备战基性-超基性岩野外和镜下显微特征

Fig. 3 Field characteristics and photomicrographs of the Beizhan basic-ultrabasic pluton

a—金云母辉石橄榄岩野外露头; b—金云母辉石橄榄岩(-); c—金云母辉石橄榄岩(+); d—金云母辉石橄榄岩(-); e—备战矿区花岗岩中广泛发育中基性岩脉; f—花岗岩中发育椭圆状中基性暗色包体; Ol—橄榄石; Opx—斜方辉石; Am—角闪石; Phl—金云母; Ser—蛇纹石; Mt—磁铁矿

a—the outcrop of phlogopite pyroxene peridotite; b—phlogopite pyroxene peridotite(-); c—phlogopite pyroxene peridotite(+); d—phlogopite pyroxene peridotite(-); e—intermediate-basic veins in the Beizhan granites; f—elliptical intermediate-basic enclaves in the Beizhan granites; Ol—olivine; Opx—orthopyroxene; Am—amphibole; Phl—phlogopite; Ser—serpentine; Mt—magnetite

锆石 U-Pb 年龄测试在中国科学院青藏高原研究所采用 Agilent 7500a ICPMS 配 New Wave UP193FX 激光剥蚀系统完成。分析束斑为 25 μm , 重复频率为 7 Hz, 激光功率为 2 J/cm², 氦气用作载气, 背景时间为 30 s, 采样时间为 40 s, 采用 ²⁹Si 作为内部标样, NIST SRM610 作为外部标样来校准 U、

Th、Pb 含量。²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 和 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 由 GLITTER 4.0 (Macquarie University) 程序计算获得。²⁰⁷Pb/²³⁵U 值由 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 和 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 计算获得。一定间隔穿插 Plešovice 锆石 (Sláma *et al.*, 2008) 用于监测样品 ²⁰⁶Pb/²³⁸U、²⁰⁷Pb/²³⁵U 和 ²⁰⁸Pb/²³²Th 比值质量, 并验证 U-Th-Pb 年龄的一致性。根据 Andersen 等(2002)提

出的方法校正普通 Pb。剔除了具有异常高 ^{204}Pb 的数据。由于样品的不确定度小于 1%, 因此采用 1% 作为总的不确定度。采用 Isoplot/Ex 3.0 程序(Ludwig, 2003)计算并做 U-Pb 年龄谐和图。

Sr-Nd 同位素测试在武汉地质调查中心的中南矿产资源监督检测中心实验室完成, 采用 Finnigan 公司 MAT262 型固体源热电离质谱仪(TIMS)测定。全岩样品采用 $\text{HF} + \text{HClO}_4$ 混合酸进行分解, 采用 Dowex50 $\times$ 8 阳离子树脂交换柱进行 Rb、Sr、Sm、Nd 的分离。全程化学分析本底 Sr 为 1×10^{-9} g, Nd 为 2.13×10^{-10} g。Sr、Nd 同位素质量分馏分别采用 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.3752$ 、 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行校正。Sr 同位素标样 NBS987 测定结果为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} =$

0.71031 ± 0.00014 , Nd 同位素标样测定结果为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.500565 \pm 0.000009$ 。

矿物成分分析在中国地质科学院矿产资源研究所采用 JEOL JXA-8230 型电子探针测试完成, 加速电压 15 kV, 电流 20 nA, 电子束斑 5 μm , 采样时间和背景时间分别为 10 s 和 5 s。

4 分析结果

4.1 金云母 Ar-Ar 年代学特征

备战金云母辉石橄榄岩(LBZ-29)中金云母的阶段加热 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素测年结果列于表 1, 相应的表观年龄谱如图 4 所示。在 700 ~ 1400 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内对

表 1 备战金云母辉石橄榄岩中金云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段升温测年数据表
Table 1 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ stepwise heating analytical data for phlogopite from the Beizhan phlogopite pyroxene peridotite

$t/^{\circ}\text{C}$	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{37}\text{Ar}_0/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$^{40}\text{Ar}/\%$	F	$^{39}\text{Ar}/10^{-14}\text{mol}$	$^{39}\text{Ar}(\text{Cum.})/\%$	t/Ma	$\pm 1\sigma/\text{Ma}$
700	80.313 3	0.263 4	2.747 3	0.094 0	3.31	2.664 7	0.04	0.24	23.0	15.0
770	46.801 4	0.096 4	0.000 0	0.048 5	39.11	18.303 0	0.17	1.16	152.6	3.1
820	54.756 2	0.080 7	0.438 1	0.049 3	56.47	30.930 8	0.19	2.15	250.8	3.4
870	51.913 3	0.049 2	0.000 0	0.044 2	71.96	37.359 1	0.44	4.52	298.8	3.0
920	41.815 7	0.014 7	0.090 4	0.036 4	89.59	37.466 2	1.35	11.80	299.6	2.8
950	38.998 9	0.005 0	0.047 0	0.033 2	96.24	37.534 4	1.40	19.31	300.1	2.8
980	38.348 1	0.003 0	0.008 1	0.033 4	97.69	37.461 6	1.68	28.34	299.6	2.8
1 010	38.327 1	0.002 6	0.024 6	0.033 3	98.02	37.567 1	2.53	41.91	300.3	2.8
1 040	37.834 6	0.002 3	0.034 2	0.033 2	98.17	37.143 8	2.56	55.68	297.2	2.8
1 080	37.976 5	0.003 7	0.047 1	0.032 8	97.09	36.871 1	2.93	71.44	295.2	2.7
1 130	38.136 6	0.003 7	0.000 0	0.031 8	97.13	37.042 5	2.89	86.98	296.5	2.7
1 200	38.040 5	0.003 5	0.027 2	0.030 9	97.25	36.995 9	2.22	98.91	296.1	2.7
1 300	42.846 2	0.028 8	0.613 6	0.034 4	80.20	34.380 0	0.17	99.80	276.7	4.0
1 400	58.865 6	0.083 8	0.072 8	0.035 3	57.93	34.101 9	0.04	100.00	275.0	13.0

注: 表中下标 m 代表样品中测定的同位素比值; 总气体年龄(Total age) = 295.0 Ma, W = 27.55 mg, J = 0.004 822, F = $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$, 为放射成因 ^{40}Ar 与 K 生成的 ^{39}Ar 的比值。

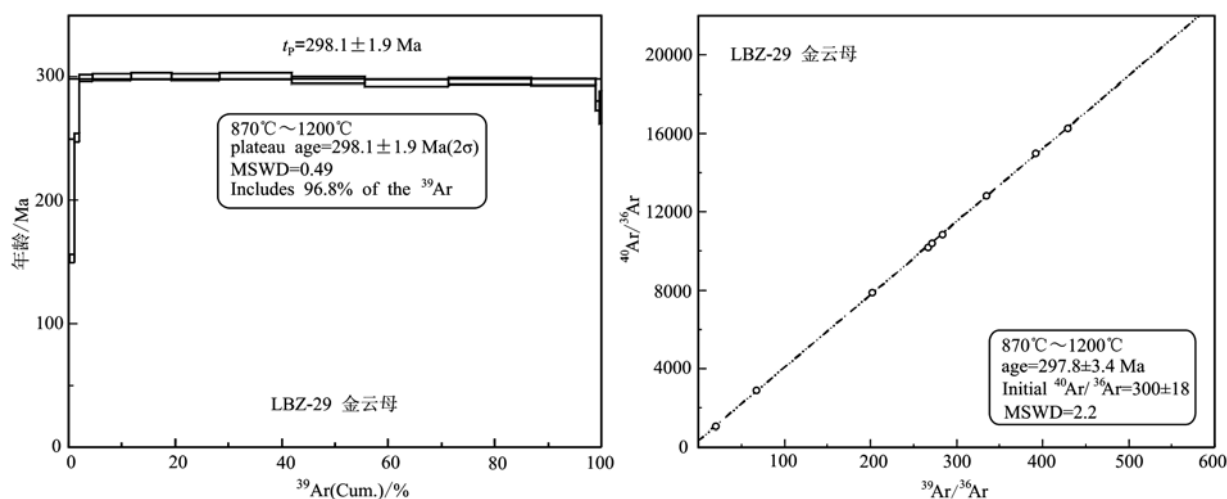


图 4 备战金云母辉石橄榄岩中金云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄谱图和等时线图

Fig. 4 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ age spectrum and isochron of phlogopite from the Beizhan phlogopite pyroxene peridotite

样品进行了14个阶段的释热分析。从表1可以看出,样品在高温释热阶段构成了很好的年龄坪。在高温释热阶段(870~1200℃)构成的坪年龄为298.1±1.9 Ma(图4),³⁹Ar释放量为96.8%。在正等时线图上,截距年龄为297.8±3.4 Ma,权重均差(MSWD)为2.2(图4)。总气体年龄为295.0 Ma。等时线年龄、坪年龄和总气体年龄在误差范围内一致。初始⁴⁰Ar/³⁶Ar同位素组成为300±18,在误差范

围内与大气Ar比值(295.5±0.5)基本一致,说明样品冷却生成时没有捕获Ar。因此样品的坪年龄可以代表岩体结晶年龄。

4.2 锆石 U-Pb 年代学特征

金云母辉石橄榄岩(LBZ-29)中锆石 U-Pb 年龄测试结果列于表2,金云母辉石橄榄岩中锆石呈它形粒状,颗粒粒径为30 μm至100 μm不等。锆石发育弱韵律环带或不规则、颜色不均一的暗色区(图5)。

表2 备战金云母辉石橄榄岩锆石 U-Pb 年龄
Table 2 LA-ICP-MS U-Pb zircon dating of the Beizhan phlogopite pyroxene peridotite

测试点号	$w_B/10^{-6}$			$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			
	^{232}Th	^{238}U	Pb		比值	1σ	比值	1σ	年龄/Ma	1σ
LBZ29-5	1 586	746	59	2.13	0.344 76	0.005 5	0.048	0.000 3	301	2
LBZ29-6	45	965	48	0.05	0.344 29	0.006 6	0.048	0.000 3	301	2
LBZ29-7	27	716	36	0.04	0.351 06	0.006 9	0.048	0.000 3	305	2
LBZ29-9	169	975	50	0.17	0.343 82	0.005 1	0.048	0.000 3	301	2
LBZ29-12	298	1 566	82	0.19	0.348 11	0.004 4	0.048	0.000 3	305	2
LBZ29-13	659	729	44	0.90	0.341 71	0.006 3	0.048	0.000 4	301	2
LBZ29-19	1 198	1 051	67	1.14	0.350 44	0.004 6	0.049	0.000 3	305	2
LBZ29-24	108	758	38	0.14	0.347 49	0.005 3	0.048	0.000 3	303	2
LBZ29-25	139	112	7	1.25	0.343 66	0.047 9	0.048	0.000 7	300	4
LBZ29-26	266	163	11	1.64	0.343 39	0.047 9	0.048	0.000 7	301	4
LBZ29-27	238	165	11	1.44	0.343 46	0.029 0	0.048	0.000 6	300	3

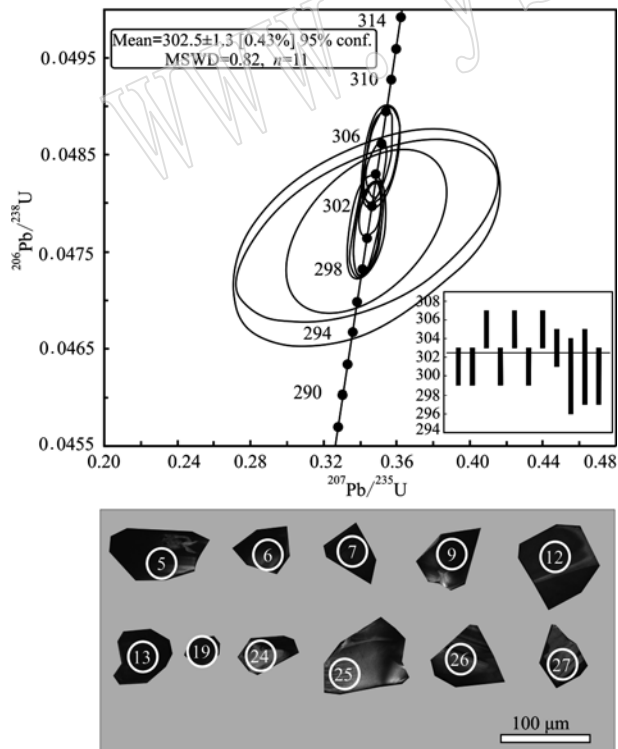


图5 备战金云母辉石橄榄岩锆石 CL 图像和 U-Pb 谐和图解

Fig. 5 CL image and U-Pb concordia diagrams for zircons from the Beizhan phlogopite pyroxene peridotite

在阴极发光图上,锆石显示较低强度的发光性,呈暗灰色。锆石²³²Th 为 $27 \times 10^{-6} \sim 1\,586 \times 10^{-6}$, ²³⁸U 含量为 $112 \times 10^{-6} \sim 1\,566 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.04~2.13,表明这些锆石为岩浆锆石(Hoskin and Schaltegger, 2003)。该样品的锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 302.5±1.3 Ma($n=11$, MSWD=0.82)。在误差允许范围内与金云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄(298.1±1.9 Ma)相近。

4.3 全岩主量微量元素特征

备战基性-超基性岩体主量元素分析结果列于表3,由于所采集个别样品的烧失量较大,因此将主量元素数据除去烧失量重新百分化后的数据用于本文的讨论。金云母辉石橄榄岩具有低 SiO₂(42.51%~50.82%)、Al₂O₃(4.87%~7.38%)、TiO₂(0.25%~0.77%)和全碱(Na₂O+K₂O=0.87%~1.87%)含量,而高 MgO(26.36%~30.17%)、TFeO(12.33%~15.99%)含量的特征, Mg[#] 值为 0.76~0.79, m/f 值介于 3.19~3.80 之间(在 2~6.5 范围内),属于铁质基性-超基性岩。相比之下,闪长岩具有高 SiO₂(53.02%~54.56%)、Al₂O₃(16.87%~17.65%)、TiO₂(1.26%~1.33%)和全碱(Na₂O+K₂O=4.83%~6.49%)含量,低 MgO(5.16%~

表3 全岩主量元素($w_B/\%$)和微量、稀土元素($w_B/10^{-6}$)分析数据
Table 3 Bulk rock composition of major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) elements

岩性 样品号	金云母辉石橄榄岩						闪长岩	
	LBZ-24	LBZ-25	LBZ-30	LBZ-40	LBZ-28	LBZ-45	LBZ-46	LBZ-48
SiO ₂	41.20	41.12	42.01	39.69	47.45	48.49	53.35	51.56
TiO ₂	0.60	0.24	0.41	0.71	0.32	0.35	1.30	1.23
Al ₂ O ₃	6.58	6.02	7.13	5.91	5.56	4.65	16.50	17.16
Fe ₂ O ₃	6.18	3.83	3.64	6.41	4.56	4.81	3.94	1.97
FeO	7.53	11.23	10.40	9.04	7.60	8.21	4.54	6.27
MnO	0.14	0.23	0.21	0.20	0.17	0.24	0.15	0.18
MgO	26.08	29.19	27.41	26.55	25.02	25.18	5.05	5.82
CaO	3.37	3.34	3.34	2.87	3.25	2.56	7.80	6.28
Na ₂ O	0.67	0.70	0.94	0.55	0.52	0.59	3.51	4.61
K ₂ O	0.62	0.56	0.87	0.47	0.38	0.24	1.21	1.70
P ₂ O ₅	0.24	0.28	0.26	0.21	0.07	0.09	0.44	0.47
LOI	6.02	2.64	2.74	5.27	4.59	4.23	1.27	2.37
Total	99.23	99.38	99.36	97.88	99.49	99.64	99.06	99.62
TFeO	14.05	15.17	14.15	15.99	12.33	13.14	8.27	8.27
Mg [#]	0.78	0.78	0.78	0.76	0.79	0.78	0.53	0.57
m/f	3.56	3.53	3.56	3.19	3.80	3.55	1.10	1.27
Rb	11.70	22.40	23.90	10.50	12.10	8.21	31.90	51.50
Sr	160	240	249	159	81	143	503	648
Ba	130.0	120.0	203.0	90.8	68.2	74.5	311.0	458.0
Th	0.62	1.05	1.69	0.64	0.57	0.55	2.68	1.51
U	0.26	0.33	0.75	0.28	0.26	0.16	0.83	0.56
Nb	6.16	3.02	4.57	3.61	1.59	1.59	10.50	12.80
Ta	0.35	0.21	0.31	0.21	0.13	0.11	0.75	0.85
Zr	75.5	46.0	106.0	61.6	32.8	29.4	134.0	150.0
Hf	2.37	1.33	2.55	1.70	0.88	0.79	3.96	3.93
Pb	2.95	3.66	6.13	1.99	1.40	1.78	8.52	25.40
Cr	3 031.0	591.0	759.0	7 026.0	649.0	523.0	86.1	112.0
Ni	939.0	1 088.0	1 006.0	1 007.0	927.0	906.0	49.3	82.2
V	127.0	48.7	78.7	203.0	63.3	69.2	201.0	180.0
Co	126.0	132.0	123.0	130.0	109.0	110.0	29.4	30.7
Cs	2.20	5.54	1.28	1.56	1.71	1.18	1.08	0.60
Cu	13.0	13.4	22.8	35.9	22.4	13.7	68.3	55.2
Zn	138.0	142.0	120.0	175.0	96.8	118.0	91.1	475.0
Ga	8.96	6.55	8.14	11.00	7.16	6.41	19.10	18.90
Ge	0.96	0.99	0.98	1.14	1.27	1.39	1.24	1.11
La	12.60	10.90	11.40	9.37	4.56	4.86	23.80	22.60
Ce	30.10	22.40	24.30	21.30	9.62	10.20	53.60	49.30
Pr	4.04	2.69	2.99	2.78	1.15	1.26	6.83	6.11
Nd	16.90	10.40	11.80	11.60	4.65	5.07	27.80	24.50
Sm	3.88	1.99	2.29	2.61	0.99	1.14	5.91	5.10
Eu	0.93	0.54	0.57	0.69	0.33	0.34	1.66	1.48
Gd	3.24	1.44	1.87	2.22	1.04	1.02	5.27	4.11
Tb	0.50	0.25	0.30	0.35	0.15	0.19	0.87	0.61
Dy	3.14	1.40	1.89	2.02	1.25	1.20	5.16	3.52
Ho	0.61	0.27	0.38	0.38	0.27	0.27	1.09	0.71
Er	1.68	0.80	1.14	1.25	0.93	0.97	3.35	2.14
Tm	0.21	0.11	0.15	0.16	0.14	0.15	0.44	0.26
Yb	1.44	0.75	0.92	1.05	1.13	1.13	2.97	1.79
Lu	0.20	0.12	0.17	0.17	0.18	0.18	0.45	0.26
Sc	19.9	11.7	11.8	18.4	14.6	22.9	26.2	19.8
Y	16.20	7.50	10.60	11.30	7.88	7.98	29.00	19.20
(La/Sm) _N	2.10	3.54	3.21	2.32	2.97	2.75	2.60	2.86
(Gd/Lu) _N	2.00	1.48	1.36	1.61	0.71	0.70	1.45	1.95
(La/Yb) _N	6.28	10.42	8.89	6.40	2.89	3.09	5.75	9.06
δEu	0.78	0.93	0.82	0.85	0.99	0.94	0.89	0.96
δCe	1.03	0.99	1.00	1.01	1.00	0.99	1.02	1.01
ΣREE	79.47	54.06	60.17	55.95	26.39	27.98	139.20	122.49

注: $m/f = (Mg^{2+} + Ni^{2+}) / (Fe^{2+} + Fe^{3+} + Mn^{2+})$ 为离子的摩尔数比值; $Mg^{\#} = MgO / (MgO + TFeO)$ 为摩尔数比值。

5.98%)、 TFeO (8.27%) 含量的特征, $\text{Mg}^\#$ 为 0.53 ~ 0.57, m/f 值介于 1.10 ~ 1.27 < 2, 属于富铁质基性岩。主量元素变化见图 6。

全岩稀土和微量元素分析结果列于表 3。在稀

土元素球粒陨石标准化图解中, 岩石的稀土元素配分型式基本一致(图 7a), 均呈轻稀土元素富集的右倾型。其中闪长岩的 ΣREE ($122.49 \times 10^{-6} \sim 139.20 \times 10^{-6}$) 高于金云母辉石橄榄岩的 ΣREE

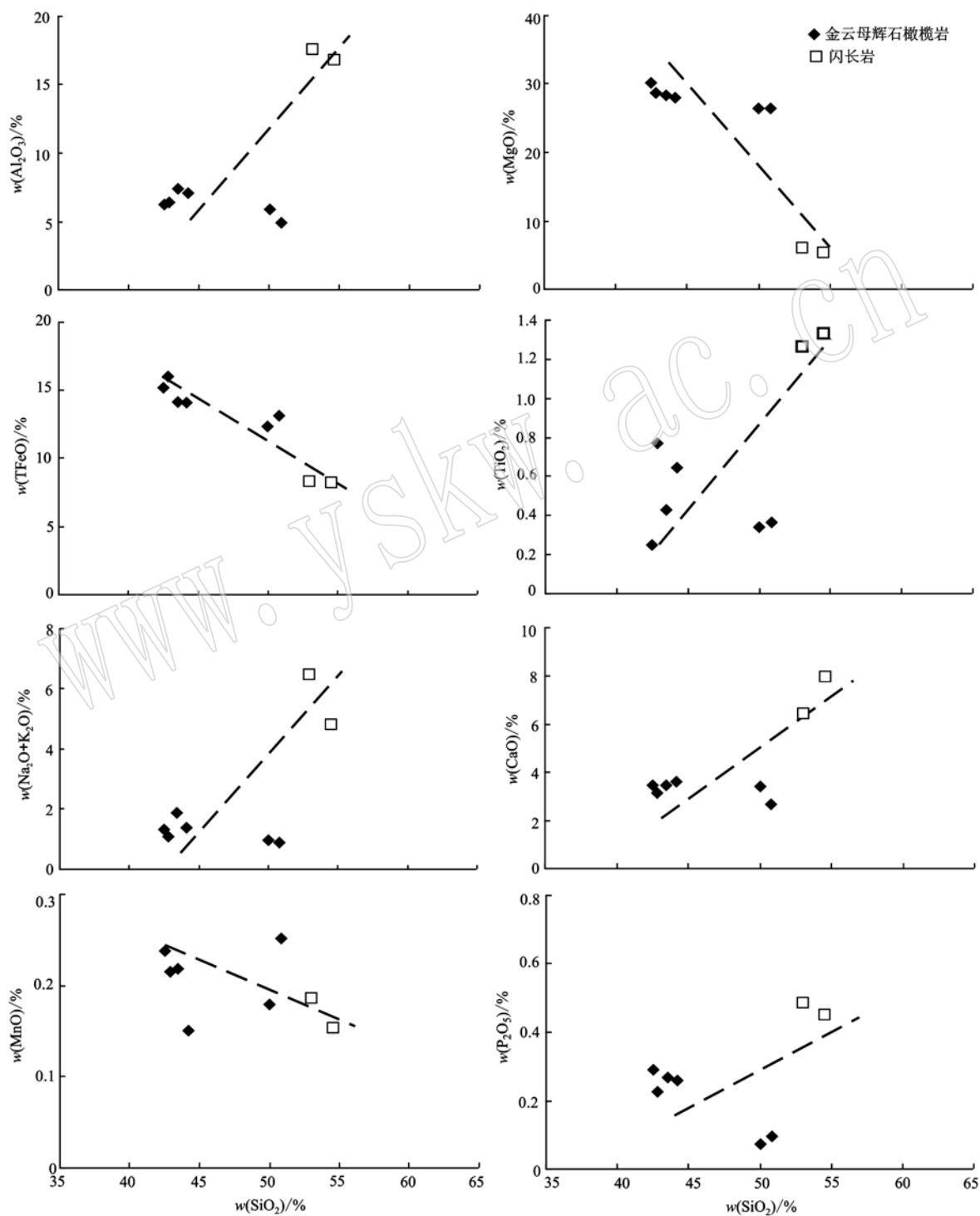


图 6 备战基性-超基性岩主量元素变化图解

Fig. 6 Major oxide variations in the Beizhan basic-ultrabasic pluton

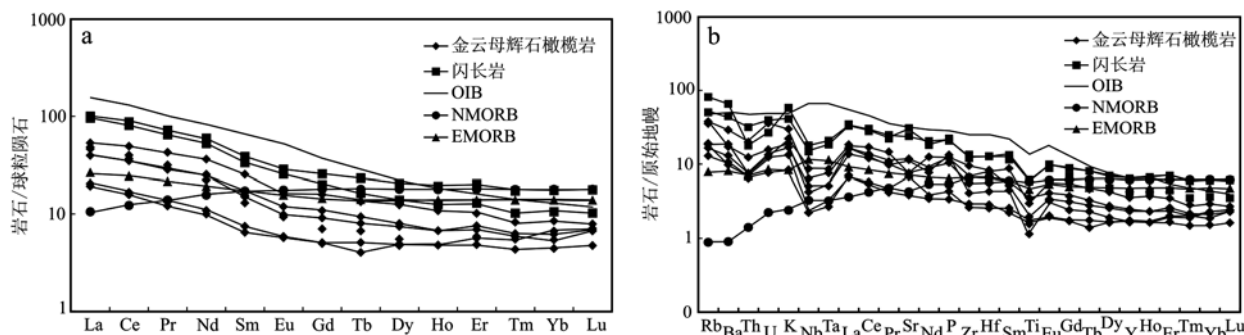


图 7 备战基性-超基性岩球粒陨石标准化图解(a)和微量元素原始地幔标准化图解(b) (OIB、NMORB、EMORB、原始地幔标准化数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace element diagrams (b) of the Beizhan basic-ultrabasic rocks (OIB, NMORB, EMORB, primitive mantle normalization values after Sun and McDonough, 1989)

($26.39 \times 10^{-6} \sim 79.47 \times 10^{-6}$)。所有岩石的 δEu 异常和 δCe 异常不明显。轻稀土元素分异较弱 [$(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 2.10 \sim 3.54$]，重稀土元素间分异也不明显 [$(\text{Gd}/\text{Lu})_{\text{N}} = 0.71 \sim 2.00$]，相比之下，轻重稀土元素间的分异稍大 [$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 2.89 \sim 10.42$]。各岩石同样具有相似的微量元素分配模式(图 7b)，具有明显富集大离子亲石元素 Rb、Ba、U、K，亏损高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti 的特征，显示出岛弧

火山岩和大陆地壳岩石的特征。

4.4 全岩 Sr-Nd 同位素特征

岩石的 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素分析结果列于表 4，采用 $t = 300 \text{ Ma}$ ，计算得金云母辉石橄榄岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}} = 0.7044 \sim 0.7047$ ， $\varepsilon\text{Nd}(t) = 2.23 \sim 3.90$ ，闪长岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}} = 0.7044$ ， $\varepsilon\text{Nd}(t) = 3.79 \sim 4.07$ ，总体上 Sr、Nd 同位素较均一，与大哈拉军山组火山岩的 Sr-Nd 同位素组成相似(图 8a)。

表 4 备战基性-超基性岩 Sr-Nd 同位素组成
Table 4 Sr-Nd isotopic compositions of Beizhan basic-ultrabasic pluton

样品号	金云母辉石橄榄岩					闪长岩	
	LBZ-25	LBZ-30	LBZ-40	LBZ-28	LBZ-45	LBZ-46	LBZ-48
$w(\text{Rb})/10^{-6}$	21.91	23.41	9.92	11.42	8.01	28.91	50.76
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	224.30	232.90	147.10	72.73	135.90	551.80	722.90
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.2815	0.2896	0.1944	0.4527	0.1700	0.1510	0.2024
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.70575	0.70560	0.70554	0.70644	0.70535	0.70508	0.70522
$\pm 1\sigma$	2	7	7	8	8	3	1
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}}$	0.7045	0.7044	0.7047	0.7045	0.7046	0.7044	0.7044
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	1.833	2.291	2.527	0.949	1.089	5.549	4.656
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	10.070	11.710	12.060	4.514	5.169	26.460	24.090
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1101	0.1183	0.1268	0.1271	0.1275	0.1269	0.1170
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512589	0.512684	0.512615	0.512673	0.512638	0.512695	0.512690
$\pm \sigma$	5	7	4	4	8	4	4
$\varepsilon\text{Nd}(t)$	2.36	3.90	2.23	3.35	2.65	3.79	4.07
t_{DM}/Ma	827	746	939	841	906	801	727

注：球粒陨石均一储库 ($^{143}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$)_{CHUR} = 0.512638，($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_{CHUR} = 0.1967， $\lambda_{\text{Rb}} = 1.42 \times 10^{-11}/\text{a}$ (Steiger and Jäger, 1977)， $\lambda_{\text{Sm}} = 6.54 \times 10^{-12}/\text{a}$ (Lugmair and Hart, 1978)， $t = 300 \text{ Ma}$ 。

4.5 橄榄石成分特征

根据电子探针分析结果(表 5)可知备战金云母辉石橄榄岩中橄榄石的 FeO 含量较低，介于 19.22% ~ 22.20% 之间，MgO 含量较高，介于 39.52% ~ 41.30% 之间，橄榄石的成分非常均一，Fo 值为 0.76

~0.79，属于贵橄榄石。橄榄石的 CaO 含量非常低，介于 0.00% ~ 0.03% 之间，基本上在电子探针的检测线以下，属于低钙橄榄石 ($\text{CaO} < 0.15\%$ ，Kamenetsky *et al.*, 2006)。

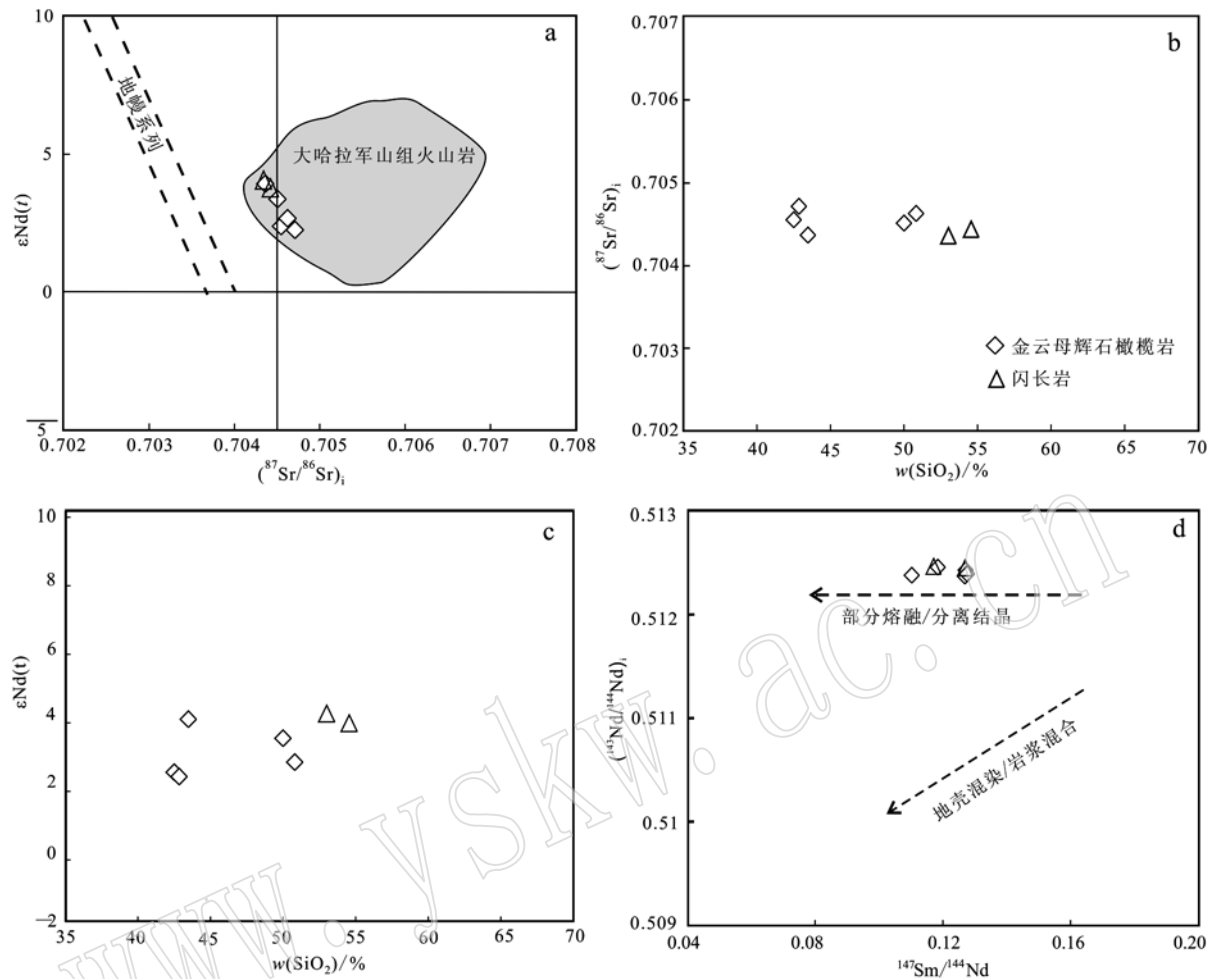


图 8 备战基性-超基性岩 $\epsilon Nd(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图(a)、 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i - SiO_2$ 图(b)、 $\epsilon Nd(t) - SiO_2$ 图(c)和 $(^{143}Nd/^{144}Nd)_i - ^{147}Sm/^{144}Nd$ 图(d)

Fig. 8 $\epsilon Nd(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ diagram (a), $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i - SiO_2$ diagram (b), $\epsilon Nd(t) - SiO_2$ diagram (c), $(^{143}Nd/^{144}Nd)_i - ^{147}Sm/^{144}Nd$ diagram (d) of the Beizhan basic-ultrabasic pluton

大哈拉军山组火山岩的 Sr-Nd 同位素组分主要区域据钱青等(2006)、朱永峰等(2006)、林靛等(2015)和段士刚等(2014)
The Sr-Nd isotopes of Dahalajunshan Formation after Qian Qing *et al.* (2006), Zhu Yongfeng *et al.* (2006), Lin Liang *et al.* (2015)
and Duan Shigang *et al.* (2014)

表 5 备战金云母辉石橄榄岩中橄榄石电子探针分析数据表

$w_B/\%$

Table 5 Electron microprobe analyses of olivines from the Beizhan phlogopite pyroxene peridotite

样品点号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	NiO	Total	Fo
LBZ-25-1-1	39.12	0.01	0.02	20.29	0.24	40.67	0.02	0.01	0.01	0.03	0.03	0.14	100.57	0.78
LBZ-25-1-2	39.06	0.04	0.01	21.80	0.20	40.31	0.02	0.00	0.01	0.03	0.01	0.16	101.64	0.77
LBZ-25-1-3	39.18	0.00	0.02	22.11	0.19	40.30	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.13	101.97	0.77
LBZ-25-2	38.39	0.02	0.02	22.15	0.18	39.60	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.16	100.56	0.76
LBZ-25-3	38.60	0.03	0.02	22.20	0.23	39.52	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.21	100.86	0.76
LBZ-28-2	39.29	0.00	0.00	19.35	0.09	41.30	0.02	0.04	0.00	0.06	0.00	0.16	100.32	0.79
LBZ-28-3	39.24	0.03	0.00	19.89	0.20	40.93	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.29	100.62	0.79
LBZ-24-1	38.71	0.00	0.01	19.22	0.15	40.95	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.16	99.25	0.79
LBZ-30-1	39.56	0.04	0.00	20.79	0.24	40.14	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.10	100.91	0.78
LBZ-40-2	39.51	0.03	0.00	19.42	0.24	40.89	0.00	0.01	0.00	0.04	0.05	0.20	100.39	0.79
LBZ-45-6	38.99	0.02	0.00	20.01	0.26	40.01	0.01	0.00	0.00	0.15	0.03	0.21	99.69	0.78
LBZ-40t-2	39.61	0.01	0.02	19.36	0.23	40.70	0.03	0.00	0.00	0.02	0.01	0.22	100.20	0.79

5 讨论

5.1 岩石成因

5.1.1 地壳混染和分离结晶作用

备战基性-超基性岩具有较高的 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值 (2.23 ~ 4.07) 和较低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值 (0.704 4 ~ 0.704 7) (图 8a、表 4), 且 Sr、Nd 同位素组成变化范围小, 暗示岩浆演化过程中未受到明显地壳混染作用。此外, 备战矿区基性-超基性岩的 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 和 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 与 SiO_2 间没有线性关系 (图 8b、8c), 表明这些岩石形成之前并没有经历地壳混染作用, 这与 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ - $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 图 (图 8d) 相吻合。并且这些岩石的 Th/Ce 值为 0.02 ~ 0.07, 明显低于大陆地壳的 Th/Ce 值 (0.11 ~ 0.17) (Taylor and McLennan, 1995), 而与地幔起源岩浆的 Th/Ce 值 (0.02 ~ 0.05) 相近 (Sun and McDonough, 1989), 表明地壳物质没有对这些岩石产生影响。

金云母辉石橄榄岩与闪长岩具有相似的稀土元素球粒陨石标准化配分模式和微量元素原始地幔标准化配分模式 (图 6、图 7), 并且金云母辉石橄榄岩中金云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 298.1 ± 1.9 Ma, 锆石 U-Pb 年龄为 302.5 ± 1.3 Ma, 与闪长岩锆石 U-Pb 年龄 299.2 ± 1.4 Ma (段士刚, 未发表数据) 相近。这表明金云母辉石橄榄岩和闪长岩为同源演化岩石, 即由原始岩浆分离结晶而成。从主量元素变化图解 (图 6) 中可以看出, 随着 SiO_2 含量的升高, Al_2O_3 、 TiO_2 、 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 、 CaO 、 P_2O_5 含量增高, 而 TFeO 、 MgO 、 MnO 含量降低。这些特征表明, 备战基性-超基性岩岩浆经历了橄榄石+斜方辉石的分离结晶作用。 Al_2O_3 、 CaO 和 SiO_2 之间的正相关关系表明斜长石不是主要的结晶相, 这与显微镜下特征相符。因此, 不明显的 δEu 异常是继承地幔源区的特征。 Eu 在自然界中存在 Eu^{2+} 和 Eu^{3+} 两种价态, Eu^{2+} 在斜长石中具有很强的相容性, 在氧逸度增加的情况下 Eu^{2+} 被氧化成 Eu^{3+} , Eu^{3+} 与斜长石不相容, 则熔体中 δEu 负异常程度降低。有研究表明氧逸度升高会使斜长石中 δEu 的异常程度降低 (Hanson, 1980), 所以岩浆源区很可能有较高的氧逸度。

5.1.2 母岩浆性质与岩浆源区

金云母辉石橄榄岩中橄榄石的 CaO 含量虽然小于 0.1%, 介于 0.00 ~ 0.03% 之间, 但是缺乏地幔捕虏晶的扭折带, 呈自形-半自形状, 中心到边缘无分

带结构, 为均一的橄榄石颗粒, 而且橄榄石的 Fo 值较低, 最高仅为 0.79 (表 5), 不同于地幔橄榄石 (Fo > 0.9), 所以可以认为橄榄石为岩浆中结晶的橄榄石, 而非地幔捕虏晶。因此, 可以利用橄榄石-熔体平衡原理 ($K_D^{\text{Ol/Melt}} = 0.3 \pm 0.03$, Roeder and Emslie, 1970) 估算岩体母岩浆的基本成分特征。张招崇等 (2003) 基于该平衡原理推导获得橄榄石 Fo 值和平衡熔体的 FeO、MgO 含量存在以下关系:

$$w_{\text{MgO}}/w_{\text{FeO}} = 0.56096 \times K_D \times \text{Fo} / (1 - \text{Fo}) \quad (1)$$

$$\text{平衡熔体 } \text{Mg}^\# = X_{\text{Melt}}^{\text{MgO}} / (X_{\text{Melt}}^{\text{FeO}} + X_{\text{Melt}}^{\text{MgO}}) =$$

$$K_D \times \text{Fo} / (K_D \times \text{Fo} + 1 - \text{Fo}) \quad (2)$$

式中, w_{FeO} 和 w_{MgO} 分别为平衡熔体中 MgO 和 FeO 的质量分数, $X_{\text{Melt}}^{\text{FeO}}$ 、 $X_{\text{Melt}}^{\text{MgO}}$ 分别为 FeO、MgO 在熔体中的摩尔分数。

备战金云母辉石橄榄岩 Fo 值最高为 0.79, 由橄榄石最高 Fo 值和公式 (2) 可计算获得与橄榄石平衡的岩浆 $\text{Mg}^\#$ 值为 0.53, 由于幔源原始岩浆 $\text{Mg}^\#$ 值一般为 0.68 ~ 0.73, 说明备战金云母辉石橄榄岩母岩浆经由原始岩浆演化而形成。由 (1) 式可得与橄榄石共存熔体的 $w_{\text{MgO}}/w_{\text{FeO}}$ 为 0.63, 而备战金云母辉石橄榄岩样品的 MgO/TFeO 为 1.66 ~ 2.03, 闪长岩的 MgO/TFeO 为 0.67 ~ 0.70, 均大于 0.63, 表明各岩石样品成分均不能代表与橄榄石共存的熔体成分。此外, 金云母辉石橄榄岩的 $\text{Mg}^\#$ 值为 0.76 ~ 0.79, 均高于幔源原始岩浆的 $\text{Mg}^\#$ 值 (0.68 ~ 0.73), 也高于与 Fo 值最高的橄榄石平衡的岩浆 $\text{Mg}^\#$ 值 (0.53), 表明金云母辉石橄榄岩发生了橄榄石堆晶, 这与岩石发育包橄结构 (正堆晶结构) (图 3b、3c、3d) 以及岩石含有较高的 Cr ($523 \times 10^{-6} \sim 7026 \times 10^{-6}$)、Ni ($906 \times 10^{-6} \sim 1088 \times 10^{-6}$)、Co ($109 \times 10^{-6} \sim 132 \times 10^{-6}$) 含量相符。金云母辉石橄榄岩中橄榄石为贵橄榄石, 贵橄榄石堆晶对岩石的 MgO 含量影响较大, 但对其 TFeO 含量影响较小, 因此可以根据现有岩石样品的 TFeO 含量估算出母岩浆的 MgO 含量, 从而定性地约束母岩浆 MgO 含量的大致范围。金云母辉石橄榄岩全岩的 TFeO 含量为 12.33% ~ 15.99%, 平均为 14.14, 假设全铁的 85% 为亚铁, 那么 FeO 含量为 10.48% ~ 13.59%, 平均为 12.02%, 由公式 (1) 可得平衡熔体的 MgO 含量为 6.63% ~ 8.60%, 平均为 7.61%, 因此, 其母岩浆为玄武质岩浆。换言之, 金云母辉石橄榄岩是由玄武质岩浆外加橄榄石堆晶而成。

备战基性-超基性岩具有较低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值

(0.704 4 ~ 0.704 7) 和较高的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值 (2.23 ~ 4.07), 具有亏损地幔的特征, 这与其富集 LREE 和大离子亲石元素 (Rb、Ba、U、K) 的特征不一致, 说明其母岩浆可能起源于地幔柱源区、岩石圈地幔或被交代富集的软流圈地幔。一般岩石圈起源的岩浆会有较高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值 (一般大于 0.704 5) 和负的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值, 并且备战基性-超基性岩的 Sr-Nd 同位素比值与 OIB 相似, 可以说明在 Sr-Nd 同位素组成上软流圈的贡献较大, 因此可以排除岩石圈起源的可能性。虽然, 这些样品的 Sr-Nd 同位素特征与 OIB 相似, 但是在稀土元素和微量元素特征上却与 OIB 有明显的不同, 例如本文样品具有 Nb-Ta 负异常, 不同于 OIB 的 Nb-Ta 正异常, 此外, 相比之下, 稀土元素配分模式和微量元素配分模式与 EMORB 更为相似。值得注意的是, 岩石具有一些弧岩浆的特征, 比如具有较高的 $(\text{Th}/\text{Nb})_{\text{PM}}$ 值 (0.84 ~ 3.10, 大于或接近于 1)、较低的 Nb/La 值 (0.28 ~ 0.57 < 1) 以及明显的 Nb、Ta、Ti 负异常, 然而较高的 Zr/Y 值 (3.68 ~ 10 > 3) 却与岛弧岩浆不符 (夏林圻等, 2007), 因此这些特征可能指示源区保留了早期大洋板块俯冲交代富集的特征, 也可能与地壳同化混染有关 (Wilson, 1989)。然而上文同位素特征显示该基性-超基性岩的母岩浆尚未经历地壳混染作用, 所以, 备战基性-超基性岩的这种弧岩浆特征主要是继承了源区的特征, 而不是地壳混染所引起, 其源区可能存在与俯冲作用相关的物质加入, 即软流圈地幔经历了俯冲流体/熔体的交代改造作用, 这一过程产生的岩浆通常具有富水、高氧逸度的特征。该区金云母辉石橄榄岩的岩石学特征与这些特征均吻合, 比如发育大量的金云母和一些角闪石相, 暗示其岩浆是富含挥发分的, 特别是富水的, 含水岩浆的发育表明软流圈地幔在侵位之前已经被俯冲流体交代; 并且俯冲流体交代事件很可能引起了源区的氧逸度升高, 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线中 (图 7a) 不明显的 δEu 异常佐证了岩浆源区很可能有较高的氧逸度。源区的这种交代富集事件很大程度上与塔里木板块北缘构造带在晚古生代期间的板片俯冲有关, 并且是板片的高角度俯冲 (张招崇等, 2016) 才能使软流圈地幔被俯冲流体/熔体交代, 因为低角度的板片俯冲深度可能只能对岩石圈地幔产生影响。

由上文讨论可知, 稀土元素不明显的 δEu 异常是继承地幔源区的特征, 表明岩浆源区很可能有较高的氧逸度。岩石较低的 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值 (0.37 ~

0.58) 反映了其形成压力较低 (Hirose and Kushiro, 1993; Baker and Stolper, 1994)。研究表明重稀土元素在石榴石中是相容的, 在尖晶石中则是不相容的 (Mysen, 1979; Irving and Frey, 1984; McKenzie and O'Nions, 1991; Kinzler, 1997), 因此本文岩石样品较平坦的重稀土元素球粒陨石标准化配分曲线暗示备战基性-超基性岩起源于压力相对较低、氧逸度相对较高的尖晶石相橄榄岩区。研究表明, 通常尖晶石相稳定区的深度小于 75 ~ 80 km (McKenzie and Bickle, 1988; Robinson and Wood, 1998), 所以备战基性-超基性岩起源于相对较浅的软流圈地幔, 换言之, 其上覆的是减薄的岩石圈地幔, 而这种岩石圈地幔的减薄可能与软流圈物质上涌有关。

5.2 深部动力学背景

近年来, 年龄测试数据显示阿吾拉勒铁成矿带东段与铁矿有关的火山岩年龄范围在 330 ~ 300 Ma 左右 (表 6), 并有学者 (Zhang *et al.*, 2014b) 经过统计分析认为该区有 2 期铁成矿事件, 第 1 期为早石炭世 (336 ~ 320 Ma), 第 2 期为晚石炭世 (316 ~ 300 Ma)。本次测得的金云母辉石橄榄岩中金云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 298.1 ± 1.9 Ma, 锆石 U-Pb 年龄为 302.5 ± 1.3 Ma, 属于第 2 期成矿事件的晚期范畴, 在误差允许的范围内, 与备战铁矿第 2 期成矿年龄相近 (韩琼等, 2015a, 表 6)。这从时间上表明备战铁矿晚期成矿事件与该金云母辉石橄榄岩可能均为同一地质事件的产物, 具有类似的深部动力学背景。

目前, 对于西天山造山带晚古生代的深部动力学背景主要观点有造山带根部的拆沉 (Sun *et al.*, 2008)、俯冲板片的断离 (Yang *et al.*, 2012) 和俯冲板片的回卷 (slab roll-back, Tang *et al.*, 2012, 2014) 等。这 3 种模式均能引发软流圈地幔物质上涌, 但是后两种模式需要板片的持续俯冲, 然而北天山蛇绿混杂岩带中最老的钉合岩体年龄约 316 Ma (Han *et al.*, 2010), 表明伊犁板块和准噶尔板块在 316 Ma 之前已经碰撞闭合。此外, 前人对蛇绿岩、高压变质岩、岛弧火山岩和花岗岩的年代学研究加上古地磁资料和沉积地层表明, 南天山洋在晚石炭世 (约 300 Ma) 闭合 (Gao *et al.*, 2009, 2011; Zhu *et al.*, 2009; Su *et al.*, 2010; Han *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2011; Jiang *et al.*, 2014b; 林靛等, 2015); 而北天山洋则可能在晚石炭世早期闭合 (王博等, 2006; Wang *et al.*, 2009; 林靛等, 2015)。韩宝福等 (2010) 认为北天山缝合带形成于晚石炭世早期

表6 阿吾拉勒铁成矿带东段火山岩年龄数据汇总表

Table 6 Dating data of volcanic rocks from the east of the Awulale metallogenic belt

铁矿名	岩石名称	测试方法	年龄/Ma	参考文献
备战	铁矿石	黄铁矿 Re-Os	302.5 ± 8.2	Duan <i>et al.</i> , 2017
	铁矿石	白云母 Ar-Ar	308 ~ 304	Duan <i>et al.</i> , 2017
	花岗斑岩	锆石 U-Pb	301 ± 1	韩琼等, 2013
	花岗岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	299 ± 2.5	Zhang <i>et al.</i> , 2014b
	英安岩	锆石 SHRIMP U-Pb	300.4 ± 2.2	Zhang <i>et al.</i> , 2014b
	钠长岩	锆石 SHRIMP U-Pb	308.7 ± 2.1	Zhang <i>et al.</i> , 2014b
	凝灰岩	锆石 SHRIMP U-Pb	303 ± 2.1	Zhang <i>et al.</i> , 2014b
	流纹岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	301.3 ± 0.8	Zhang <i>et al.</i> , 2012a
	英安岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	303.7 ± 0.9	Zhang <i>et al.</i> , 2012a
	英安岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	329.1 ± 1.0	孙吉明等, 2012
	英安岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	296.7 ± 2.0	孙吉明等, 2012
	花岗岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	307 ± 1.2	孙吉明等, 2012
	流纹岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	316.1 ± 2.2	李大鹏等, 2013
查岗诺尔	凝灰岩	锆石 SHRIMP U-Pb	329.9 ± 3.7	Zhang <i>et al.</i> , 2014b
	花岗岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	325.9 ± 2.7	Zhang <i>et al.</i> , 2014b
	含矿夕卡岩	石榴子石 Sm-Nd 等时线年龄	316.8 ± 6.7	洪为等, 2012
	闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	303.8 ± 1.3	蒋宗胜等, 2012
	流纹岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	301.8 ± 0.9	蒋宗胜等, 2012
智博	安山岩	锆石 SHRIMP U-Pb	310 ± 3	Zhang <i>et al.</i> , 2014b
	英安岩	锆石 SHRIMP U-Pb	307 ± 3	Zhang <i>et al.</i> , 2014b
	凝灰岩	锆石 SHRIMP U-Pb	336 ± 4	Zhang <i>et al.</i> , 2014b
	英安岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	300.3 ± 1.1	蒋宗胜等, 2012
	闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	305 ± 1.1	蒋宗胜等, 2012
	闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	318.9 ± 1.5	Zhang <i>et al.</i> , 2012b
	花岗岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	304.1 ± 1.8	Zhang <i>et al.</i> , 2012b
	花岗岩脉	锆石 LA-ICPMS U-Pb	320.3 ± 2.5	Zhang <i>et al.</i> , 2012b
	花岗岩脉	锆石 LA-ICPMS U-Pb	294.5 ± 1.6	Zhang <i>et al.</i> , 2012b
	矿石	榍石 LA-ICPMS U-Pb	315 ~ 310	蒋宗胜, 2014
敦德	花岗岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	300.7 ± 2	Zhang <i>et al.</i> , 2014b
	英安岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	316 ± 1.7	Duan <i>et al.</i> , 2014

(325 ~ 316 Ma 之间), 而南天山缝合带形成于晚石炭世(320 ~ 300 Ma 之间)。因此, 在 300 Ma 之后, 南天山洋和北天山洋可能都已经闭合, 西天山造山带结束了碰撞造山过程, 进入了后碰撞演化阶段。

因此, 从岩石年代学的角度来看, 西天山造山带在晚石炭世最有可能的深部动力学模式为造山带根部拆沉。然而当造山带发展到根部拆沉的阶段, 基本上是进入了板内演化阶段, 因此在解释源区存在流体/熔体交代等岛弧岩浆特征时遇到了困难。尽管如此, 笔者认为在增生造山刚结束, 伊犁微陆块深部的地幔源区可能仍保存有消减带之上地幔楔的特点, 即仍保留有岛弧岩浆的特征。此外, 西天山造山带的岩石圈厚度的确比北侧准噶尔和南侧塔里木板块薄(肖序常等, 2004; Sun *et al.*, 2008), 也佐证了造山带根部拆沉的可能性。并且, 最新的研究也认为西天山阿吾拉勒铁成矿带在晚古生代具有造山带

根部拆沉的深部动力学背景(Duan *et al.*, 2017)。造山带根部拆沉诱发软流圈物质上涌, 软流圈地幔物质发生减压熔融并底侵到造山带莫霍面附近, 热流通常会导致花岗质岩浆的产生和岩浆混合作用过程, 这与该区发育大量同时代的花岗岩(孙吉明等, 2012; Zhang *et al.*, 2012b; 韩琼等, 2013; Zhang *et al.*, 2014b)和岩浆混合包体相吻合(图 3f)。造山带根部拆沉作用通常会导致大量的脉岩侵位, 在备战矿区发育大量的中基性岩脉(图 3e)可能是造山带根部拆沉作用的表现。因此, 备战基性-超基性岩形成的深部动力学背景为后碰撞造山挤压-伸展过渡背景下造山带根部拆沉导致软流圈地幔上涌。基于上文的讨论, 可以推断备战铁矿晚期成矿事件可能也有类似的成矿动力学背景, 可进一步理解为备战铁矿的成矿物质来源于深部岩浆(另文讨论)。此外, 备战基性-超基性岩为铁质-富铁质岩

石,也佐证其为铁矿的形成提供富铁源区的可能性。

6 结论

(1) 备战金云母辉石橄榄岩具有低 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量,而高 MgO 、 TFeO 含量的特征,闪长岩具高 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 和 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量,低 MgO 、 TFeO 含量的特征,在岩浆演化过程中未受到明显地壳混染作用,其母岩浆为玄武质岩浆。金云母辉石橄榄岩为玄武质岩浆加橄榄石堆晶而成。

(2) 备战金云母辉石橄榄岩具有较低的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值(0.704 4~0.704 7)和较高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(2.23~4.07),富集 LREE 和大离子亲石元素(Rb、Ba、U、K),重稀土元素球粒陨石标准化曲线较为平坦。该岩石起源于压力相对较低、氧逸度相对较高的尖晶石相橄榄岩区(<75~80 km),即相对较浅的软流圈地幔。

(3) 岩石具有一些弧岩浆的特征,是源区软流圈地幔在侵位之前经历了俯冲流体/熔体改造的结果。

(4) 备战金云母辉石橄榄岩的金云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 298.1 ± 1.9 Ma,锆石 U-Pb 年龄为 302.5 ± 1.3 Ma,与备战铁矿的晚期成矿年龄相近,与备战铁矿晚期成矿是同一地质事件的产物。岩石形成的深部动力学背景为后碰撞造山挤压-伸展过渡背景下造山带根部拆沉导致软流圈地幔上涌,而软流圈源区很可能为备战铁矿晚期成矿事件提供了富铁源区。

致谢 野外工作得到了备战铁矿各级领导和矿区项目组成员的大力支持,测试分析工作得到中国地质科学院地质研究所同位素实验室、国家地质实验测试中心和中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室相关工作人员的大力协助,审稿人为本人的修改提出了很多宝贵意见,编辑老师为稿子的顺利出版付出了辛勤的劳动,在此一并表示感谢!

References

- Allen M B, Windley B F, Zhang C, *et al.* 1992. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, central Asia[J]. *Tectonophysics*, 220: 89~115.
- Andersen T, Griffin W L, Pearson N J, *et al.* 2002. Crustal evolution in the SW part of the Baltic Shield: the Hf isotope evidence[J]. *Journal of Petrology*, 43: 1 725~1 747.
- Baker M B and Stolper E M. 1994. Determining the composition of high pressure mantle melts using diamond aggregates[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58: 2 811~2 827.
- Che Zicheng, Liu Liang, Liu Hongfu, *et al.* 1996. Review on the ancient Yili rift, Xinjiang, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 12 (3): 478~490 (in Chinese with English abstract).
- Chen Danling, Liu Liang, Che Zhicheng, *et al.* 2001. Geochemical characteristics and tectonic implication of Carboniferous volcanites in the Luotugou area of Middle Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17 (3): 378~384 (in Chinese with English abstract).
- Chen Wen, Zhang Yan, Zhang Yueqiao, *et al.* 2006. Late Cenozoic episodic uplifting in southeastern part of the Tibetan plateau-evidence from Ar-Ar thermochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (4): 867~872 (in Chinese with English abstract).
- Duan S G, Zhang Z H, Jiang Z S, *et al.* 2014. Geology, geochemistry, and geochronology of the Dundu iron-zinc ore deposit in western Tianshan, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 57: 441~461.
- Duan S G, Zhang Z H, Wang D C, *et al.* 2017. Pyrite Re-Os and muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Beizhan iron deposit in the Chinese Tianshan Orogen and its geological significance[J]. *International Geology Review*, <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2017.1318721>.
- Duan Shigang, Zhang Zuoheng, Wei Mengyuan, *et al.* 2014. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of the diorite associated with the Wuling iron deposit in Western Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 41(6): 1 757~1 770 (in Chinese with English abstract).
- Gao J and Klemd R. 2003. Formation of HP-LT rocks and their tectonic implications in the western Tianshan Orogen, NW China: geochemical and age constraints[J]. *Lithos*, 66(1~2): 1~22.
- Gao J, Klemd R, Qian Q, *et al.* 2011. 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*, 499(1): 118~131.
- Gao J, Li M S, Xiao X C, *et al.* 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China[J]. *Tectonophysics*, 287(1~4): 213~231.
- Gao J, Long L L, Klemd R, *et al.* 2009. Tectonic evolution of the South Tianshan orogen and adjacent regions, NW China: Geochemical and age constraints of granitoid rocks[J]. *International Journal of Earth*

Allen M B, Windley B F, Zhang C, *et al.* 1992. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, central Asia[J].

- Sciences, 98: 1 221 ~ 1 238.
- Gao Jun, Qian Qing, Long Lingli, *et al.* 2009. Accretionary orogenic process of Western Tianshan, China [J]. Geological Bulletin of China, 28: 1 804 ~ 1 816 (in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, Guo Zhaojie and He Guoqi. 2010. Timing of major suture zones in North Xinjiang, China: Constraints from stitching plutons [J]. Acta Petrologica Sinica, 26(8): 2 233 ~ 2 246 (in Chinese with English abstract).
- Han B F, Guo Z J, Zhang Z C, *et al.* 2010. Age, geochemistry, and tectonic implications of a late Paleozoic stitching pluton in the North Tian Shan suture zone, western China [J]. Geological Society of America Bulletin, 122(3 ~ 4): 627 ~ 640.
- Han B F, He G Q, Wang X C, *et al.* 2011. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan-Yili terranes in the western segment of the South Tian Shan Orogen, Central Asia, and implications for the Northern Xinjiang, western China [J]. Earth-Science Reviews, 109(3): 74 ~ 93.
- Han Qiong, Gong Xiaoping, Cheng Songlin, *et al.* 2015a. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of volcanic rocks in Beizhan iron ore of the West Tianshan [J]. Acta Geologica Sinica, 89(1): 70 ~ 82 (in Chinese with English abstract).
- Han Qiong, Gong Xiaoping, Ma Huadong, *et al.* 2015b. Temporal and spatial distribution of Dahalajunshan Group volcanic rocks in the Awulale Metallogenic belt of West Tianshan Mountains and its geological significance [J]. Geology in China, 42(3): 570 ~ 586 (in Chinese with English abstract).
- Han Qiong, Gong Xiaoping, Mao Lei, *et al.* 2013. Study on the metallogenic epoch and mineral genesis of Beizhan iron ore in western Tianshan [J]. Xinjiang Geology, 31(2): 136 ~ 140 (in Chinese with English abstract).
- Hanson G N. 1980. Rare earth elements in petrogenetic studies of igneous systems [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 8: 371 ~ 406.
- Hirose K and Kushiro I. 1993. Partial melting of dry peridotites at high pressures: Determination of compositions of melts segregated from peridotite using aggregates of diamond [J]. Earth and Planetary Science Letters, 114: 477 ~ 489.
- Hong Wei, Zhang Zuoheng, Li Huaqin, *et al.* 2012. Metallogenic epoch of Chagangnuoer iron deposit in western Tianshan Mountains, Xinjiang: Information for garnet Sm-Nd isochron age [J]. Mineral Deposits, 31: 1 067 ~ 1 074 (in Chinese with English abstract).
- Hoskin P W O and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 27 ~ 62.
- Irving A J and Frey F A. 1984. Trace element abundances in megacrysts and their host basalts: Constraints on partition coefficients and megacryst genesis [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 48: 1 201 ~ 1 221.
- Jahn B M, Wu F Y and Chen B. 2000. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic [J]. Episodes, 23: 82 ~ 92.
- Jiang Changyi, Wu Wenkui, Zhang Xueren, *et al.* 1995. The change from island arc to rift valley-evidence from volcanic rocks in Awulale area [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 14(4): 289 ~ 300 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Changyi, Wu Wenkui, Zhang Xueren, *et al.* 1996. Magma action and tectonic evolution in Awulale district, Western Tianshan Mountain [J]. Journal of Xi'an College of Geology, 18(2): 18 ~ 24 (in Chinese with English abstract).
- Jiang T, Gao J, Klemd R, *et al.* 2014b. Paleozoic ophiolitic mélanges from the South Tianshan Orogen, NW China: Geological, geochemical and geochronological implications for the geodynamic setting [J]. Tectonophysics, 612: 106 ~ 127.
- Jiang Zongsheng. 2014. Carboniferous Volcanism and Fe Mineralization at the Zhibo Iron Deposit in the Western Tianshan [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Jiang Zongsheng, Zhang Zuoheng, Hou Kejun, *et al.* 2012. Geochemistry and zircon U-Pb age of volcanic rocks from the Chagangnuoer and Zhibo iron deposits, western Tianshan, and their geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 28(7): 2 074 ~ 2 088 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Z S, Zhang Z H, Wang Z H, *et al.* 2014a. Geology, geochemistry, and geochronology of the Zhibo iron deposit in the Western Tianshan, NW China: Constraints on metallogenesis and tectonic setting [J]. Ore Geology Reviews, 57: 406 ~ 424.
- Kamenetsky V S, Elburg M, Arculus R, *et al.* 2006. Magmatic origin of low-Ca olivine in subduction-related magmas: Co-existence of contrasting magmas [J]. Chemical Geology, 233: 346 ~ 357.
- Kinzler R J. 1997. Melting of mantle peridotite at pressures approaching the spinel to garnet transition: Application to mid-ocean ridge basalt petrogenesis [J]. Journal of Geophysical Research, 102: 853 ~ 874.
- Li Dapeng, Du Yangsong, Pang Zhenshan, *et al.* 2013. Zircon U-Pb chronology and geochemistry of carboniferous volcanic rocks in Awulale Area, Western Tianshan Mountains [J]. Acta Geoscientia Sinica, 34(2): 176 ~ 192 (in Chinese with English abstract).

- Li Jilei, Su Wen, Zhang Xi, *et al.* 2009. Zircon Cameca U-Pb dating and its significance for granulite-facies granitic gneisses from the west Awulale Mountains, West Tianshan[J]. Geological Bulletin of China, 28: 1 852 ~ 1 862 (in Chinese with English abstract).
- Li J W, Zhao X F, Zhou M F, *et al.* 2008. Origin of the Tongshankou porphyry-skarn Cu-Mo deposit, eastern Yangtze craton, Eastern China: geochronological, geochemical, and Sr-Nd-Hf isotopic constraints [J]. Mineralium Deposita, 43(3): 315 ~ 336.
- Li J W, Zhao X F, Zhou M F, *et al.* 2009. Late Mesozoic magmatism from the Daye region, eastern China: U-Pb ages, petrogenesis, and geodynamic implications[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 157: 383 ~ 409.
- Li N B, Niu H C, Shan Q, *et al.* 2015. Two episodes of Late Paleozoic A-type magmatism in the Qunjisayi area, western Tianshan: Petrogenesis and tectonic implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 113: 238 ~ 253.
- Li Q L, Lin W, Su W, *et al.* 2011. SIMS U-Pb rutile age of low-temperature eclogites from southwestern Chinese Tianshan, NW China[J]. Lithos, 122(1): 76 ~ 86.
- Lin Liang, Qian Qing, Wang Yanling, *et al.* 2015. Gabbroic pluton in the Dahalajunshan Formation volcanic rocks from northern Zhaosu, western Tianshan: Age, geochemistry and geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(6): 1 749 ~ 1 760 (in Chinese with English abstract).
- Long Lingli, Gao Jun, Qian Qing, *et al.* 2008. Geochemical characteristics and tectonic settings of Carboniferous volcanic rocks from Yili region, western Tianshan[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(4): 699 ~ 710 (in Chinese with English abstract).
- Long L L, Gao J, Klemd R, *et al.* 2011. Geochemical and geochronological studies of granitoid rocks from the Western Tianshan Orogen: Implications for continental growth in the southwestern Central Asian Orogenic Belt[J]. Lithos, 126: 321 ~ 340.
- Lu Huaifu, Jia Chengzhao, Jia Dong, *et al.* 2001. Features of the thrust wedge of deformation belt in Kuqa Rejuvenation Foreland Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 7(3): 257 ~ 271 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2001. ISOPLOT/EX version 2. 49. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[A]. Berkeley Geochronological Center, Special Publication[C]. No. 1a, Berkeley, CA.
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[A]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication[C]. No. 4a, Berkeley, CA.
- Lugmair G W and Harti K. 1978. Lunar initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$: Differential evolution of the lunar crust and mantle[J]. Earth and Planetary Science Letters, 39: 349 ~ 357.
- McKenzie D P and Bickle M J. 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere[J]. Journal of Petrology, 29: 625 ~ 679.
- McKenzie D and O'Nions R K. 1991. Partial melt distributions from inversion of rare earth elements[J]. Journal of Petrology, 32: 1 021 ~ 1 091.
- Meinert L D, Dipple G M and Nicolescu S. 2005. World skarn deposits [J]. Economic Geology 100th Anniversary Volume, Society of Economic Geologists, Littleton, Colorado, USA: 299 ~ 336.
- Mysen B O. 1979. Trace-element partitioning between garnet peridotite minerals and water-rich vapor: Experimental data from 5 to 30 kbar [J]. American Mineralogist, 64: 274 ~ 287.
- Qian Q, Gao J, Klemd R, *et al.* 2009. Early Paleozoic tectonic evolution of the Chinese South Tianshan Orogen: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb geochronology and geochemistry of basaltic and dioritic rocks from Xiata, NW China[J]. International Journal of Earth Sciences, 98: 551 ~ 569.
- Qian Qing, Gao Jun, Xiong Xianming, *et al.* 2006. Petrogenesis and tectonic setting of Carboniferous volcanic rocks from north Zhaosu, western Tianshan Mountains: Constraints from petrology and geochemistry [J]. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1 307 ~ 1 323 (in Chinese with English abstract).
- Ray G E and Webster I C L. 1999. The Heff Prospect at Heffley Lake, south-central B. C. (092INE096): An unusual example of a mafic-ultramafic-related Cu-Au-REE-bearing magnetite skarn[J]. Geological Fieldwork, 273 ~ 286.
- Robinson J A and Wood B J. 1998. The depth of the spinel to garnet transition at the peridotite solidus[J]. Earth and Planetary Science Letters, 164: 277 ~ 284.
- Roeder P L and Emslie R F. 1970. Olivine-liquid equilibrium[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 29(4): 275 ~ 289.
- Sláma J, Kosler J, Condon D J, *et al.* 2008. Plešovice zircon—A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. Chemical Geology, 249: 1 ~ 35.
- Steiger R H and Jäger E. 1977. Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geochronology and cosmochronology[J]. Earth and Planetary Science Letters, 36: 359 ~ 362.
- Su W, Gao J, Klemd R, *et al.* 2010. U-Pb zircon geochronology of Tianshan eclogites in NW China: Implication for the collision between the Yili and Tarim blocks of the southwestern Altaids[J]. European Journal of Mineralogy, 22(4): 473 ~ 478.

- Sun Jiming, Ma Zhongping, Xu Xueyi, *et al.* 2012. The formation epoch of the host wall rock of the Beizhan iron deposit in West Tianshan Mountains of Xinjiang and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(12): 1 973 ~ 1 982 (in Chinese with English abstract).
- Sun Linhua, Peng Touping and Wang Yuejun. 2007. Geochemical characteristics of basaltic andesites from Dahalajunshan Formation, Southeastern Tekesi (Xinjiang): Petrogenesis and its tectonic significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(3): 372 ~ 379 (in Chinese with English abstract).
- Sun L H, Wang Y J, Fan W M, *et al.* 2008. Post-collisional potassic magmatism in the Southern Awulale Mountain, western Tianshan Orogen: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Gondwana Research*, 14: 383 ~ 394.
- Sun S S and McDonough 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 the Ocean Basins* [C]. Geological Society Special Publication, London, 42: 313 ~ 345.
- Tang G J, Chung S L, Wang Q, *et al.* 2014. Petrogenesis of a Late Carboniferous mafic dike-granitoid association in the western Tianshan: Response to the geodynamics of oceanic subduction[J]. *Lithos*, 202 ~ 203: 85 ~ 99.
- Tang G J, Wang Q, Wyman D A, *et al.* 2012. Metasomatized lithosphere-aesthenosphere interaction during slab roll-back: Evidence from Late Carboniferous gabbros in the Luotuogou area, Central Tianshan [J]. *Lithos*, 155: 67 ~ 80.
- Tang G J, Wang Q, Wyman D A, *et al.* 2010. Geochronology and geochemistry of Late Paleozoic magmatic rocks in the Lamasu-Dabate area, northwestern Tianshan (west China): Evidence for a tectonic transition from arc to post-collisional setting[J]. *Lithos*, 119: 393 ~ 411.
- Taylor S R and McLennan S. 1995. The geochemical composition of the continental crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 33: 241 ~ 265.
- Tian Jingquan, Duan Shigang, Peng Wanlin, *et al.* 2015. Geochemistry of volcanic and intrusive rocks in Zhibo iron ore deposit of western Tianshan Mountains[J]. *Mineral deposits*, 34(1): 119 ~ 138 (in Chinese with English abstract).
- Wang Bangyao and Jiang Changyi. 2011. Petrogenesis and geochemical characteristics of carboniferous volcanic rocks of Chagannur iron deposit area in western Tianshan[J]. *Geological Science and Technology Information*, 30(6): 18 ~ 27 (in Chinese with English abstract).
- Wang Baoyu, Lang Zhijun, Li Xiangdong, *et al.* 1994. Comprehensive Survey of Geological Sections in the West Tianshan of Xinjiang, China[M]. Beijing: Science Press, 202 (in Chinese with English abstract).
- Wang B, Cluzel D, Shu L, *et al.* 2009. Evolution of calc-alkaline to alkaline magmatism through Carboniferous convergence to Permian transcurrent tectonics, western Chinese Tianshan [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1 275 ~ 1 298.
- Wang B, Faure M, Shu L S, *et al.* 2008. Paleozoic tectonic evolution of the Yili Block, western Chinese Tianshan [J]. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 179(5): 483 ~ 490.
- Wang Bo, Shu Liangshu, Cluzel D, *et al.* 2006. Geochemical characteristics and tectonic significance of Carboniferous volcanic rocks in the northern part of the Ili Block, Xinjiang [J]. *Geology in China*, 33 (3): 498 ~ 508 (in Chinese with English abstract).
- Wang B, Shu L S, Cluzel D, *et al.* 2007. Geochemical constraints on Carboniferous volcanic rocks of the Yili Block (Xinjiang, NW China): Implication for the tectonic evolution of Western Tianshan [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29 (1): 148 ~ 159.
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xu Jifeng, *et al.* 2006. Carboniferous adakite-high-Mg andesite-Nb-enriched basaltic rock suites in the Northern Tianshan area: implications for Phanerozoic crustal growth in the Central Asia Orogenic Belt and Cu-Au mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 11 ~ 30 (in Chinese with English abstract).
- Wang Teng, Zhang Zhenliang, Yang Zhengxi, *et al.* 2015. Geological characteristics and tectonic setting of volcanic rocks from Beizhan iron deposit, Western Tianshan Mountain, Xinjiang Autonomous region, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(3): 351 ~ 358 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zuoxun, Wu Jiayi, Liu Chengde, *et al.* 1990. Polycyclic Tectonic Evolution and Metallogeny of the Tianshan Mountains [M]. Beijing: Science Press, 217 (in Chinese with English abstract).
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis* [M]. London: Unwin Hyman, 1 ~ 466.
- Windley B F, Allen M B, Zhang C, *et al.* 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tien Shan Range, central Asia [J]. *Geology*, 18(2): 128 ~ 131.
- Xia L Q, Xu X Y, Xia Z C, *et al.* 2004. Petrogenesis of Carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan, Northwestern China [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 116(3): 419 ~ 433.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, *et al.* 2004. Carboniferous Tianshan igneous megaprovince and mantle plume [J]. *Geological Bulletin of China*, 23(9): 903 ~ 910 (in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, *et al.* 2007. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 77 ~ 89 (in Chinese with English abstract).

- Chinese with English abstract).
- Xiao W J and Santosh M, 2014. The western Central Asian Orogenic Belt: A window to accretionary orogenesis and continental growth[J]. *Gondwana Research*, 25: 1 429 ~ 1 444.
- Xiao W J, Han C M, Yuan C, *et al.* 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2): 102 ~ 117.
- Xiao W J, Windley B F, Allen M B, *et al.* 2013. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1 316 ~ 1 341.
- Xiao Xuchang, Liu Xun and Gao Rui. 2004. Geotranssect of Tianshan-Tarim-Kunlunshan, Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Yan S, Shan Q, Niu H C, *et al.* 2015. Petrology and geochemistry of late Carboniferous hornblende gabbro from the Awulale Mountains, western Tianshan (NW China): Implication for an arc-nascent back-arc environment[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 218 ~ 237.
- Yang W B, Niu H C, Shan Q, *et al.* 2012. Late Paleozoic calc-alkaline to shoshonitic magmatism and its geodynamic implications, Yuxinolegai area, western Tianshan, Xinjiang[J]. *Gondwana Researcher*, 22: 325 ~ 340.
- Zhang X, Klemd R, Gao J, *et al.* 2015. Metallogenesis of the Zhibo and Chaganguoer volcanic iron oxide deposits in the Awulale Iron Metallogenic Belt, Western Tianshan orogen, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 151 ~ 172.
- Zhang X, Tian J Q, Gao J, *et al.* 2012b. Geochronology and geochemistry of granitoid rocks from the Zhibo syngenetic volcanogenic iron ore deposit in the Western Tianshan Mountains (NW-China): Constraints on the age of mineralization and tectonic setting[J]. *Gondwana Research*, 22(2): 585 ~ 596.
- Zhang Yan, Chen Wen, Chen Kelong, *et al.* 2006. Study on the Ar-Ar age spectrum of diagenetic I/S and the mechanism of ^{39}Ar recoil loss: Examples from the clay minerals of P-T boundary in Changxing, Zhejiang Province[J]. *Geological Review*, 52(4): 556 ~ 561(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Chai Fengmei and Xie Qiuhong. 2016. High-angle subduction in a thermal structure with warm mantle-cool crust: Formation of submarine volcanics-hosted iron deposits [J]. *Geology in China*, 43(2): 367 ~ 379(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Hou T, Santosh M, *et al.* 2014c. Spatio-temporal distribution and tectonic settings of the major iron deposits in China, An overview [J]. *Ore Geology Reviews*, 57: 247 ~ 263.
- Zhang Zhaochong and Wang Fusheng. 2003. A method for identifying primary magma—Examples from picrite and alkali basalts[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 33(2): 130 ~ 134(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zuoheng, Hong Wei, Jiang Zongsheng, *et al.* 2012. Geological features, mineralization types and metallogenic setting of Late Paleozoic iron deposits in western Tianshan Mountains of Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 31: 941 ~ 964(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z H, Hong W, Jiang Z S, *et al.* 2012a. Geological characteristics and zircon U-Pb dating of volcanic rocks from the Beizhan iron deposit in western Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 86(3): 737 ~ 747.
- Zhang Z H, Hong W, Jiang Z S, *et al.* 2014a. Geological characteristics and metallogenesis of iron deposits in western Tianshan, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 57: 425 ~ 440.
- Zhang Z L, Feng X J, Gao Y W, *et al.* 2014b. The metallogenetic epoch of magnetite deposits in Awulale Iron Belt, Western Tianshan Mountains[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 88 (Supp. 2): 1 047 ~ 1 048.
- Zhu Y F, Guo X, Song B, *et al.* 2009. Petrology, Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry and zircon chronology of the Late Palaeozoic volcanic rocks in the southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China[J]. *Journal of the Geological Society*, 166: 1 085 ~ 1 099.
- Zhu Y F, Zhang L F, Gu L B, *et al.* 2005. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan Mountains [J]. *Chinese Science Bulletin*, 50 (19): 2 201 ~ 2 212.
- Zhu Yongfeng, Zhou Jing and Gou Xuan. 2006. Petrology and Sr-Nd isotopic geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in the western Tianshan Mountains, NW China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (5): 1 341 ~ 1 350(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 车自成, 刘 良, 刘洪福, 等. 1996. 论伊犁古裂谷[J]. *岩石学报*, 12(3): 478 ~ 489.
- 陈丹玲, 刘 良, 车自成, 等. 2001. 中天山骆驼沟火山岩的地球化学特征及其构造环境[J]. *岩石学报*, 17(3): 378 ~ 384.
- 陈 文, 张 彦, 张岳桥, 等. 2006. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的 Ar-Ar 热年代学证据[J]. *岩石学报*, 22(4): 867 ~ 872.
- 段士刚, 张作衡, 魏梦元, 等. 2014. 新疆西天山雾岭铁矿闪长岩地

- 球化学及锆石 U-Pb 年代学[J]. 中国地质, 41(6): 1 757 ~ 1 770.
- 高俊, 钱青, 龙灵利, 等. 2009. 西天山的增生造山过程[J]. 地质通报, 28(12): 1 804 ~ 1 816.
- 韩宝福, 郭召杰, 何国琦. 2010. “钉合岩体”与新疆北部主要缝合带的形成时限[J]. 岩石学报, 8: 2 233 ~ 2 246.
- 韩琼, 弓小平, 程松林, 等. 2015a. 西天山备战铁矿火山岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成研究[J]. 地质学报, 89(1): 70 ~ 82.
- 韩琼, 弓小平, 马华东, 等. 2015b. 西天山阿吾拉勒成矿带大哈拉军山组火山岩时空分布规律及其地质意义[J]. 中国地质, 42(3): 570 ~ 586.
- 韩琼, 弓小平, 毛磊, 等. 2013. 西天山备战铁矿成岩年代厘定及矿床成因研究[J]. 新疆地质, 31(2): 136 ~ 140.
- 洪为, 张作衡, 李华芹, 等. 2012. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床成矿时代——来自石榴子石 Sm-Nd 等时线年龄的信息[J]. 矿床地质, 31(5): 1 067 ~ 1 074.
- 姜常义, 吴文奎, 张学仁, 等. 1995. 从岛弧向裂谷的变迁——来自阿吾拉勒地区火山岩的证据[J]. 岩石矿物学杂志, 14(4): 289 ~ 300.
- 姜常义, 吴文奎, 张学仁, 等. 1996. 西天山阿吾拉勒地区岩浆活动与构造演化[J]. 西安地质学院学报, 18(2): 18 ~ 24.
- 蒋宗胜. 2014. 西天山智博铁矿区石炭纪火山作用与铁成矿研究[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 蒋宗胜, 张作衡, 侯可军, 等. 2012. 西天山查岗诺尔和智博铁矿区火山岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 岩石学报, 28(7): 2 074 ~ 2 088.
- 李大鹏, 杜杨松, 庞振山, 等. 2013. 西天山阿吾拉勒石炭纪火山岩年代学和地球化学研究[J]. 地球学报, 34(2): 176 ~ 192.
- 李继磊, 苏文, 张喜, 等. 2009. 西天山阿吾拉勒西段麻粒岩相片麻岩锆石 Cameca U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 28: 1 852 ~ 1 862.
- 林靓, 钱青, 王艳玲, 等. 2015. 西天山昭苏北部大哈拉军山组火山岩中辉长岩体的形成时代、地球化学特征及地质意义[J]. 岩石学报, 31(6): 1 749 ~ 1 760.
- 龙灵利, 高俊, 钱青, 等. 2008. 西天山伊犁地区石炭纪火山岩地球化学特征及构造环境[J]. 岩石学报, 24(4): 699 ~ 710.
- 卢华复, 贾承造, 贾东, 等. 2001. 库车再生前陆盆地冲断构造楔特征[J]. 高校地质学报, 7(3): 257 ~ 271.
- 钱青, 高俊, 熊贤明, 等. 2006. 西天山昭苏北部石炭纪火山岩的岩石地球化学特征、成因及形成环境[J]. 岩石学报, 22(5): 1 307 ~ 1 323.
- 孙林华, 彭头平, 王岳军. 2007. 新疆特克斯东南大哈拉军山组玄武安山岩地球化学特征: 岩石成因和构造背景探讨[J]. 大地构造与成矿学, 31(3): 372 ~ 379.
- 孙吉明, 马中平, 徐学义, 等. 2012. 新疆西天山备战铁矿流纹岩的形成时代及其地质意义[J]. 地质通报, 31(12): 1 973 ~ 1 982.
- 田敬佳, 段士刚, 彭万林, 等. 2015. 新疆西天山智博铁矿床火山岩和侵入岩岩石地球化学[J]. 矿床地质, 34(1): 119 ~ 138.
- 汪帮耀, 姜常义. 2011. 西天山查岗诺尔铁矿区石炭纪火山岩地球化学特征及岩石成因[J]. 地质科技情报, 30(6): 18 ~ 27.
- 王宝瑜, 郎智君, 李向东, 等. 1994. 中国天山西段地质剖面综合研究[M]. 北京: 科学出版社, 202.
- 王博, 舒良树, Cluzel D, 等. 2006. 新疆伊犁北部石炭纪火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. 中国地质, 33(3): 498 ~ 508.
- 王强, 赵振华, 许继峰, 等. 2006. 天山北部石炭纪埃达克岩-高镁安山岩-富 Nb 岛弧玄武岩: 对中亚造山带显生宙地壳增生与铜金成矿的意义[J]. 岩石学报, 22(1): 11 ~ 30.
- 王腾, 张振亮, 阳正熙, 等. 2015. 新疆西天山备战铁矿区火山岩地球化学特征与构造环境[J]. 矿物学报, 35(3): 351 ~ 358.
- 王作勋, 郭继勇, 刘成德, 等. 1990. 天山多旋回构造演化及成矿[M]. 北京: 科学出版社, 217.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 2004. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱[J]. 地质通报, 23(9~10): 903 ~ 910.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 2007. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩[J]. 岩石矿物学杂志, 26(1): 77 ~ 89.
- 肖序常, 刘训, 高锐. 2004. 中国新疆天山: 塔里木-昆仑山地质断面[M]. 北京: 地质出版社.
- 张彦, 陈文, 陈克龙, 等. 2006. 成岩混层(I/S)Ar-Ar 年龄谱型及³⁹Ar 核反冲丢失机理研究——以浙江长兴地区 P-T 界线粘土岩为例[J]. 地质论评, 52(4): 556 ~ 561.
- 张招崇, 柴凤梅, 谢秋红. 2016. 热幔-冷壳背景下的高角度俯冲: 海相火山岩型铁矿的形成[J]. 中国地质, 43(2): 367 ~ 379.
- 张招崇, 王福生. 2003. 一种判别原始岩浆的方法——以苦橄岩和碱性玄武岩为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 33(2): 130 ~ 134.
- 张作衡, 洪为, 蒋宗胜, 等. 2012. 新疆西天山晚古生代铁矿床的地质特征, 矿化类型及形成环境[J]. 矿床地质, 31(5): 941 ~ 964.
- 朱永峰, 周晶, 郭璇. 2006. 西天山石炭纪火山岩岩石学及 Sr-Nd 同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 22(5): 1 341 ~ 1 350.