

新疆西天山智博铁矿床地球化学及同位素特征

沈立军¹, 王怀洪^{1,2}, 李大鹏³, 朱裕振¹, 王勇军¹, 孙超¹, 邵玉宝¹

SHEN Lijun¹, WANG Huaihong^{1,2}, LI Dapeng³, ZHU Yuzhen¹, WANG Yongjun¹, SUN Chao¹, SHAO Yubao¹

1. 山东省煤田地质规划勘察研究院, 山东 济南 250104;

2. 山东省煤田地质局, 山东 济南 250104;

3. 山东省地质科学研究所, 山东 济南 250013

1. Shandong Provincial Research Institute of Coal Geology Planning and Exploration, Jinan 250104, Shandong, China;

2. Shandong Bureau of Coal Geology, Jinan 250104, Shandong, China;

3. Shandong Geological Sciences Institute, Jinan 250013, Shandong, China

摘要:智博铁矿位于新疆西天山阿吾拉勒铁成矿带东段,矿体以层状、似层状、透镜状产于下石炭统大哈拉军山组玄武质安山岩中。智博铁矿成矿作用主要划分为岩(矿)浆期和热液期2个成矿期次,包括3个成矿阶段:磁铁矿+透辉石阶段、磁铁矿+绿帘石+钾长石阶段和石英+硫化物+碳酸盐阶段。智博铁矿地球化学特征表明,其成矿构造背景为早石炭世南天山洋向伊犁板块俯冲形成的岛弧环境;火山岩与磁铁矿石具有相同的物质来源,均来源于受俯冲带流体交代的亏损地幔楔部分熔融形成的玄武质岩浆。智博铁矿为岩浆(主要)-热液(次要)复合型矿床,受俯冲流体交代的亏损地幔楔部分熔融形成富铁的玄武质岩浆,岩浆沿深大断裂上侵形成早期火山岩,上侵过程中由于物理化学条件的改变在不混溶作用下形成铁矿浆,铁矿浆侵入早期火山岩地层形成岩浆期磁铁矿体;后期富铁的岩浆或矿浆热液使围岩发生矿化与蚀变,形成热液期磁铁矿体。

关键词:安山岩;地球化学;矿床成因;智博铁矿;西天山

中图分类号:P588.14⁺4;P618.31 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)05-0698-14

Shen L J, Wang H H, Li D P, Zhu Y Z, Wang Y J, Sun C, Shao Y B. Isotope geochemical characteristics of the Zhibo iron deposit in western Tianshan Mountains, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(5): 698-711

Abstract: The Zhibo iron deposit is located in eastern Awulale metallogenic belt of Western Tianshan Mountains. The orebodies of the Zhibo iron deposit are hosted in basaltic andesite of the Lower Carboniferous Dahalajunshan Formation in layered, quasi-lamellar and lenticular forms. The mineralization process of the Zhibo iron deposit can be divided into two metallogenic periods, i. e., magmatic period and hydrothermal period, which consist of three metallogenic stages: magnetite + diopside, magnetite + K-feldspar + epidote and quartz + sulfide + carbonate stages. The geochemical characteristics of the Zhibo iron deposit show that its metallogenic tectonic setting was an island-arc environment. The geochemical data support derivation of volcanic rock and magnetite ore from basaltic magma formed by partial melting of depleted mantle wedge altered by fluids in subduction zones, with the same material source. The Zhibo iron deposit is a magmatic (mainly) - hydrothermal (subordinately) deposit. The basaltic magma intruded upward along deep fault and formed the primitive volcanic rock. Because of the change of physical-chemical conditions during its intrusion, the iron ore slurry was liquidized from the basaltic magma. The intrusion of the iron ore slurry into primitive volcanic rock might have been responsible for the formation of the magmatic type magnetite orebody and the alteration of the surrounding rocks by the residual magmatic hydrothermal fluid for the formation of the hydrothermal type magnetite orebody.

Key words: andesite; geochemistry; genesis; Zhibo iron deposit; western Tianshan

收稿日期:2019-03-16;修订日期:2019-12-02

资助项目:中国地质调查局项目《天山成矿带地质矿产调查评价》(编号:1212011120497)和山东省煤田地质局科研专项基金项目(编号:鲁煤地科字(2016)2号)

作者简介:沈立军(1988-),男,硕士,工程师,从事地质矿产勘查及矿床学研究。E-mail:sdmtslj@163.com

智博铁矿位于新疆和静县,西天山阿吾拉勒铁成矿带东段,是近年在该成矿带内发现的大型铁矿床之一。前人对该区域进行了大量的地质研究,划分了早中石炭世、早二叠世和晚二叠世 3 阶段构造岩浆活动^[1],初步总结了区域构造背景和成矿规律^[2-5];对带内智博、查岗诺尔等典型矿床的研究也不断深入,矿体主要呈层状、似层状赋存于下石炭统大哈拉军山组火山岩中^[6-11],磁铁矿成矿与晚石炭世大陆岛弧岩浆活动有密切联系^[12-14],矿床成因主要有火山作用铁岩浆分异、火山热液交代和火山喷流沉积 3 种解释^[15-20],尚未形成统一的认识。对智博铁矿床的研究主要集中于矿物学、岩石地球化学、稳定同位素、年代学等方面,对火山岩和铁矿石的地球化学特征对比研究及对 Sr-Nd 同位素的研究相对较少。本文在详细的野外地质调查和系统的岩石学、矿相学研究的基础上,针对安山岩和铁矿石的地球化学特征进行对比研究,探讨矿床的成矿构造背景、成矿物质来源等,以期对矿床成因研究提供更进一步参考。

1 地质背景

智博铁矿区位于西天山东部,伊犁板块的东缘,伊犁板块呈楔形分布于准噶尔板块和塔里木板块之间(图 1-a)。西天山造山带属于晚古生代碰撞

造山带^[21],是经历了复杂变形改造^[22]、多期次俯冲、碰撞和陆-陆叠覆造山形成的复合造山带^[22-25]。

区域内出露的地层主要有元古宇、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系及第四系,其中以石炭系分布最广,分为大哈拉军山组和伊什基里克组。阿吾拉勒山一带的大哈拉军山组,是一套基性-中性-酸性系列的火山-沉积岩系。关于该组火山岩形成的沉积-构造环境目前仍存在不同观点,有学者认为是大陆裂谷环境^[26],或是陆相喷发环境^[27],或是与地幔柱有关的大火成岩省^[28],还有学者认为是海相岛弧钙碱性火山岩建造等^[29-36]。

西天山地区海西晚期中酸性岩体非常发育,侵入岩主要为一套与洋盆收敛俯冲有关的钙碱性侵入岩、与同碰撞有关的富铝花岗岩、后造山的富钾花岗岩等^[17,37]。区内断裂构造和火山机构广泛发育,断裂构造总体走向 250°左右,倾向北,倾角 70°左右,断层破碎带宽数厘米至数十米,构造角砾发育,蚀变较强,成矿地质条件十分有利^[38]。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质

矿区内出露的地层主要为下石炭统大哈拉军山组第三亚组火山岩和第四系冰川及其堆积物(图 1-b)。火山岩主要包括安山岩、玄武岩、玄武

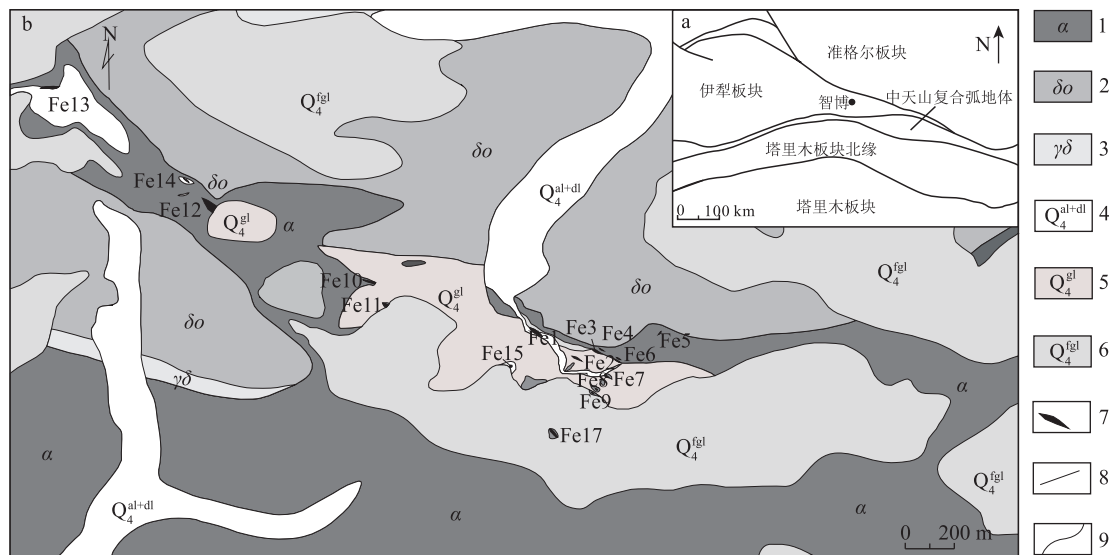


图 1 智博铁矿区地质简图^①

Fig. 1 Geological sketch map of the Zhibo iron deposit

1—大哈拉军山组第三亚组安山岩;2—石英闪长岩;3—花岗闪长岩;4—第四系冲积、坡积物;
5—第四系冰积物;6—第四系冰川;7—磁铁矿体;8—断层;9—地质界线

质安山岩、玄武质凝灰岩、粗面安山岩,以及少量的粗面岩和英安岩,铁矿体主要赋存于安山岩中。受火山机构及北侧 NW 向区域性大断裂控制,区内构造行迹较复杂,岩层劈理、节理发育,韧性变形复杂,但主要构造为单斜构造,此单斜构造走向 NW315°左右,倾角 60°左右。区内晚古生代火山活动频繁,古火山机构发育,岩浆岩以华力西期中晚期为主,侵入岩岩体主要为浅肉红色花岗闪长岩和灰色石英闪长岩,岩脉主要为后期侵入于矿区西北部石英闪长岩中的辉绿岩脉^[38-39]。

2.2 矿体特征

智博铁矿矿区分为东、中、西和西北 4 个矿段,共圈定 24 个铁矿体(图 1-b)。其中东矿段内的 Fe15 和 Fe18 矿体为矿区内的主矿体,占全矿区资源量的 90% 以上。主矿体沿绿帘石-钾长石-阳起石蚀变带呈带状分布,以层状、似层状、透镜状产出,在平面上总体为 NW—SE 向,产状北倾,倾角较缓,为 15°~35°。矿体长 800~1100 m,平均厚度约 47~110 m;TFe 平均品位为 34.02%~50.50%,mFe 平均品位为 27.58%~32.22%。矿体顶底板均为浅灰绿色、灰褐色的玄武质安山岩,矿体内发育多层夹石,具分枝复合现象。

2.3 矿石特征

智博矿区内矿石矿物组成主要分为金属矿物和脉石矿物。金属矿物主要有磁铁矿,次为黄铁矿,偶见黄铜矿、磁黄铁矿、褐铁矿、赤铁矿等。磁铁矿呈他形粒状,自形-半自形,粒径小于 0.1 mm,分布不均匀。黄铁矿呈星点状、团块状和细脉状产

出。黄铜矿分布较少,呈点状产出。磁铁矿的裂隙及解理面上偶见少量赤铁矿,黄铁矿边缘偶见磁黄铁矿。脉石矿物主要有透辉石、钠长石、绿帘石、绿泥石、阳起石、钾长石等。

智博铁矿矿石结构以半自形-自形粒状结构和他形-半自形粒状结构为主,其次还有交代结构、填隙结构、包含结构等。智博铁矿矿石构造种类较多,有块状、浸染状、隐爆角砾状、斑杂状、条带状、网脉状等。

2.4 围岩蚀变与成矿期次

智博铁矿发育广泛的围岩蚀变,以绿帘石化、钾长石化和阳起石化为主,少量绿泥石化、硅化和碳酸盐化,离矿体愈近,围岩蚀变愈强烈,且具有多阶段的特点。矿体顶、底板几乎全为绿帘石化-钾长石化-绿泥石化的玄武质安山岩。

根据矿石组构、矿物共生和产出特征可将智博铁矿划分为岩(矿)浆成矿期、热液成矿期,其中热液成矿期又可划分为 2 个阶段,岩(矿)浆成矿期和热液成矿期第一阶段为主要成矿阶段(表 1)。

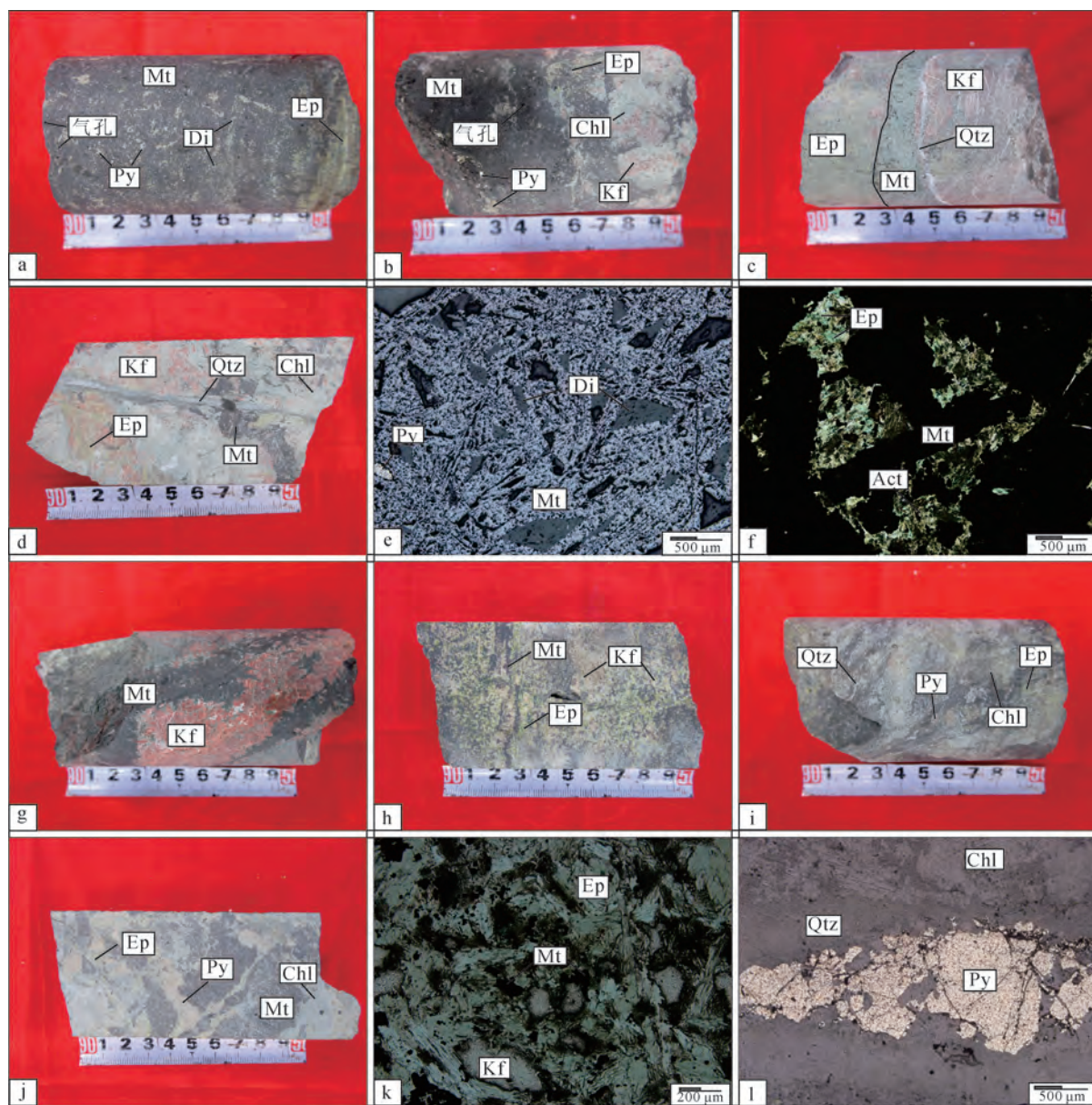
岩浆成矿期:此阶段是智博铁矿主要的成矿阶段,早期以出现磁铁矿+透辉石为特征,磁铁矿颗粒较细,一般为他形-半自形结构,多呈致密块状(图版 I-a)、角砾状(图版 I-b、d)、浸染状构造。局部围岩玄武质安山岩与块状磁铁矿石之间的接触界线清楚(图版 I-c),指示此类矿石可能是铁岩浆直接贯入围岩中形成的,致密块状矿石和角砾状矿石中磁铁矿与透辉石共生,两者可能为同一期形成的矿物,也可见黄铁矿充填于自形磁铁矿的晶隙中,其

表 1 智博铁矿床成矿期次划分及矿物生成顺序

Table 1 Mineralizing periods and mineral-forming sequence of the Zhibo iron deposit

阶段 矿物	岩浆成矿期	热液成矿期	
	岩(矿)浆成矿阶段	磁铁矿+绿帘石+钾长石阶段	石英+硫化物+碳酸盐阶段
透辉石 Di			
磁铁矿 Mt			
绿帘石 Ep			
阳起石 Act			
黄铁矿 Py			
黄铜矿 Ccp			
绿泥石 Chl			
钾长石 Kf			
赤铁矿 Hem			
石英 Qtz			
方解石 Cal			

图版 I Plate I



a.致密块状磁铁矿,具气孔构造;b.磁铁矿与围岩接触带,磁铁矿胶结围岩角砾;c.磁铁矿脉与围岩截然接触;d.角砾状矿石,磁铁矿胶结蚀变安山岩;e.磁铁矿与透辉石共生,反射光;f.绿帘石化与阳起石化,单偏光;g.条带状磁铁矿石;h.浸染状磁铁矿石;i.网脉状磁铁矿石;j.磁铁矿石具片状黄铁矿;k.黄铁矿交代磁铁矿,反射光;l.磁铁矿与绿帘石共生,单偏光。Mt—磁铁矿;Py—黄铁矿;Di—透辉石;

Ep—绿帘石;Kf—钾长石;Chl—绿泥石;Act—阳起石;Qtz—石英

形成应晚于磁铁矿(图版 I -e)。阶段后期则以绿帘石(+黄铁矿)+阳起石(+绿泥石)等矿物组合为特征,可能是由于铁矿浆的侵入,使围岩发生蚀变,生成绿帘石、阳起石、绿泥石等矿物(图版 I -f),并形成少量他形粒状黄铁矿。

热液成矿期:划分为2个成矿阶段:①磁铁矿+绿帘石+钾长石阶段,以发育条带状矿石(图版 I -g)、浸染状矿石(图版 I -h)及网脉状矿石(图版 I -i、

j)为特征,此阶段黄铁矿较矿浆期多,颗粒也较大,一般呈团块状、条带状或脉状分布(图版 I -i、j)。脉石矿物主要为绿帘石、钾长石、绿泥石等,镜下可见磁铁矿与绿帘石、钾长石密切共生(图版 I -k)。②石英+硫化物+碳酸盐阶段,出现石英+黄铁矿(+黄铜矿)+碳酸盐的矿物组合,形成时间晚于磁铁矿,并有少量绿帘石、绿泥石、钾长石等矿物形成。黄铁矿多与石英共生,常与石英脉一起产出于矿石

及围岩裂隙中(图版 I-1)。

此外,在矿体形成之后,由于地表剥蚀或雨水灌入,导致部分磁铁矿发生氧化,形成褐铁矿,局部可见黄铜矿氧化成孔雀石,但对整个矿床影响不大。

3 矿床地球化学

本次研究在主矿体钻孔及地表采集围岩及矿石样品 9 件,其中围岩样品 3 件,矿石样品 6 件。分析测试在核工业北京地质研究院的分析测试研究中心完成,主量元素分析使用仪器为 Philips PW2404 型 X 荧光光谱仪(XRF),分析精度优于 1%;微量元素分析使用仪器为 Finnigan MAT Element I 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),分析精度多小于 3%,测试环境温度 20℃,湿度 30%。Rb-Sr、Sm-Nd 同位素及铅同位素测试仪器为热电质谱仪,仪器型号为 ISOPROBE-T。分析结果见表 2、表 3、表 4。

3.1 主量元素

火山岩的 TAS 分类图解(图 2-a)表明,带内的火山岩主要为安山岩、玄武安山岩、粗面安山岩及玄武质粗安岩。 SiO_2 - K_2O 图解(图 2-b)显示,火山岩多为钙碱性或高钾钙碱性岩石。

安山岩及玄武质安山岩的 SiO_2 和 TiO_2 含量分别在 52.70%~57.54% 和 0.61%~1.00% 之间,全碱

ALK 值为 2.69~5.74, MgO 含量(3.29%~9.71%) 和 $\text{Mg}^\#$ 值(40.29~68.20, $\text{Mg}^\# = 100 \times \text{Mg}^{2+} / (\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$) 的变化范围较大。粗安岩及玄武质粗安岩的 SiO_2 含量为 55.04%~60.45%, TiO_2 和 P_2O_5 的含量分别为 0.53%~0.94% 和 0.11%~0.17%,全碱 ALK 值为 5.84~8.00, MgO 含量和 $\text{Mg}^\#$ 值分别为 1.50%~6.23% 和 31.64~60.77,变化范围也较大。Atherton 等^[42] 认为,下地壳铁镁质岩石部分熔岩形成的岩浆,由于未与地幔发生相互作用, $\text{Mg}^\#$ 值小于 45; Kelemen^[43] 则提出, $\text{Mg}^\# > 60$ 和 $\text{Ni} > 100 \times 10^{-6}$ 的岩浆代表了地幔熔体。本矿区火山岩的 $\text{Mg}^\#$ 值多介于 45~60 之间,显示其可能为壳幔混源。火山岩 MgO 含量和 $\text{Mg}^\#$ 值较大的变化范围^[41], 指示其经历了一定的结晶分异作用过程。

磁铁矿石中, Fe_2O_3 含量为 40.08%~61.36%, FeO 含量为 20.70%~30.05%, TiO_2 和 P_2O_5 含量均较低,分别为 0.08%~0.17% 和 0.02%~0.13%, MgO 和 Al_2O_3 含量变化较大,分别为 0.85%~3.85% 和 0.00%~3.73%。与 Kiruna-type 矿床相比,智博铁矿铁矿石 TiO_2 含量与其较一致,均较少;但 P_2O_5 含量比 Kiruna-type 铁矿(磷平均含量大于 2%) 低得多^[44]。

3.2 稀土元素

大哈拉军山组火山岩的稀土元素总量(ΣREE)

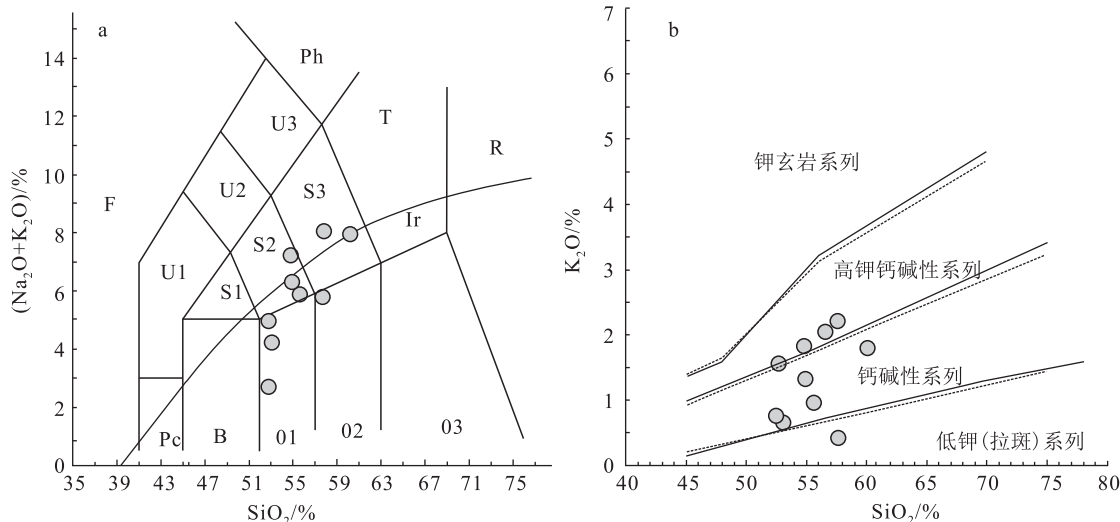


图 2 智博铁矿火山岩 TAS 图解(a)^[40] 和 SiO_2 - K_2O 图解(b)^[41]

Fig. 2 TAS(a) and SiO_2 - K_2O (b) diagrams of volcanic rocks in the Zhibo iron deposit

F—副长岩; Pc—苦橄玄武岩; U1—玄武岩/碧玄武岩; U2—响岩质玄武岩; U3—碱玄质响岩; Ph—响岩; B—玄武岩; S1—粗面玄武岩; S2—玄武质粗面安山岩; S3—粗面安山岩; T—粗面岩/粗面英安岩; 01—玄武安山岩; 02—安山岩; 03—英安岩; R—流纹岩; Ir—碱性、亚碱性界线

为 $50.16 \times 10^{-6} \sim 174.12 \times 10^{-6}$, 变化范围较大, 平均为 84.95×10^{-6} , 其中轻稀土元素 (LREE) 为 $32.99 \times 10^{-6} \sim 142.55 \times 10^{-6}$, 平均为 67.14×10^{-6} , 重稀土元素 (HREE) 为 $10.39 \times 10^{-6} \sim 31.57 \times 10^{-6}$, 平均为 17.82×10^{-6} , LREE/HREE 值为 $2.70 \sim 7.72$, 平均为 3.81 , La_N/Yb_N 值为 $0.87 \sim 8.94$, 平均为 3.29 。在球粒陨石标准化配分曲线 (图 3-a) 中, 所有安山岩一致性较好, 表现出轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾型配分模式, 轻稀土元素分馏较明显 (La_N/Sm_N 值为 $0.69 \sim 4.20$), 重稀土元素配分曲线较平坦, 分馏较差 (Gd_N/Yb_N 值为 $0.86 \sim 1.82$), 多具弱的负 Eu 异常 (δEu 值为 $0.70 \sim 1.41$), Ce 异常不明显 (δCe 值为 $0.95 \sim 1.11$)。

磁铁矿石的稀土元素总量较低, ΣREE 为 $4.76 \times 10^{-6} \sim 71.10 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 值为 $2.47 \sim 19.34$ 。

(La/Yb)_N 变化较大, 为 $1.31 \sim 37.73$, 在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线 (图 3-b) 上, 总体表现为轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾型配分模式, 轻稀土元素分馏较明显 (La_N/Sm_N 为 $1.78 \sim 13.50$), 重稀土元素配分曲线较平坦, 分馏较差 (Gd_N/Yb_N 为 $0.76 \sim 2.66$)。具 Eu 的负异常, $\delta\text{Eu} = 0.30 \sim 0.64$, Ce 的负异常不明显, $\delta\text{Ce} = 0.82 \sim 0.96$ 。袁家铮等认为, 深部低氧逸度情况下容易造成岩浆熔体 Eu 异常, 并造成铁的富集^[46], 也有研究认为 Eu 的负异常是由于富铁岩浆熔离过程中熔体-矿物稀土元素分配系数发生变化造成的^[47]。

3.3 微量元素

在火山岩样品原始地幔标准化微量元素蛛网图 (图 4-a) 中可以看出, 火山岩微量元素分配模式具

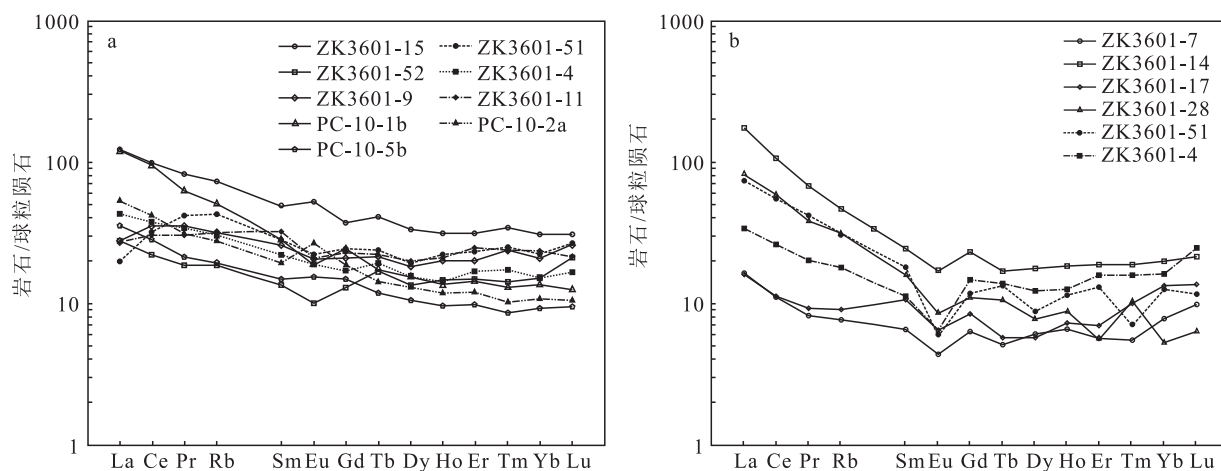


图 3 智博铁火山岩 (a) 和矿石 (b) 稀土元素球粒陨石标准化配分模式图 (球粒陨石标准化值据参考文献 [45])

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of volcanic rocks (a) and iron ore (b) in the Zhibo iron deposit

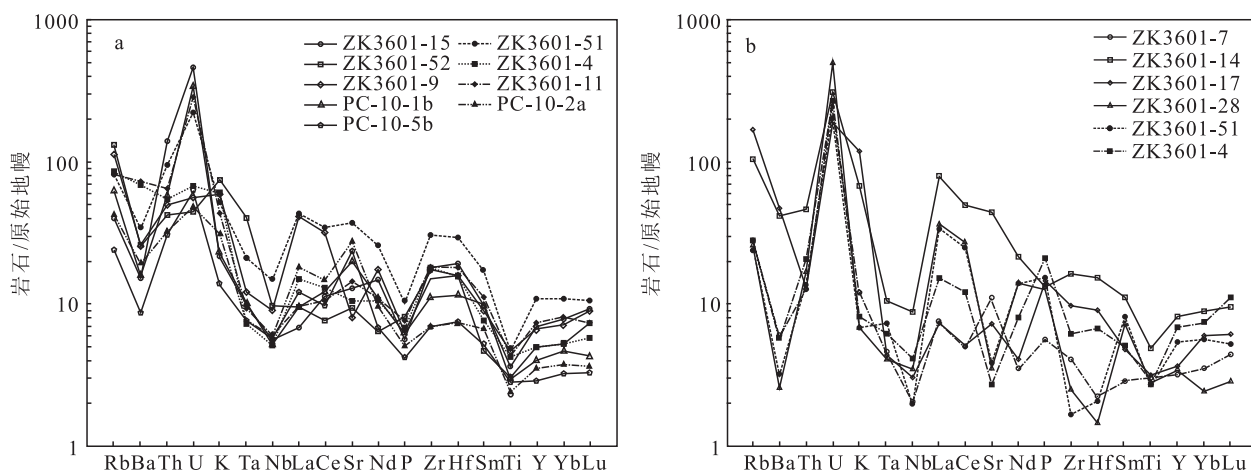


图 4 智博铁火山岩 (a) 和矿石 (b) 微量元素原始地幔标准化蛛网图 (原始地幔标准化值据参考文献 [43])

Fig. 4 Primitive mantle-normalized trace earth element patterns for volcanic rocks (a) and iron ore (b) in the Zhibo iron deposit

表 2 智博铁矿火山岩和磁铁矿石主量、微量和稀土元素分析结果
Table 2 Major, trace and rare earth element data of volcanic rocks and iron ore in the Zhibo iron deposit

样号	ZK3601-15	ZK3601-51	ZK3601-52	ZK3601-4 ^[5]	ZK3601-9 ^[5]	ZK3601-11 ^[5]	PC-10-5b ^[38]	PC-10-2a ^[38]	PC-10-1b ^[38]	ZK3601-7	ZK3601-14	ZK3601-17	ZK3601-28	ZK3601-34	ZK3601-41
岩性	玄武安山岩	玄武安山岩	粗面安山岩	粗面安山岩	玄武安山岩	玄武质粗安岩	粗面安山岩	玄武质粗安岩	安山岩	块状矿石	浸染状矿石	角砾状矿石	块状矿石	块状矿石	块状矿石
SiO ₂	53.15	52.70	57.77	54.91	52.77	55.04	60.45	55.43	57.54	13.21	19.30	23.58	5.13	4.90	5.72
TiO ₂	0.78	0.99	0.65	0.93	1.00	0.94	0.64	0.53	0.61	0.10	0.17	0.10	0.08	0.08	0.08
Al ₂ O ₃	12.42	15.08	16.16	15.79	15.19	14.89	17.96	16.15	15.19	0.87	3.73	3.29	0.27	0.00	0.00
TF ₂ O ₃	8.97	9.66	7.69	7.52	6.86	7.97	6.27	6.42	6.71	78.17	66.34	60.78	90.11	90.39	84.62
MnO	0.23	0.15	0.09	0.30	0.27	0.23	0.06	0.12	0.13	0.24	0.24	0.17	0.12	0.12	0.10
MgO	9.71	3.29	4.19	4.61	6.56	6.23	2.93	1.50	4.25	3.49	2.99	3.85	0.85	1.27	1.54
CaO	8.84	13.06	3.44	5.19	10.21	6.49	2.20	10.62	7.61	3.53	6.04	5.79	1.87	2.14	2.03
Na ₂ O	3.54	1.14	5.79	5.40	4.24	4.86	6.22	4.90	5.32	0.19	0.19	0.54	0.11	0.10	0.17
K ₂ O	0.64	1.55	2.20	1.80	0.70	1.31	1.78	0.94	0.42	0.08	0.84	1.73	0.04	0.04	0.05
P ₂ O ₅	0.12	0.22	0.17	0.14	0.13	0.17	0.14	0.11	0.09	0.02	0.07	0.08	0.06	0.08	0.13
烧失量	1.57	2.07	1.81	3.35	2.03	1.86	1.70	2.79	1.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.57
总计	99.97	99.91	99.97	99.94	99.96	99.98	100.35	99.51	99.61	99.90	99.91	99.90	98.65	99.11	98.01
ALK	4.18	2.69	7.99	7.20	4.94	6.17	8.00	5.84	5.74	—	—	—	—	—	—
Mg [#]	68.20	40.29	51.91	54.85	65.45	60.77	48.08	31.64	55.65	—	—	—	—	—	—
La	4.64	29.20	6.53	10.20	6.58	6.50	28.41	12.36	8.33	1.00	23.00	0.98	8.31	7.34	2.57
Ce	19.90	60.30	13.40	22.90	21.60	18.60	57.50	25.79	17.15	1.54	31.20	1.54	14.10	12.80	4.79
Pr	4.00	7.80	1.78	3.25	3.36	2.88	5.91	2.97	2.02	0.16	2.65	0.19	1.25	1.36	0.52
Nd	19.90	34.70	8.63	14.20	14.80	14.80	23.65	12.92	9.09	0.71	7.92	0.90	4.58	4.52	2.20
Sm	4.34	7.52	2.07	3.36	3.96	4.92	4.36	2.97	2.28	0.19	1.10	0.35	0.61	0.72	0.38
Eu	1.27	3.03	0.58	1.10	1.19	1.22	1.08	1.56	0.90	0.04	0.26	0.07	0.10	0.06	0.07
Gd	4.97	7.67	2.70	3.49	4.33	4.75	5.03	3.83	3.03	0.24	1.34	0.35	0.51	0.55	0.74
Tb	0.90	1.53	0.63	0.72	0.79	0.83	0.65	0.54	0.44	0.03	0.16	0.04	0.09	0.12	0.12
Dy	4.89	8.44	3.46	3.95	4.66	5.06	3.89	3.33	2.71	0.28	1.17	0.27	0.39	0.47	0.73
Ho	1.26	1.78	0.83	0.81	1.14	1.21	0.77	0.67	0.54	0.07	0.27	0.08	0.10	0.14	0.17
Er	3.89	5.26	2.45	2.82	3.31	4.12	2.39	2.00	1.63	0.17	0.83	0.22	0.16	0.51	0.65
Tm	0.63	0.89	0.37	0.44	0.61	0.61	0.33	0.26	0.22	0.03	0.13	0.05	0.06	0.03	0.10
Yb	3.84	5.23	2.58	2.59	3.54	3.94	2.28	1.84	1.58	0.26	0.92	0.53	0.16	0.49	0.69
Lu	0.68	0.78	0.54	0.42	0.67	0.54	0.32	0.27	0.24	0.05	0.15	0.08	0.03	0.07	0.18
Li	12.80	5.60	8.44	10.40	14.50	10.20	4.34	1.30	3.29	2.07	2.97	2.47	3.10	2.80	4.63
Be	1.03	1.35	1.41	1.20	0.58	0.74	1.23	0.95	1.17	0.58	1.22	0.94	0.11	0.35	0.50

续表 2

样品号	ZK3601-15	ZK3601-玄武安山岩	ZK3601-51玄武安山岩	ZK3601-52粗面安山岩	ZK3601-4 ^[5] 粗面安山岩	ZK3601-9 ^[5] 玄武安山岩	ZK3601-11 ^[5] 玄武质粗安岩	PC-10-5b ^[38] 粗面安山岩	PC-10-2a ^[38] 玄武质粗安岩	PC-10-1b ^[38] 安山岩	ZK3601-7块状矿石	ZK3601-14角砾状矿石	ZK3601-17角砾状矿石	ZK3601-28块状矿石	ZK3601-34块状矿石	ZK3601-41块状矿石
Sc	28.90	20.90	18.70	18.70	23.90	36.80	30.30	29.50	33.70	36.31	1.86	6.65	4.26	0.97	0.88	1.45
V	214.00	131.00	116.00	116.00	184.00	286.00	223.00	112.00	171.30	203.80	168.00	229.00	233.00	344.00	184.00	30.20
Cr	667.00	18.60	16.30	16.30	84.00	172.00	155.00	20.48	116.80	185.00	5.83	19.30	5.43	3.73	1.65	3.32
Co	26.40	18.00	15.40	15.40	23.20	14.60	13.00	13.41	19.97	13.83	15.60	15.20	17.00	84.10	57.50	202.00
Ni	96.80	40.90	14.50	14.50	52.90	35.60	40.50	18.57	20.45	32.69	115.00	81.30	129.00	386.00	246.00	44.20
Cu	8.63	12.30	6.95	6.95	139.00	20.20	9.07	9.57	576.90	14.01	5.58	10.90	4.85	17.40	5.53	175.00
Zn	118.00	58.10	53.10	53.10	115.00	114.00	102.00	38.60	23.82	39.68	102.00	204.00	69.40	44.50	44.00	40.90
Ga	12.30	23.70	13.20	13.20	13.50	12.80	15.60	26.15	25.86	18.90	12.60	9.57	6.24	6.12	6.97	15.10
Rb	25.60	51.00	83.80	83.80	53.30	39.80	51.10	71.39	26.71	15.04	5.39	30.50	57.80	4.79	4.41	5.36
Sr	271.00	793.00	198.00	198.00	220.00	418.00	301.00	170.80	589.70	491.50	50.90	334.00	30.30	11.20	12.60	7.77
Y	31.30	48.80	22.60	22.60	22.40	30.20	33.20	18.38	15.96	13.03	2.13	7.66	2.53	2.40	4.35	6.06
Nb	3.93	10.40	6.96	6.96	3.60	3.75	4.27	6.38	3.98	3.98	0.18	1.30	0.31	0.37	0.17	0.46
Mo	43.50	0.69	0.27	0.27	0.96	0.15	0.74	—	—	—	1.51	3.27	723.00	4.28	1.31	1.14
Cd	0.24	0.10	0.01	0.01	0.01	0.02	0.09	0.14	0.14	0.09	0.13	2.26	3.08	0.04	0.06	0.02
In	0.15	0.35	0.04	0.04	0.06	0.10	0.14	0.01	0.15	0.09	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.04
Sb	1.37	5.07	1.60	1.60	0.56	2.08	0.65	—	—	—	1.07	2.33	0.54	1.33	2.40	7.84
Cs	0.33	0.49	0.49	0.49	0.45	1.22	0.43	1.12	0.23	0.30	0.25	0.21	0.24	0.23	0.27	0.22
Ba	105.00	234.00	175.00	175.00	478.00	106.00	509.00	179.50	130.80	60.89	7.27	102.00	114.00	2.42	3.12	6.95
Ta	0.40	0.87	1.66	1.66	0.30	0.40	0.38	0.50	0.31	0.31	0.03	0.09	0.03	0.03	0.06	0.05
Pb	3.04	12.20	1.75	1.75	2.58	3.44	1.49	2.61	5.21	4.04	1.70	8.32	1.34	2.80	1.44	4.49
Bi	0.02	0.28	0.07	0.07	0.05	0.05	0.04	0.01	0.20	0.11	0.45	0.18	0.15	0.38	0.39	0.97
Th	11.80	8.04	3.56	3.56	4.66	4.93	5.52	4.23	2.67	2.60	0.25	1.39	0.26	0.36	0.28	0.48
U	9.56	4.68	0.93	0.93	1.40	7.04	5.91	1.16	1.01	1.30	3.16	4.30	2.21	8.06	2.46	3.54
Zr	199.00	344.00	193.00	193.00	197.00	171.00	200.00	123.30	77.76	76.77	7.07	46.40	23.40	3.70	2.14	12.50
Hf	5.84	9.12	4.88	4.88	4.77	4.83	5.56	3.53	2.28	2.29	0.09	1.15	0.58	0.05	0.08	0.39
ΣREE	75.11	174.12	46.54	46.54	70.26	70.54	69.98	136.57	71.31	50.16	4.76	71.10	5.64	30.45	29.18	13.92
LREE	54.05	142.55	32.99	32.99	55.01	51.49	48.92	120.91	58.57	39.77	3.63	66.13	4.02	28.95	26.80	10.54
HREE	21.06	31.57	13.56	13.56	15.25	19.05	21.06	15.66	12.74	10.39	1.13	4.97	1.63	1.50	2.38	3.38
LREE/HREE	2.57	4.51	2.43	2.43	3.61	2.70	2.32	7.72	4.60	3.83	3.21	13.31	2.47	19.34	11.27	3.11
La _N /Yb _N	0.87	4.00	1.82	1.82	2.82	1.33	1.18	8.94	4.82	3.78	2.70	18.01	1.31	37.73	10.70	2.66
δEu	0.83	1.21	0.74	0.74	0.97	0.87	0.76	0.70	1.41	1.05	0.60	0.64	0.59	0.55	0.30	0.40
δCe	1.05	0.96	0.95	0.95	0.97	1.12	1.05	1.03	1.01	0.99	0.86	0.82	0.83	0.96	0.92	0.96

注:测试单位为核工业北京地质研究院, TFeO = 0.8998TFe₂O₃, Mg[#] = 100Mg²⁺/(Mg²⁺ + TFe³⁺); 部分火山岩地球化学数据据参考文献[5, 38]。主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10⁻⁶

有较好的一致性,均不同程度地富集大离子亲石元素(K、Rb、Th),而明显亏损高场强元素(Nb、Ta、P),与岛弧火山岩具有相似的地球化学特征^[48]。同时多数火山岩样品中Ba相对于Th富集,与典型的岛弧火山岩富集Ba的特征相同^[49]。

磁铁矿石原始地幔标准化微量元素蛛网图(图4-b)显示,其分配模式具有较好的一致性,均不同程度地富集大离子亲石元素(K、Rb、Th),而明显地亏损高场强元素(Nb、Ta),与矿区内火山岩具有一定的相似性,暗示了其成因上的联系,可能来源于同一岩浆源。但磁铁矿石却表现出P的富集,可能是岩浆上侵过程中受到了壳源物质的影响。

3.4 铈-钕-铅同位素

同位素特征不仅可以反映岩浆源区特征与岩浆作用过程,还可以为成矿作用和成矿机制提供信息。为此本次对智博矿区火山岩和矿石进行了铈-钕同位素和铅同位素分析测试(表3、表4),以期为本区成岩成矿作用提供进一步证据。

智博铁矿火山岩样品的铈-钕同位素组成如表3所示, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 按照 320 Ma 计算。本区火山岩的 $\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$ 值变化较大,为 8.5~15.6,均为正值,表明智博矿区火山岩的母岩浆可能来源于铈同位素相对亏损的地幔源区。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值较低,变化范围较小,介于 0.70472~0.70522 之间,平均值为 0.70502,表明其母岩浆可能来源于同一源区的铈同位素较稳定的岩浆房。 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化较大,3 件样品均为正值,介于 0.9~3.3 之间,平均值为 2.43。

智博铁矿火山岩与磁铁矿石的铅同位素组成见表 4。其中 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i、($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i、

($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 是按照 $t=320\text{ Ma}$, 结合火山岩的 Th、U 和 Pb 的含量计算的。区内火山岩的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值的变化范围分别为 36.993~37.849、15.480~15.549 和 17.416~17.882; 磁铁矿石的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别为 37.730~37.854、15.395~15.467 和 15.921~17.214。

4 讨论

4.1 成矿构造背景

西天山在晚古生代经历了一系列复杂的构造演化,关于本矿床主要赋矿围岩的大哈拉军山组火山岩形成的构造环境一直是颇有争议的科学问题,观点主要有大陆裂谷环境^[26]、与地幔柱有关的裂谷环境^[50-51]、大陆边缘弧或岛弧环境^[1, 30-31, 52-57]等。

不同构造环境的火山岩具有不同的矿物学和地球化学特征,故可以通过其特征判断火山岩的形成环境。单斜辉石的成分与岩浆和构造环境有密切关系,特别是 Ti、Al、Na 等的含量对判断构造环境和岩浆系列有良好的指示作用^[58-59]。辉石的 Si-Al^{IV} 图和 F₁-F₂ 构造环境的判别图^[11] 显示,大哈拉军山组火山岩形成于岛弧环境。

不同构造环境的火山岩微量元素地球化学特征也不同,可通过微量元素判断玄武岩的构造环境。火山岩稀土元素总量较低,Ba 相对于 Th 富集,富集大离子亲石元素(K、Rb、Th),亏损高场强元素(Nb、Ta、P),均显示其具岛弧火山岩的特点。在 Nb/Th-Zr/Nb 判别图解^[60] 和 Hf-Th-Ta 判别图解^[61] (图 5) 中,绝大多数玄武质火山岩样品点落入岛弧玄武岩区,表明智博铁矿火山岩可能形成于岛弧环境。火山岩在铈-钕同位素总体表明本区火山岩的源区可能为同一亏损地幔^[62-63];在铈-钕判别图解(图 6) 中,火山岩样品点集中于亏损的洋岛型地幔玄武岩区域,同样指示了火山岩的母岩浆来源于亏损地幔。在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解(图 7) 中,火山岩样品点落入下部大陆地壳和上地幔范围,并接近亏损地幔边缘,说明其岩浆形成过程中亏损地幔物质与下地壳物质均有参与,有力地证明了本区火山岩具岛弧性质。

早石炭世南天山洋向伊犁板块的

表 3 智博铁矿火山岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 3 Sr-Nd isotopic data of volcanic rocks in the Zhibo iron deposit

编号	Rb/ 10 ⁻⁶	Sr/ 10 ⁻⁶	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Sr}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$	($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) _i
ZK3601-15	25.1	255	0.2842	0.7064167	0.000011	27.2	14.2	0.70512
ZK3601-51	45.9	765	0.1735	0.7060112	0.000008	21.5	15.6	0.70522
ZK3601-52	81.4	188	1.2531	0.7104298	0.000013	84.2	8.5	0.70472
编号	Sm/ 10 ⁻⁶	Nd/ 10 ⁻⁶	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) _i
ZK3601-15	4.66	17.6	0.1604	0.512729	0.000009	1.8	3.3	0.512393
ZK3601-51	6.97	30.2	0.1395	0.512562	0.000008	-1.5	0.9	0.512270
ZK3601-52	2.26	7.79	0.1753	0.512751	0.000009	2.2	3.1	0.512384

持续俯冲,在阿吾拉勒地区发生了大规模的岛弧火山活动,形成了大哈拉军山组钙碱性火山岩地层^[1, 31, 37]。地球化学资料显示,智博铁火山岩与磁铁矿石来源于同一岩浆源。结合上述分析可知,智博铁矿的成矿构造背景为南天山洋向伊犁板块俯冲形成的岛弧环境。

4.2 成矿物质来源

智博铁矿磁铁矿石与火山岩具有相似的稀土和微量元素配分特征。在²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 和 ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 图

解(图 8)中,火山岩与磁铁矿石具有很好的线性关系,均表明其可能来源于相同的岩浆系统。

岛弧环境中的岩浆可能有:地幔楔的部分熔融、俯冲板片部分熔融、俯冲带流(熔)体、陆壳同化混染^[67]等。智博铁火山岩的铈-钕同位素特征及铈-钕判别图解均指示其母岩浆来源于亏损地幔;弱富集的钕同位素组成($\epsilon_{Nd}(t)$ 介于 0.9~3.3 之间),暗示了其岩浆源区可能受到俯冲洋壳析出流体的交代^[68-69]。火山岩的铅同位素特征也显示其岩浆形成过程中亏损地幔物质与下地壳物质均有参与。这与火山岩主量、微量元素特征显示其母岩浆为壳幔混源吻合。因此,智博铁火山岩应来源于受到俯冲带流体交代的亏损地幔楔。

表 4 智博铁火山岩与矿石铅同位素组成

Table 4 Pb isotope data of volcanic rocks and iron ore in the Zhibo iron deposits

样品号	类型	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	(²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _t	(²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _t	(²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _t
ZK3601-15	玄武安山岩	19.567	15.579	39.370	17.497	15.470	37.193
ZK3601-51	玄武安山岩	19.327	15.625	38.633	17.882	15.549	37.849
ZK3601-52	粗面安山岩	19.449	15.585	39.443	17.416	15.478	36.993
ZK3601-17	磁铁矿石	22.584	15.757	38.051	16.135	15.416	37.811
ZK3601-34	磁铁矿石	22.593	15.747	37.968	15.921	15.395	37.730
ZK3601-41	磁铁矿石	20.193	15.624	37.981	17.214	15.467	37.854

磁铁矿石成铅同位素在因分类图解(图 9)中,均落入上地壳与地幔混合的俯冲带铅范围,表明磁铁矿同样来源于深部岩浆系统,并有陆壳物质的参与,这与火山岩的特征吻合,也佐证了磁铁矿石与火山岩具有相同的物质来源。因此,智博铁矿磁铁矿的成矿物质来源应是受俯冲带流体交代的亏损地幔楔部分熔融形成的岩浆。

4.3 矿床成因

目前关于智博铁矿的成因主要有 2 种认识:一种是岩浆-热液复合成因^[12, 14, 38],另一种是火山热液成因^[18]。主要以层状、似层状和透镜状赋存于大哈拉军山组中基性火山岩中,具有矿浆型铁矿的典型特征;同时与矿区内广泛发育绿帘石化、钾长石化

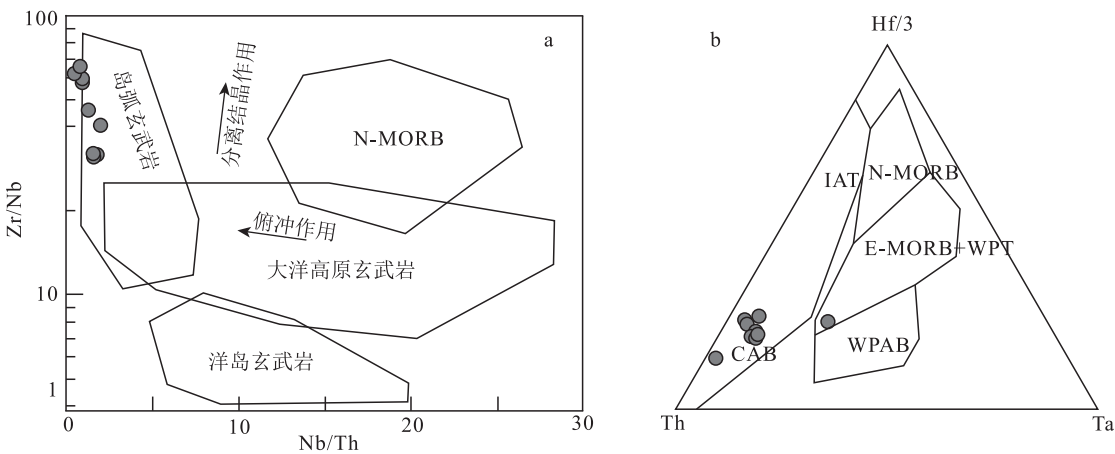


图 5 智博铁火山岩构造环境判别图解

Fig. 5 Discrimination diagrams of volcanic rocks in the Zhibo iron deposit

a—Nb/Th-Zr/Nb 判别图解^[60]; b—Hf-Th-Ta 判别图解^[61]。

CAB—钙碱性玄武岩; IAT—岛内拉斑玄武岩; WPAB—碱性板内玄武岩; N-MORB—正常洋中脊玄武岩;

E-MORB+WPT—富集洋中脊玄武岩和板内拉斑玄武岩

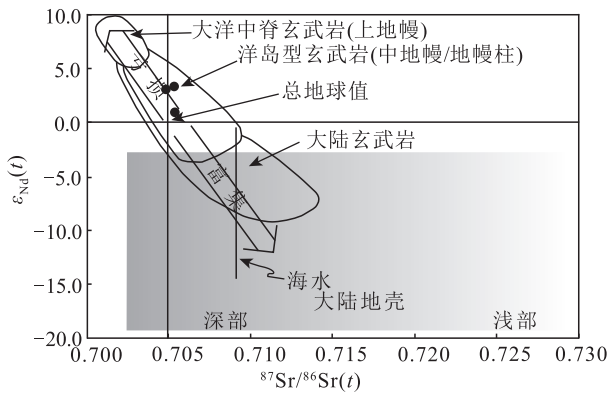
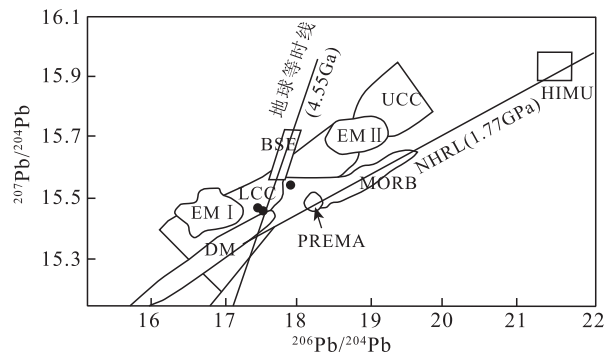


图6 智博铁矿火山岩 Sr-Nd 同位素图解

Fig. 6 Sr-Nd isotope diagram of volcanic rocks in the Zhibo iron deposit

等热液蚀变也有密不可分的联系。

智博铁矿矿石多为致密块状,发育气孔杏仁状构造,部分矿体与围岩接触关系截然;角砾状矿石中,磁铁矿胶结(蚀变)安山岩角砾,局部角砾具有一定的拼合性;可见磁铁矿的流动构造;具有较高的 V、Co、Ni 等元素;与透辉石等高温伴生矿物共生等,这些特征均符合矿浆型铁矿的特征^[71],指示了智博铁矿的矿浆成矿作用。前人实验研究证明,富铁硅酸岩浆在高温熔融状态下经液态不混溶作用可以熔离出铁矿浆,磷或其他挥发分(F、B)的加入可以促进铁矿浆的熔离^[72-73]。一般在与陆相火山岩有关的铁矿床中富含磷灰石,如宁芜地区的玢岩铁矿^[74-76]和 Kiruna 型铁矿^[77-80];而与海相火山岩有关的磁铁矿中磷灰石普遍较少^[5,8-9],指示本矿床铁矿浆的熔离可能与磷的关系较小。如前文所述,

图7 智博铁矿火山岩 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解

(底图据参考文献[64])

Fig. 7 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ isotope diagram of volcanic rocks in the Zhibo iron deposit

BSE—全球硅酸盐地球; LCC—下部大陆地壳; UCC—上部大陆地壳; EM I/EM II—富集地幔; DM—亏损地幔; PREMA—常见的普通地幔成分; MORB—洋中脊玄武岩(上地幔); HIMU—具有高 U/Pb 值的地幔

智博铁矿的成矿母岩浆来源于受俯冲带流体交代的亏损地幔楔部分熔融形成富铁的基性玄武质岩浆。富铁的基性玄武质岩浆沿深大断裂上侵,形成矿区广泛分布的大哈拉军山组火山岩,部分岩浆上侵过程中由于物理化学条件的改变,发生液态不混溶作用,熔离出铁矿浆,并沿通道继续上侵到早期的火山岩地层中参与成矿,形成智博铁矿大规模的岩浆期磁铁矿石。

智博铁矿发育广泛的绿帘石化、钾长石化、阳起石化等热液蚀变,尤其是浸染状和条带状矿石中,磁铁矿与绿帘石、钾长石密切共生,指示了热液作用对磁铁矿成矿的贡献。磁铁矿石地球化学特

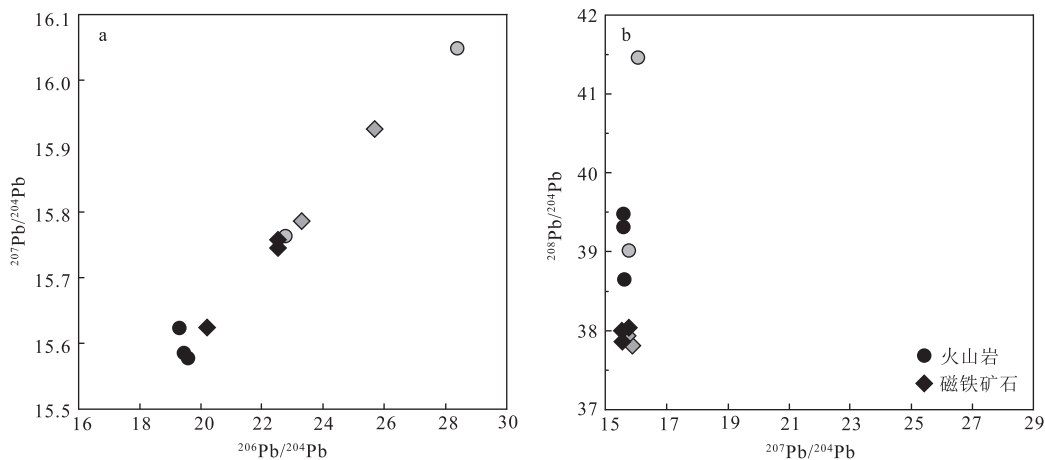
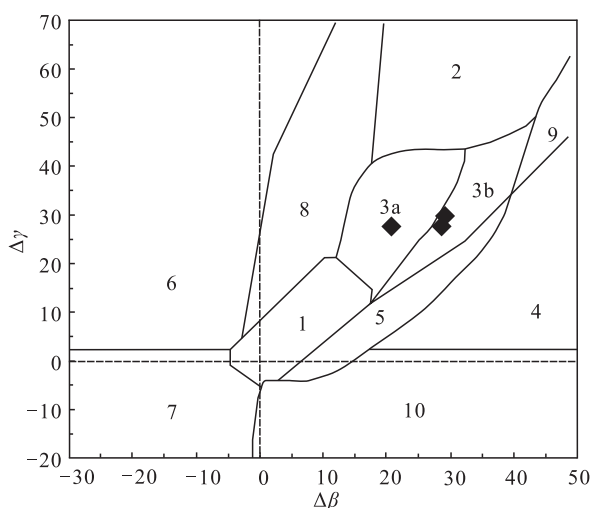
图8 智博铁矿火山岩及矿石 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a)和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b)图解^[38,65-66]

Fig. 8 Pb isotope diagrams of volcanic rocks (a) and iron ore (b) in the Zhibo iron deposit

图9 智博铁矿石铅同位素 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 成因分类

图解(底图据参考文献[70])

Fig. 9 Genetic classification of iron ore's Pb isotope in the Zhibo iron deposit

1—地幔源铅;2—上地壳铅;3—上地壳与地幔混合的俯冲带铅(3a—岩浆作用;3b—沉积作用);4—化学沉积型铅;5—海底热水作用铅;6—中深变质作用铅;7—深变质下地壳铅;8—造山带铅;9—古老页岩上地壳铅;10—退变质铅

征表明,热液期矿石的成矿物质来源于中基性岩浆,同时火山岩与蚀变火山岩中的Fe含量并没有太大变化,因此热液可能为富铁的岩浆或矿浆热液。热液作用使围岩发生矿化与蚀变,形成磁铁矿体。

综上所述,智博铁矿为岩浆(主要)-热液(次要)复合型矿床,受俯冲流体交代的亏损地幔楔部分熔融形成富铁的玄武质岩浆,岩浆沿深大断裂上侵形成早期火山岩,上侵过程中由于物理化学条件的改变在不混溶作用下形成铁矿浆,铁矿浆侵入早期火山岩地层形成岩浆期磁铁矿体;后期富铁的岩浆或矿浆热液使围岩发生矿化与蚀变,形成热液期磁铁矿体。

5 结 论

(1)智博铁矿成矿作用主要划分为岩(矿)浆期和热液期3个成矿期次,包括两个成矿阶段:磁铁矿+透辉石阶段、磁铁矿+绿帘石+钾长石阶段和石英+硫化物+碳酸盐阶段。

(2)智博铁矿地球化学特征表明,其成矿构造背景为早石炭世南天山洋向伊犁板块俯冲形成的岛弧环境。

(3)智博铁矿火山岩与磁铁矿石具有相同的物质来源,均来源于受俯冲带流体交代的亏损地幔楔部分熔融形成的玄武质岩浆。

(4)智博铁矿为岩浆(主要)-热液(次要)复合型矿床,受俯冲流体交代的亏损地幔楔部分熔融形成富铁的玄武质岩浆,沿深大断裂上侵形成早期火山岩,上侵过程中由于物理化学条件的改变在不混溶作用下形成铁矿浆,铁矿浆侵入早期火山岩地层形成岩浆期磁铁矿体;后期富铁的岩浆或矿浆热液使围岩发生矿化与蚀变,形成热液期磁铁矿体。

致谢:野外工作得到新疆自治区地质调查院总工程师王磊,新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局教授级高工李凤鸣、屈迅及地矿局第三地质大队和十一地质大队的大力相助,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 姜常义,吴文奎,张学仁,等.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,1996,18(2): 18-24.
- [2] 王永新,田培仁.浅论新疆海相火山热水沉积矿床的分带及其找矿意义[J].地质与勘探,2003,39(4): 6-11.
- [3] 刘宽厚,庄道泽,焦学军.新疆西天山1:50万化探成果评估与异常查证对策[J].地质与勘探,2003,39(6): 6-9.
- [4] 李大鹏,杜杨松,庞振山,等.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,2013,34(1): 1-17.
- [5] 李大鹏.新疆西天山阿吾拉勒成矿带叠加成矿作用[D].中国地质大学(北京)博士学位论文,2012.
- [6] 汪帮耀,胡秀军,王江涛,等.西天山查岗诺尔铁矿产床地质特征及矿床成因研究[J].矿床地质,2011,(3): 385-402.
- [7] 汪帮耀.新疆西天山查岗诺尔和智博火山岩型铁矿产床地质特征与成因研究[D].中国地质大学(北京)博士学位论文,2011.
- [8] 洪为.新疆西天山查岗诺尔铁矿地质特征与矿床成因[D].中国地质科学院硕士学位论文,2012.
- [9] 张作衡,洪为,蒋宗胜,等.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,2012,31(5): 941-964.
- [10] Zhang X, Tian J Q, Gao J, et al. 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, 2012, 22(2): 585-596.
- [11] 沈立军.新疆智博铁矿特征和成因[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2013.
- [12] 蒋宗胜.西天山智博铁矿石炭纪火山作用与铁成矿研究[D].中国地质科学院博士学位论文,2014.
- [13] 马方彬.新疆智博铁矿地质地球化学特征和成因[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2014.
- [14] 王志华,张作衡,蒋宗胜,等.西天山智博铁矿磁铁矿成分特征及

- 其矿床成因意义[J].矿床地质,2012,31(5): 983-998.
- [15] 蒋宗胜,张作衡,王志华,等.新疆西天山智博铁矿床蚀变矿物学、矿物化学特征及矿床成因探讨[J].矿床地质,2012,31(5): 1051-1066.
- [16] 沈立军,杜杨松,王树星,等.新疆西天山智博铁矿岩浆-热液成矿作用——来自安山岩矿物学的证据[J].地质与勘探,2014,50(2): 321-331.
- [17] 蒋宗胜,张作衡,侯可军,等.西天山查岗诺尔和智博铁矿区火山岩地球化学、锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J].岩石学报,2012,28(7): 2075-2088.
- [18] 田敬全,段士刚,彭万林,等.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,2015,34(1): 119-138.
- [19] 马方彬,杜杨松,李大鹏,等.西天山智博铁矿地球化学特征及地质意义[J].地质与勘探,2016,52(1): 1-13.
- [20] 王志华.新疆西天山智博铁矿床地质特征和成因研究[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2013.
- [21] 高俊,钱青,龙灵利,等.西天山的增生造山过程[J].地质通报,2009,28(12): 1804-1816.
- [22] Windley B F, Allen M B, Zhang C, et al. Paleozoic accretion and Cenozoic reformation of the Chinese TienShan Range, central Asia[J]. Geology, 1990, 18(2): 128-131.
- [23] Allen M B, Windley B F, Zhang C. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, central Asia [J]. Tectonophysics, 1992, 220: 89-115.
- [24] 左国朝,张作衡,王志良,等.新疆西天山地区构造单元划分、底层系统及其构造演化[J].地质评论,2008,54(6): 748-765.
- [25] Xiao W J, Windley B, Huang B C, et al. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altai: Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia [J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 98(6): 1189-1217.
- [26] 车自成,刘良,刘洪福,等.论伊犁古裂谷[J].岩石学报,1996,12(3): 478-490.
- [27] 杨金中,赵玉灵,王永江,等.新疆西天山哈拉军山组的沉积环境及其与成矿的关系[J].地质与勘探,2003,39(2): 1-5.
- [28] 夏林圻,张国伟,夏祖春,等.天山古生代洋盆开启、闭合时限的岩石学约束——来自震旦纪、石炭纪火山岩的证据[J].地质通报,2002,21(2): 55-62.
- [29] 姜常义,吴文奎,张学仁,等.从岛弧向裂谷的变迁——来自阿吾拉勒地区火山岩的证据[J].矿物岩石学杂志,1995,14(4): 289-300.
- [30] 朱永峰,张立飞,古丽冰,等.西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究[J].科学通报,2005,50(18): 2004-2014.
- [31] 李注苍,李永军,李景宏,等.西天山阿吾拉勒一带大哈拉军山组火山岩地球化学特征及构造环境分析[J].新疆地质,2006,24(2): 120-124.
- [32] 邵铁全,石莹,靳红,等.新疆西天山哈拉军山组火山岩岩石化学特征及地质意义[J].新疆地质,2006,24(3): 218-222.
- [33] 刘静,李永军,王小刚,等.西天山阿吾拉勒一带伊什基里克组火山岩地球化学特征及构造环境[J].新疆地质,2006,24(2): 105-108.
- [34] 龙灵利,高俊,钱青,等.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,2008,24(4): 699-710.
- [35] 李永军,李注苍,周继兵,等.西天山阿吾拉勒一带石炭系岩石地层单位厘定[J].岩石学报,2009,25(6): 1332-1340.
- [36] 李继磊,钱青,高俊,等.西天山昭苏东南部阿登套地区大哈拉军山组火山岩及花岗岩侵入体的地球化学特征、时代和构造环境[J].岩石学报,2010,26(10): 2913-2924.
- [37] 朱志新,李锦轶,董连慧,等.新疆西天山古生代侵入岩的地质特征及构造意义[J].地学前缘,2011,18(2): 170-179.
- [38] 冯金星,石福晶,汪帮耀,等.西天山阿吾拉勒成矿带火山岩型铁矿[M].北京:地质出版社,2010: 1-117.
- [39] 李小军.阿吾拉勒山主要矿产分布规律及成矿远景浅析[J].矿产与地质,1994,8(5): 344-347.
- [40] Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, et al. Chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. Journal of Petrology, 1986, 27(3): 745-750.
- [41] Wilson M. Igneous petrology [M]. London: Oxford University Press, 1989: 1-441.
- [42] Atherton MP, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. Nature, 1993, 362(6416): 144-146.
- [43] Kelemen P B. Genesis of high Mg[#] andesites and the continental crust[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1995, 120(1): 1-19.
- [44] Frietsch R. On the magmatic origin of iron ores of the Kiruna type[J]. Economic Geology, 1973, 68(4): 478-485.
- [45] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [C]// Saunders A D, Norry M J. Magmatism in ocean basins. Geol. Soc. London. Spec. Publ., 1989, 42: 313-345.
- [46] 袁家铮,张峰,殷纯嘏,等.梅山铁矿岩浆成因的系统探讨[J].现代地质,1997,11(2): 170-176.
- [47] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution [M]. Oxford: Blackwell, 1985: 312.
- [48] Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [C]// Thorpe R S. Andesites. Chichester: Wiley, 1982: 525-548.
- [49] Rottura A, Bargossi G M, Caggianelli A, et al. Origin and significance of the Permian high-K calc-alkaline magmatism in the central-eastern Southern Alps, Italy [J]. Lithos, 1998, 45(1/4): 329-348.
- [50] 夏林圻,夏祖春,徐学义,等.天山石炭纪大火成岩省与地幔柱[J].地质通报,2004,21(2): 55-62.
- [51] Xia L Q, Xu X Y, Xia Z C, et al. Petrogenesis of Carboniferous rift related volcanic rocks in the Tianshan, Northwestern China [J]. Geological Society of America Bulletin, 2004, 116: 419-433.
- [52] Gao J, Li M S, Xiao X C, et al. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China [J]. Tectonophysics, 1998, 287(1/4): 213-231.
- [53] 钱青,高俊,熊贤明,等.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,2006,22(5): 1307-1323.
- [54] 张江苏,李注苍.西天山阿吾拉勒一带大哈拉军山组火山岩构造环境分析[J].甘肃地质,2006,15(2): 10-15.
- [55] 安芳,朱永峰.西北天山吐拉苏盆地火山岩 SHRIMP 年代学和微量元素地球化学研究[J].岩石学报,2008,24(12): 2741-2748.

- [56] 张学奎,李注苍.西天山大哈拉军山组火山岩地球化学特征及地质意义[J].甘肃科技,2008,24(3): 32-35.
- [57] 夏换,陈根文,刘群,等.西天山吐拉苏盆地大哈拉军山组火山岩地球化学特征及构造意义[J].大地构造与成矿学,2011,35(3): 429-438.
- [58] Leterrier J, Maury R C, Thonon P, et al. Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1982, 59: 139-154.
- [59] Sun X, Deng J, Yang Z R, et al. Using REE and isotope geochemistry to trace the origin of ore forming materials in Yixian fluorite deposits, China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(13): A1293.
- [60] Condie K C. High field strength element ratios in Archean basalts: A window to evolving sources of mantle plumes *Lithos*[J]. 2005, 79(3/4): 491-504.
- [61] Wood D A. The application of a Th~Hf~Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, 50(1): 11-30.
- [62] Hart S R. A large scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle[J]. *Nature*, 1984, 309: 753-757.
- [63] DaPaolo D J, Daley E E. Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithospheric thinning during continental extension[J]. *Chem. Geol.*, 2000, 169: 157-185.
- [64] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics~The model. *Tectonophysics*, 1981, 75: 135-162.
- [65] Zindler A, Hart S R. Chemical geodynamics[M]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1986, 14: 493-571.
- [66] Allegre C J, Lewin E, Dupre B. A coherent crust-mantle model for the uranium-thorium-lead isotopic system[J]. *Chem. Geol.*, 1988, 70: 211-234.
- [67] Macdonald R, Hawkesworth C J, Health E. The Lesser Antilles volcanic chain: a study in arc magmatism[J]. *Earth Science Reviews*, 2000, 49(1/4): 1-76.
- [68] 陈义贤, 陈文寄, 周新华, 等. 辽西及邻区中生代火山岩年代学、地球化学和构造背景[M]. 北京: 地震出版社, 1997: 1-126.
- [69] 邵济安, 张履桥, 牟堡垒. 大兴安岭中生代伸展造山过程中的岩浆作用[J]. *地学前缘*, 1999, 6(4): 339-346.
- [70] 朱炳泉. 地球科学中同位素体系理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1-235.
- [71] 翟裕生, 石淮立, 林新多, 等. 鄂东大冶式铁矿成因的若干问题[J]. *地球科学*, 1992, 18(3): 239-251.
- [72] Philpotts A R. Origin of certain iron-titanium oxide and apatite rocks[J]. *Economic Geology*, 1967, 62: 303-315.
- [73] 苏良赫. 液相不混溶在岩石学及矿床学中的重要性[J]. *地球科学*, 1984, (1): 1-12.
- [74] 张荣华, 刘隆隆, 陆成庆. 长江中下游某些火山岩铁矿微量元素的地球化学[J]. *中国地质科学院院报*, 1979, 1: 83-103.
- [75] 侯通, 张招崇, 杜杨松. 宁芜南段钟姑矿田的深部矿浆-热液系统[J]. *地学前缘*, 2010, 1: 186-194.
- [76] Hou T, Zhang Z C, Kusky T. Gushan magnetite-apatite deposit in the Ningwu basin, Lower Yangtze River Valley, SE China: hydrothermal or Kiruna-type[J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 43(1): 333-346.
- [77] Bookstrom A A. The magnetite deposits of El Romeral Chile[J]. *Economic Geology*, 1977, 72: 1101-1130.
- [78] Panno S V, Hood W C. Volcanic stratigraphy of the Pilot Knob iron deposits Iron County, Missouri[J]. *Economic Geology*, 1983, 78: 972-982.
- [79] Hildebrand R S. Kiruna-type deposits: their origin and relationship to intermediate subvolcanic plutons in the Great Bear magmatic zone, Northwest Canada[J]. *Economic Geology*, 1986, 81(3): 640-659.
- [80] Frietsch R, Perdahl L A. REE in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types[J]. *Ore Geology Reviews*, 1995, 9: 489-510.
- ①新疆地质矿产勘查开发局第三地质大队. 新疆和静县诺尔湖铁矿详查地质报告. 2011.