

文章编号: 0258-7106 (2014) 02-0255-16

新疆西天山阿克萨依铁矿床地质及地球化学特征^{*}郑仁乔¹, 段士刚^{2*}, 张作衡², 罗 刚³, 蒋宗胜²

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3 四川省地质矿产勘查开发局四〇五地质队, 四川 都江堰 611830)

摘 要 近年新疆阿吾拉勒铁铜成矿带内铁矿找矿勘查取得了突破性进展, 阿克萨依铁矿是其中一个新发现并评价的中型规模铁矿床。该矿床的地质特征与带内其他铁矿明显不同, 成因不明。矿体主要赋存于下石炭统阿克沙克组的粗安岩、玄武岩、安山岩、安山质凝灰岩, 少量赋存于下石炭统大哈拉军山组上段的凝灰岩中。阿克沙克组玄武岩和安山岩富集 LREE 和 LILE (如 Rb、Th、K), 亏损 HREE 和 HSFE (Nb、Ta、Ti), 稀土元素呈右倾的配分模式, 结合 Th-Ta-Hf/3、Zr/4-Y-Nb*2 和 Th-Nb 构造环境判别图解, 认为这些火山岩可能形成于岛弧环境。阿克萨依铁矿的形成与岛弧内发育的火山机构有关, 矿体受火山机构的次级断裂控制, 呈脉状、透镜状, 围岩蚀变发育, 以绿泥石化、碳酸盐化为主, 硅化、绿帘石化为次。矿石主要为浸染状和脉状构造, 局部发育块状和角砾状构造。成矿过程可划分为 3 个阶段: 磁铁矿阶段、石英-硫化物阶段和绿泥石-碳酸盐阶段。阿克萨依铁矿区磁铁矿低 $w(\text{TiO}_2)$ (变化范围 0 ~ 1.7%、平均 0.2%)、 $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ (0 ~ 0.2%、平均 0.06%) 和 $w(\text{NiO})$ (平均值接近 0), 明显不同于岩浆分异型钕钛磁铁矿床磁铁矿的 $w(\text{TiO}_2)$ ($\geq 5.4\%$), 而与热液型和接触交代型铁矿磁铁矿的 $w(\text{TiO}_2)$ 相似 (平均 0.18% ~ 0.33%); 黄铁矿 Co/Ni 比值都较高 (> 1), 具火山成因、热液成因黄铁矿的特征; 硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 -0.6% ~ 0.4% , 成矿流体具岩浆硫的特征。初步认为阿克萨依铁矿床可能是与火山活动紧密相关的火山-次火山热液交代型铁矿床。

关键词 地球化学; 磁铁矿; 地质特征; 阿克萨依铁矿; 西天山

中图分类号: P618.31

文献标志码: A

Geological and geochemical characteristics of Akesayi iron deposit
in Western Tianshan Mountains, XinjiangZHENG RenQiao¹, DUAN ShiGang², ZHANG ZuoHeng², LUO Gang³ and JIANG ZongSheng²

(1 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 Sichuan Geology and Mineral Exploration and Development Bureau of No.405 Geological Team, Dujiangyan 611830, Sichuan, China)

Abstract

In recent years, iron ore prospecting breakthrough was made in the Awulale iron-copper metallogenic belt, Xinjiang. The Akesayi iron deposit is a medium-sized iron deposit which was recently discovered and evaluated. This deposit is obviously different from other iron deposits in the Awulale iron-copper metallogenic belt in geological

* 本文得到国家科技支撑计划 (2011BAB06B02-05)、国家重点基础研究发展计划 (2012CB416803) 和地质矿产调查评价项目 (12120111085060) 的联合资助

第一作者简介 郑仁乔, 男, 1989 年生, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: joez1230@126.com

* * 通讯作者 段士刚, 男, 1983 年生, 博士, 助理研究员, 研究方向为矿床学与矿床地球化学。Email: dsg1102231@163.com

收稿日期 2014-02-20; 改回日期 2014-02-27。秦思婷编辑。

features, and its genesis is unknown. The orebodies are mainly hosted in basalt, trachyandesite, andesite and andesitic tuff of Lower Carboniferous Akeshake Formation, and subordinately in tuff of the Lower Carboniferous Dahalajunshan Formation. Basalt and andesite of the Akeshake Formation are enriched in LREE and LILE (such as Rb, Th, K) and the depletion of HREE and HSFE (Nb, Ta, Ti), with the distribution patterns of REE being right-oblique. Combined with Th-Ta-Hf/3, Zr/4-Y-Nb*2 and Th-Nb diagrams for discrimination of tectonic setting, it is shown that these volcanic rocks might have been formed in an island arc environment. The formation of the Akesayi iron deposit was related to volcanic mechanism developed in the island arc and the orebodies are controlled by secondary faults of volcanic structure, and their shapes are mainly veined and lenticular with well-developed wall rock alterations, mainly chloritization and carbonatization and subordinately silicification and epidotization. The ores are mainly of disseminated and veined structure, and partially of massive and brecciated structure. Mineral formation can be divided into three stages: Magnetite stage, quartz-sulfide stage and chlorite-carbonate stage. Magnetites of the Akesayi iron deposit have low $w(\text{TiO}_2)$ (ranging from 0 to 1.7%, 0.2% on average), $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ (ranging from 0 to 0.2%, 0.06% on average) and $w(\text{NiO})$ (0 on average), significantly different from $w(\text{TiO}_2)$ content of magnetites in the magmatic crystal fractionation deposit ($\geq 5.4\%$) but similar to $w(\text{TiO}_2)$ of magnetite of the hydrothermal and contact metasomatic type iron deposits ($w(\text{TiO}_2)$ ranging from 0.18% to 0.33%). Pyrite Co/Ni ratios are higher (>1), with characteristics of volcanic genesis pyrite and hydrothermal genesis pyrite. Sulfur isotope $\delta^{34}\text{S}$ values range from -0.6% to 0.4% , implying that ore-forming fluid had magmatic sulfur characteristics. Through a comprehensive analysis, the authors preliminarily hold that the Akesayi iron deposit might be a volcanic-subvolcanic hydrothermal metasomatic iron deposit closely related to volcanic activities.

Key words: geochemistry, magnetite, geological features, Akesayi iron deposit, Western Tianshan Mountains

西天山铁铜成矿带是中国重要的找矿远景区,具有分布广、富矿多的特点。近年铁矿找矿勘查取得突破性进展,先后发现和评价了4个大型铁矿床、4个中型铁矿床和一系列小型铁矿床、矿点(冯金星等 2010; 李凤鸣等, 2011; 董连慧等, 2012; 张作衡等 2012; Zhang et al. 2012; Duan et al. 2014; Jiang et al. 2014)。4个大型铁矿床分别为查岗诺尔、智博、敦德和备战,特点为发育矽卡岩化蚀变、与侵入岩缺乏明确的空间关系、矿体受不规则断裂控制,以磁铁矿化为主(汪帮耀等, 2011; 洪为等, 2012a; 2012b; 2012c; 蒋宗胜等, 2012a; 2012b; 王志华等, 2012; 张作衡等, 2012; 张喜, 2013; Zhang et al. 2014; Duan et al. 2014; Jiang et al. 2014)。其成因与火山-次火山气液交代(Duan et al. 2014)或部分与铁矿浆(王志华等, 2012; 蒋宗胜等, 2012a; 2012b; Jiang et al. 2014)有关。4个中型铁矿床分别为式可布台、松湖、尼新塔格和阿克萨依,特点与大型铁矿有所不同,蚀变以低温的绿泥石化、碳酸盐化、钾长石化、绢云母化常见,而缺乏矽卡岩化蚀变;式可布台铁矿床受层控明显、以高品位赤铁矿富矿石为主,被认为是火山沉积成因(袁涛, 2003; 张作衡等,

2012; Zhang et al. 2014);松湖铁矿床受断裂控制,以高品位磁铁矿为主,成因上存在火山沉积(单强等 2009)和火山气液(王春龙等 2012)的争议;尼新塔格铁矿床和阿克萨依铁矿床的地质特征与上述矿床均不同,但二者均以低品位磁铁矿为主,控矿因素不清,成因不明;其他小型矿床、矿点均缺乏研究。阿克萨依铁矿床可能具有不同的成因机理,是不同于上述矿床的海相火山铁成矿系统中新的矿床式,因此,确定其成因类型对构建阿吾拉勒地区海相火山岩型铁矿床成矿系统及对区域上相似铁矿床的勘查具有重要意义。鉴于此,本文对阿克萨依铁矿床的成因开展初步研究。首先,通过野外详细观察总结了矿床地质特征,结合光、薄片观察划分了矿物组合和成矿期次,对磁铁矿、赤铁矿、黄铁矿和黄铜矿等主要金属矿物进行了电子探针成分分析,测试了黄铁矿的硫同位素组成和赋矿围岩火山岩的主量元素和微量元素组成,并基于此探讨了该矿床成矿的大地构造环境和成因。

1 成矿地质背景

阿克苏依铁矿床大地构造位置处在西天山造山带内的伊犁地块上(图1)。西天山造山带夹持于准噶尔板块和塔里木板块之间,在古生代先后经历了早古生代帖尔斯克依古洋、早古生代晚期—晚古生代南天山洋和晚古生代北天山洋的俯冲消减和碰撞(高俊等,2009; Windley et al., 1990; Xiao et al., 2009)。伊犁地块是西天山造山带侧向增生过程中被围限的一个微大陆,发育太古宙和古元古代变质

结晶基底(钱青等 2006; 李继磊等 2009),泥盆纪至早石炭世,受南天山洋和北天山洋的双向俯冲,晚石炭世末增生造山结束(高俊等,2009; Long et al., 2011),早二叠世开始进入碰撞后伸展阶段(高俊等,2009; 朱志新等,2013),发育陆内裂谷型火山岩、水下塌沉积岩等岩石组合(Wang et al., 2006; 2007)。阿吾拉勒矿带内铁矿床的形成可能与晚石炭世特殊的构造环境有关(Duan et al., 2014),而这种特殊的构造环境尚需研究确定。

阿克苏依铁矿床所在区域出露地层主要有元古宇基底变质岩石,以大理岩、黑云母斜长片麻岩和角

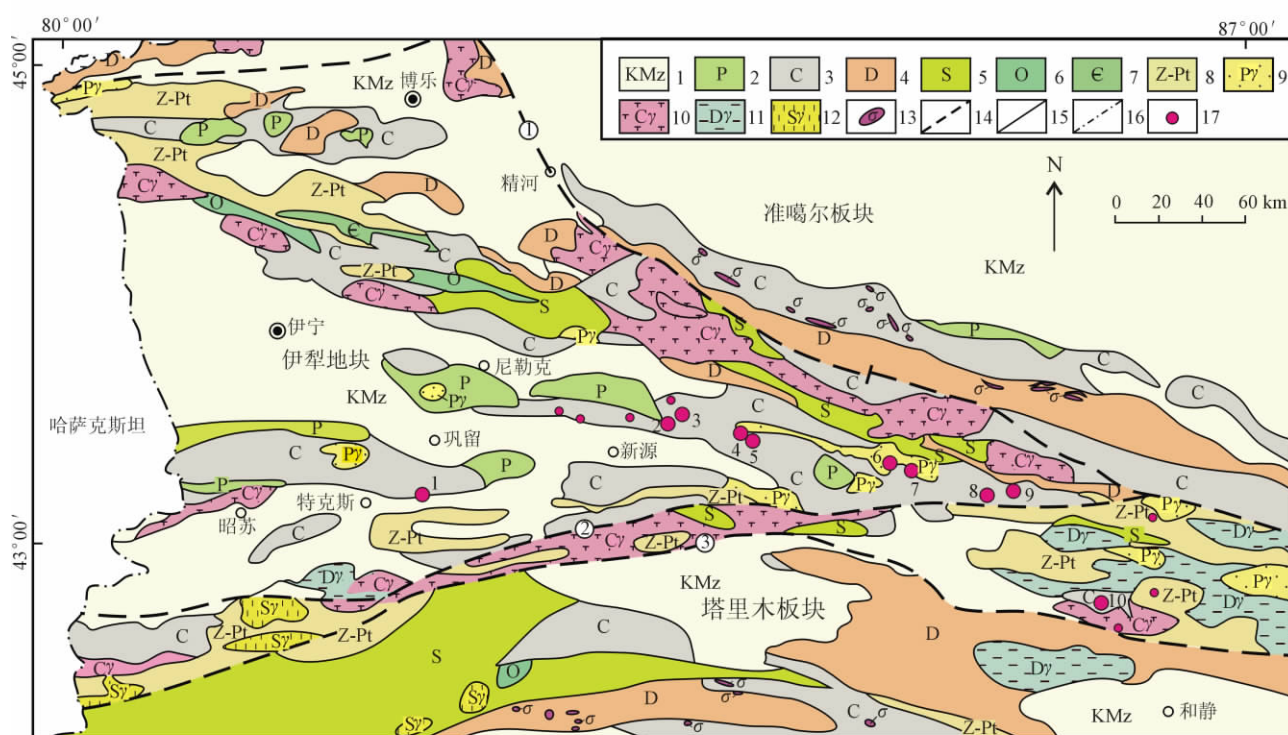


图1 西天山区域地质及铁矿(点)分布图(据洪为等 2012b)

1—中-新生界;2—二叠系;3—石炭系;4—泥盆系;5—志留系;6—奥陶系;7—寒武系;8—前寒武系;9—二叠纪花岗岩;10—石炭纪花岗岩;11—泥盆纪花岗岩;12—志留纪花岗岩;13—铁镁质-超铁镁质岩;14—主要断裂;15—地质界线;16—国界线;17—铁矿床
铁矿代号: 1—阔拉萨依铁矿; 2—式可布台铁矿; 3—松湖铁矿; 4—尼新塔格; 5—阿克苏依铁矿; 6—查岗诺尔铁矿; 7—智博铁矿;
8—敦德铁矿; 9—备战铁矿; 10—莫托萨拉铁锰矿

①—依连哈比尕断裂; ②—尼古拉耶夫线-那拉提北坡断裂; ③—长阿吾子-乌瓦门断裂

Fig. 1 Geological sketch map and distribution of iron deposits in Western Tianshan Mountains(after Hong et al., 2012b)

1—Cenozoic-Mesozoic; 2—Permian; 3—Carboniferous; 4—Devonian; 5—Silurian; 6—Ordovician; 7—Cambrian; 8—Precambrian;
9—Permian granitoids; 10—Carboniferous granitoids; 11—Devonian granitoids; 12—Silurian granitoids; 13—Mafic-ultramafic rocks; 14—Fault;
15—Geological boundary; 16—National boundary; 17—Iron deposit

Name of iron deposit: 1—Kuolasayi; 2—Shikebutai; 3—Songhu; 4—Nixintage; 5—Akesayi; 6—Chagangnuoer; 7—Zhibo; 8—Dunde;

9—Beizhan; 10—Motuosala

①—Yilianhabierga fault; ②—Nikolaev-Narh Nalati fault; ③—Changawuzi-Wuwamen fault

闪二长片麻岩为主;志留系为一套碳酸盐岩-火山岩建造;中泥盆统为一套海相火山碎屑岩建造夹少量正常碎屑沉积岩;上泥盆统为一套滨海-海陆交替相火山岩、陆源碎屑岩和碳酸盐岩建造;石炭系为区内铁矿围岩,分布最广泛,为海相火山喷发-沉积碎屑岩夹碳酸盐岩建造,划分为下石炭统大哈拉军山组、阿克沙克组 and 上石炭统伊什基里克组;下二叠统为一套正常陆源碎屑沉积岩。区内断裂构造和火山机构广泛发育(冯金星等 2010),断裂与区域构造线方向基本一致,呈近东西向。侵入岩十分发育,以石炭纪的花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩及石英闪长岩为主,二叠纪花岗岩次之。

2 矿床地质特征

矿区出露地层有石炭系、二叠系、侏罗系及第四系,产状总体向北陡倾。其中,石炭纪中-基性火山

岩地层发育最为广泛,包括大哈拉军山组、阿克沙克组和伊什基里克组,各地层间为断层接触(图 2)。大哈拉军山组出露于矿区西北部,赋存少量矿体,岩性为凝灰岩;阿克沙克组为主要赋矿层位,岩性为玄武岩、安山岩、粗面安山岩和安山质凝灰岩,矿体主要产于玄武岩、安山岩和安山质凝灰岩中;伊什基里克组岩性为凝灰岩,无矿化。矿区内断裂构造发育,以北西向、近东西向的断层为主,与区域构造线方向一致,次有南东向、北东向的次级共轭断层。矿区北部发育大片侵入岩,与火山岩地层呈断裂接触。北部发育阔尔库岩体(二长花岗岩),东北部为赛肯都鲁岩体(闪长岩、花岗闪长岩),二者接触界线清晰。

阿克萨依铁矿床矿体形态呈透镜状、脉状,近东西向展布(图 2)。矿体在浅部和中部较厚大,往深部逐渐尖灭,倾向北,倾角 $50 \sim 65^\circ$,与火山岩地层交角范围在 $5 \sim 10^\circ$ (图 3)。矿体品位不高,全铁品位介于 $25\% \sim 32\%$ 。其中,东矿段圈定矿体 25 个, T14

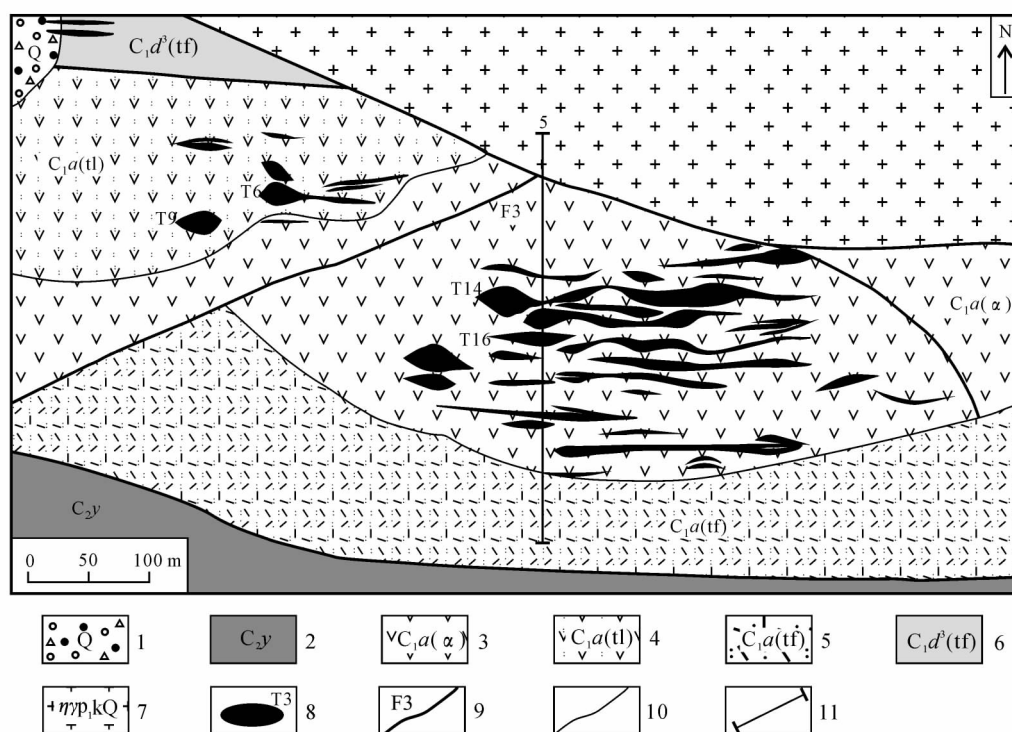


图 2 阿克萨依铁矿床矿区地质略图(据四川省地质矿产勘查开发局四〇五地质队 2011 修改)

1—第四系砾石、砂土、亚砂土;2—伊什基里克组凝灰岩;3—阿克沙克组玄武岩、安山岩;4—阿克沙克组安山质凝灰(熔)岩;5—阿克沙克组凝灰岩;6—大哈拉军山组凝灰岩;7—阔尔库二长花岗岩;8—工业矿体及编号;9—断层;10—地质界线;11—勘探线位置

Fig. 2 Simplified geological map of the Akesayi iron ore district

1—Gravel, sandy soil, sand loam of Quaternary; 2—Tuff of Yishijilik Formation; 3—Basalt and andesite of Akeshake Formation; 4—Andesitic tuff (lava) of Akeshake Formation; 5—Tuff of Akeshake Formation; 6—Tuff of Dahalajunshan Formation; 7—Monzonitic granite of Kuorqu mass; 8—Economic orebody and its serial number; 9—Fault; 10—Geological boundary; 11—Position of exploration line

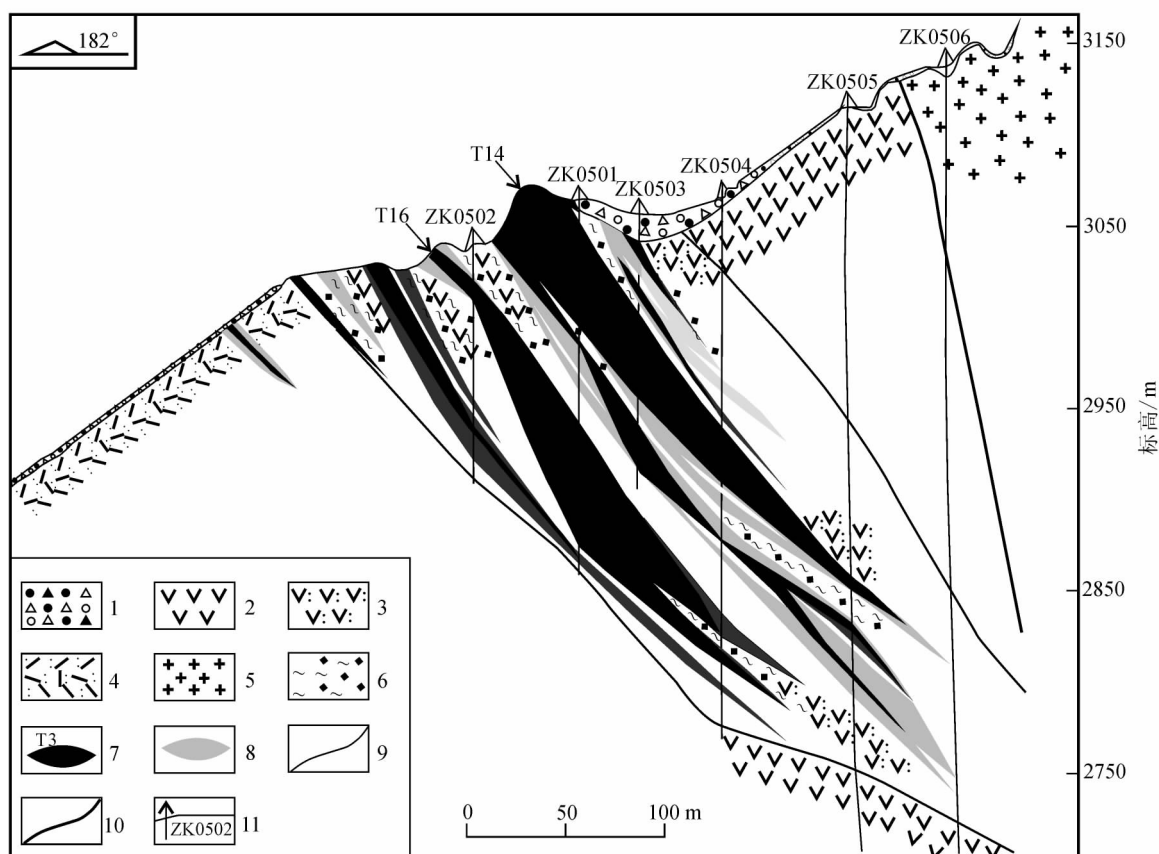


图3 阿克苏依铁矿区东矿段第5勘探线剖面图(据四川省地质矿产勘查开发局四〇五地质队 2011 修改)

1—第四系砾石、砂土、亚砂土; 2—阿克苏组玄武-安山岩; 3—阿克苏组安山质凝灰(熔)岩; 4—阿克苏组凝灰岩; 5—二长花岗岩; 6—绿泥石-磁铁矿化; 7—工业矿体及编号; 8—贫矿体; 9—地质界线; 10—断层; 11—钻孔位置及编号

Fig. 3 No. 5 cross section of the eastern part of the Akesayi iron deposit

1—Gravel, sandy soil, sand loam of Quaternary; 2—Basalt and andesite of Akesake Formation; 3—Andesitic tuff (lava) of Akesake Formation; 4—Tuff of Akesake Formation; 5—Monzonitic granite; 6—Chloritization and magnetite mineralization; 7—Economic orebody and its serial number; 8—Lean orebody; 9—Geological boundary; 10—Fault; 11—Position and serial number of drill hole

号矿体是矿区规模最大的矿体。T14 号矿体呈长条带状,走向近东西,倾向北,倾角 52° ,平均厚度 12 m,向深部延伸约 300 m,顶底板为绿泥石-磁铁矿化玄武质安山岩,矿体具分支复合现象,中富边贫,上富下贫。T16 号矿体位于 T14 号矿体南侧,呈透镜状,向下逐渐膨大,延伸约 250 m,倾向北,倾角 50° ,顶底板均为绿泥石-磁铁矿化安山岩。西矿段圈定矿体 12 个,T6 号、T9 号为主矿体。T6 号矿体呈大透镜体状,向下延伸约 300 m,分支复合现象明显,中部品位较富,边部低,顶底板为磁铁矿化安山质凝灰岩。T9 号矿体特征与 T6 号相似,呈细脉状,向下延伸约 100 m,最终尖灭。东、西矿段各矿体内矿石结构、构造和矿物组成相似,矿体以浸染状矿石最为普遍,中部及底部为少量块状、角砾状矿石,边部以脉

状为主(图 4)。矿体围岩蚀变广泛发育,主要包括绿泥石化、碳酸盐化、硅化和绿帘石化(图 5d)。其中,绿泥石化在各个矿体周围均有发育(图 3),与磁铁矿化关系最为密切,磁铁矿化越强烈,绿泥石化蚀变越发育。碳酸盐化和硅化蚀变主要在紧邻矿体的围岩中发育,局部还可见绿帘石化和少量绢云母化蚀变。

阿克苏依铁矿床的矿石以浸染状(图 4a、d)和脉状(图 4b、c)为主,局部发育少量块状(图 4e)和角砾状(图 4f、g)铁矿石。磁铁矿粒度普遍细小,以半自形-他形细粒结构为主(图 4h)。矿石矿物组成较为单一,主要为磁铁矿,有少量赤铁矿和黄铁矿,微量黄铜矿。脉石矿物主要为斜长石、钾长石(图 5a、b)、绿泥石、方解石、石英和少量辉石、角闪石、绢云

母等。地表发育次生氧化的褐铁矿和少量孔雀石。

根据野外矿体观察和镜下矿相学研究,将阿克萨依铁矿床成矿过程可划分为 3 个阶段。

磁铁矿阶段 磁铁矿多呈半自形-他形中细粒结构,以广泛发育浸染状和脉状构造为特征(图 5b),多见磁铁矿交代辉石、角闪石呈细粒填充其中或与其共生(图 5c);在少量角砾状矿石中,可见磁铁矿呈角砾包裹在绿泥石中(图 4g),或磁铁矿胶结围岩角砾(图 4i)。赤铁矿多以次生交代磁铁矿产出(图 5g)。

石英-硫化物阶段 主要为石英-黄铁矿-极少量

黄铜矿组合,脉状构造为主,细脉穿切、错断磁铁矿等(图 4d),多晚于或略晚于磁铁矿阶段(图 4b,图 5h、i)。

绿泥石-碳酸盐阶段 铁矿石和蚀变围岩中普遍发育晚期绿泥石-碳酸盐蚀变,以面状蚀变为特征,也发育绿泥石-碳酸盐脉穿插铁矿石和蚀变围岩(图 4a、c,图 5e),或胶结早期形成的铁矿石角砾(图 4c)。镜下可见绿泥石-碳酸盐脉多发育对称梳状构造(图 5e),脉状的绿泥石、方解石结晶更好,粒度更粗(图 5f)。

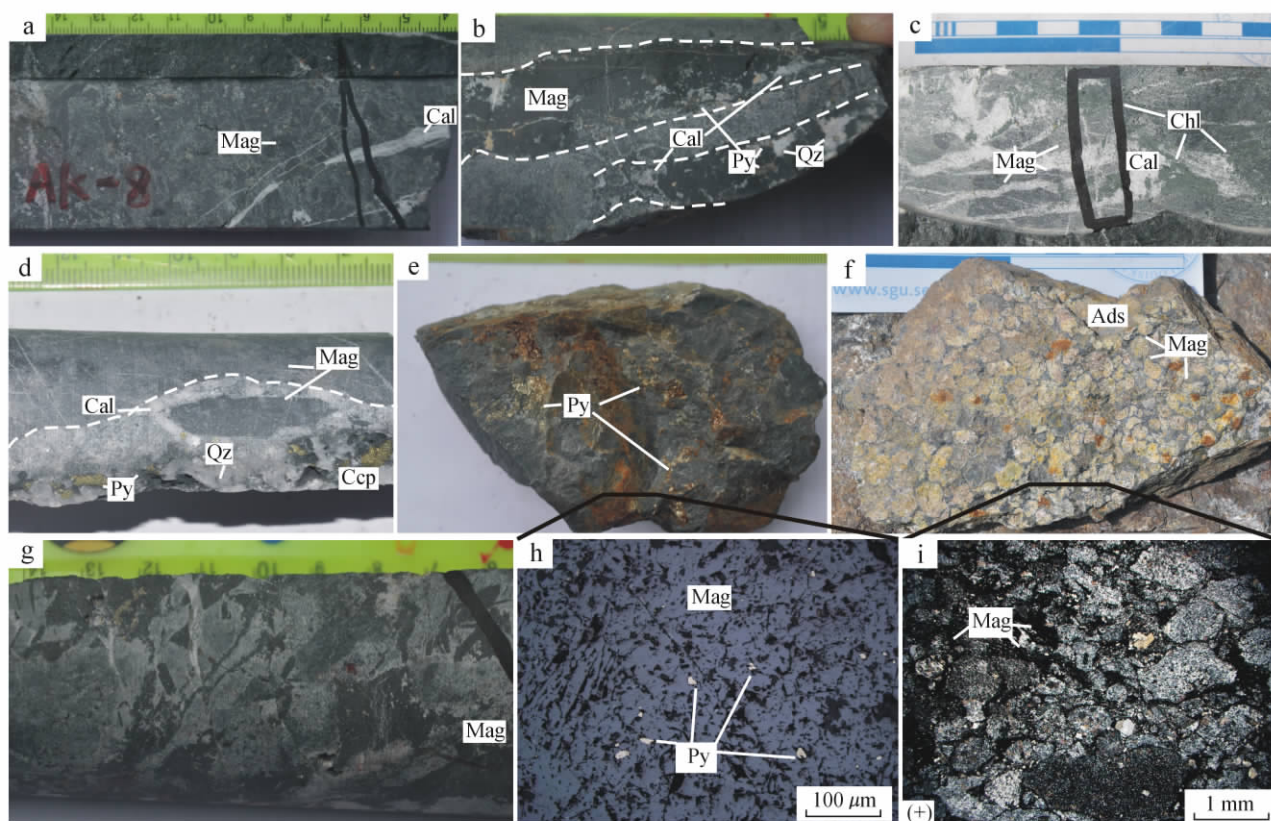


图 4 阿克萨依铁矿床矿石特征

a. 浸染状铁矿石; b. 脉状铁矿石; c. 脉状铁矿石,绿泥石-碳酸盐脉胶结早期磁铁矿石角砾; d. 浸染状铁矿石,发育石英、方解石、黄铁矿、黄铜矿脉; e. 块状铁矿石; f. 角砾状铁矿石,磁铁矿胶结安山岩(Ads)角砾; g. 角砾状铁矿石,磁铁矿呈角砾被围岩胶结; h. 块状铁矿石,磁铁矿呈细粒他形结构,缝隙内发育黄铁矿,反射光; i. 他形-半自形磁铁矿,胶结安山岩角砾,边部圆化

Mag—磁铁矿; Py—黄铁矿; Ccp—黄铜矿; Chl—绿泥石; Cal—方解石; Qz—石英; Ads—安山岩

Fig. 4 Ore features of the Akesayi iron ore deposit

a. Disseminated iron ore; b. Vein iron ore; c. Vein iron ore, early chlorite-carbonate veins cementing early magnetite ore breccia; d. Disseminated iron ore, with well developed quartz, calcite, pyrite, chalcopyrite; e. Massive iron ore; f. Breccia iron ore, magnetite cement andesite (Ads) breccia; g. Breccia iron ore, magnetite breccia cemented by wall rock; h. Massive iron ore, fine-grained magnetite with well developed pyrite in the gap; i. Allotriomorphic-hypidiomorphic magnetite, cementing Andesite breccia, whose edge is rounded

Mag—Magnetite; Py—Pyrite; Ccp—Chalcopyrite; Chl—Chlorite; Cal—Calcite; Qz—Quartz; Ads—Andesite

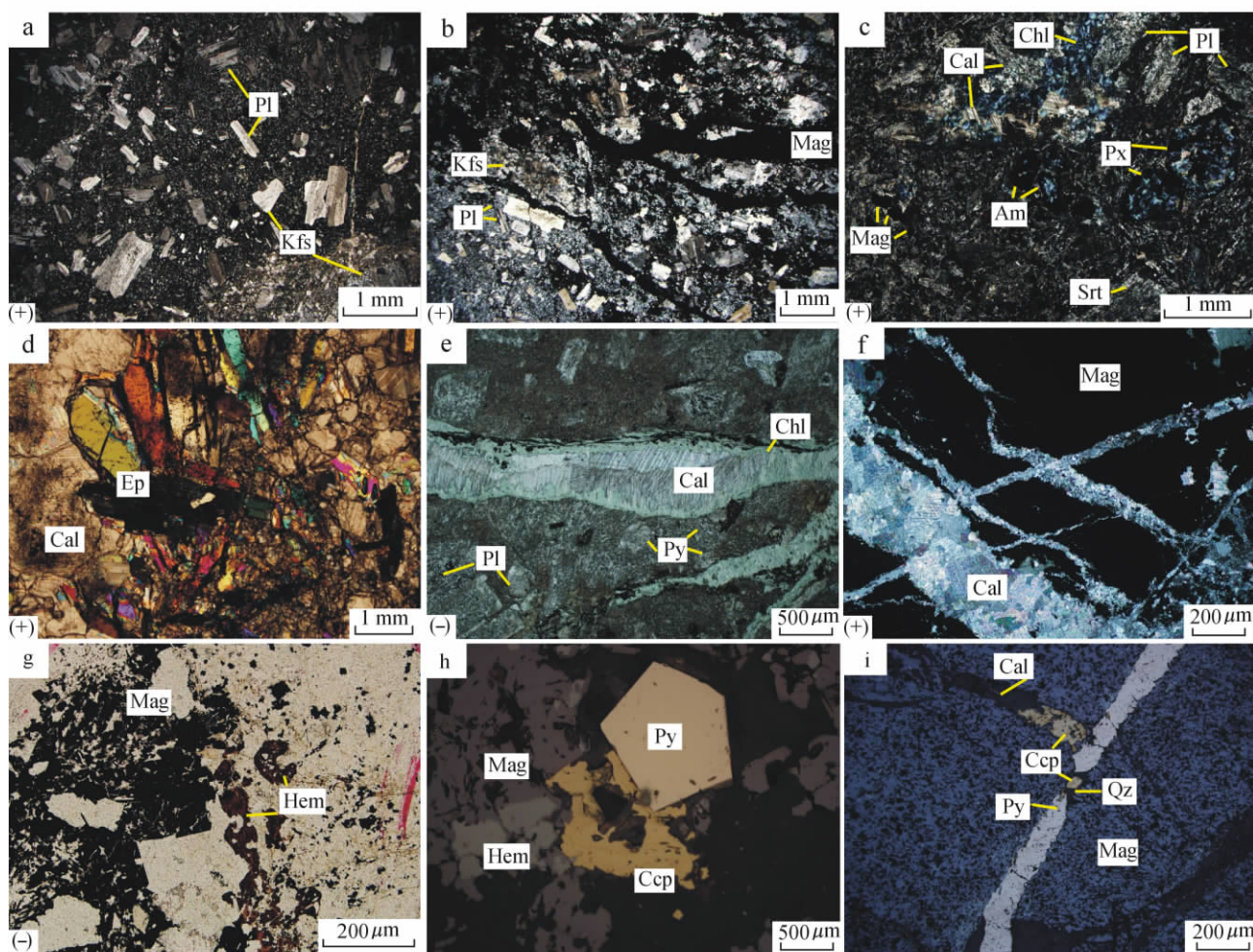


图5 阿克萨依铁矿床主要矿物组成及结构特征

- a. 安山岩中的斜长石、钾长石斑晶; b. 脉状矿石中, 磁铁矿脉穿插围岩; c. 浸染状矿石中, 磁铁矿交代基质、辉石、角闪石、长石斑晶, 边部发育绿泥石、方解石, 伴有绢云母化; d. 绿帘石、碳酸盐化蚀变岩; e. 晚期绿帘石、碳酸盐脉呈对称梳状; f. 晚期碳酸盐脉切入磁铁矿; g. 赤铁矿交代磁铁矿而呈磁铁矿粒状假晶; h. 黄铁矿、黄铜矿略晚于磁铁矿形成, 具共生边结构, 赤铁矿从边部交代磁铁矿, 反射光; i. 含黄铁矿、黄铜矿的石英-碳酸盐脉灌入磁铁矿集合体内, 反射光

Mag—磁铁矿; Hem—磁铁矿; Py—黄铁矿; Ccp—黄铜矿; Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Px—辉石; Am—角闪石; Chl—绿泥石; Ep—绿帘石; Cal—方解石; Qz—石英; Srt—绢云母

Fig. 5 Composition and structural characteristics of main minerals from the Akesayi iron deposit

- a. Plagioclase and K-feldspar phenocryst in andesite; b. Vein ore, magnetite veins penetrating wall rock; c. Disseminated ore, magnetite metasomatize matrix and amphibole, pyroxene, feldspar phenocrysts, whose edge has well developed chlorite, calcite, with sericitization; d. Epidotized, carbonated rock; e. Later stage chlorite and carbonate veins assuming symmetrical toilet structure; f. Later carbonate veins cutting early magnetite; g. Hematite replacing magnetite, forming grained magnetite; h. Pyrite and chalcopyrite, formed slightly later than magnetite, with the symbiotic edge structure, hematite replacing magnetite from the edge, reflected light; i. Quartz-carbonate veins, with pyrite, chalcopyrite, filled in magnetite aggregation, reflected light

Mag—Magnetite; Hem—Hematite; Py—Pyrite; Ccp—Chalcopyrite; Pl—Plagioclase; Kfs—K-feldspar; Px—Pyroxene; Am—Amphibole; Chl—Chlorite; Ep—Epidote; Cal—Calcite; Qz—Quartz; Srt—Sericite

3 样品及分析方法

在矿体蚀变带以外的火山岩中采集了3件玄武

岩和1件安山岩样品, 样品轻度绿泥石化、碳酸盐化, 进行了主量、微量和稀土元素分析。在矿体及蚀变围岩中采集了25件样品, 选取其中18件样品内的磁铁矿、赤铁矿、黄铁矿、黄铜矿进行了电子探针

成分分析,另外,挑选了7件黄铁矿样品进行了硫同位素测试。

全岩分析在中国地质科学院国家地质测试中心完成。主量元素采用X射线荧光法(XRF),在X射线荧光光谱仪(3080E)上测定。微量元素和稀土元素利用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)在离子质谱仪(X-series)上完成测试。

电子探针分析在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成。仪器型号为JXA-8230,工作条件为加速电压20 kV、电流20 nA、束斑直径5 μm ;标样采用天然矿物或合成金属国家标准,分析精度为0.01%。

硫同位素测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。在MAT-251型气体同位素质谱仪上测定;工作条件:加速电压约为580 V,永久磁场强度为0.585 T,灯丝发射电流为300 μA 。分析精度优于 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

4 测试结果

4.1 主量、微量和稀土元素

3件玄武岩和1件安山岩样品(AK-28)在Nb/Y-Zr/TiO₂图解(图6)中,均投影于亚碱性玄武岩范围内。4件样品 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为14.95%~17.98%,平均为16.38%; $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 为5.84%~7.07%; $w(\text{FeO}^T)$ 较高(4.17%~9.26%), $w(\text{TiO}_2)$ 较低(0.74%~2.61%),平均为1.08%(表1)。明显不同于MORB火山岩($w(\text{TiO}_2)$ 平均1.5%),而与岛弧火山岩($w(\text{TiO}_2)$ 平均0.8%)相近(Pearce et al., 1995)。

稀土元素总量变化范围较大, $\Sigma \text{REE} = 76.08 \times 10^{-6} \sim 321.48 \times 10^{-6}$ (表1),样品不同程度地发生轻、重稀土元素的分馏作用[(La/Yb)_N为1.98~20.47],显示出轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾型配分模式(图7a),轻稀土元素内部分异相对较明显,(La/Sm)_N介于1.7~2.96;重稀土元素内部分异较弱,(Gd/Yb)_N介于1.03~4.45。4件火山岩样品Eu异常($\delta \text{Eu} = 0.87 \sim 1$)不明显,为弱负异常。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图7b)中,表现出类似的配分模式,岩石不同程度地具有Sr的亏损,均不同程度地富集K、Rb、Th等大离子亲石元素,明显亏损Nb、Ta、Ti等高场强元素。

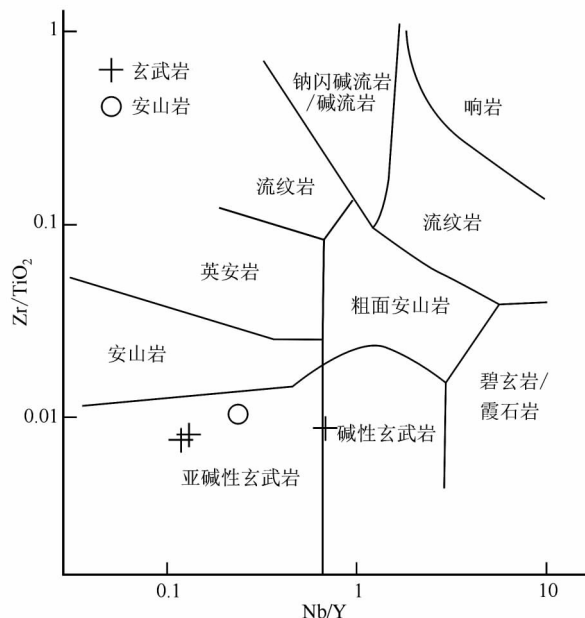


图6 阿克萨依铁矿区火山岩Nb/Y-Zr/TiO₂图解

(据Floyd et al., 1978)

Fig. 6 Nb/Y-Zr/TiO₂ discrimination diagram of the Akesay iron deposit (after Floyd et al., 1978)

4.2 电子探针

磁铁矿和赤铁矿电子探针分析结果见表2。磁铁矿 $w(\text{FeO}_T)$ 总体介于87.47%~96.70%,平均94.52%;整体低 $w(\text{TiO}_2)$ (平均0.20%)、低 $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ (平均0.05%),明显不同于典型岩浆形成的高钛磁铁矿副矿物($\geq 3.08\%$,平均8.42%); $w(\text{SiO}_2)$ 介于0~1.17%,平均0.32%; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 介于0.03%~1.20%,平均0.26%,变化范围较大; $w(\text{Na}_2\text{O})$ 介于0.01%~0.31%; $w(\text{MgO})$ 介于0.01%~0.27%,其他元素含量很低或低于检测限。赤铁矿 $w(\text{FeO}_T)$ 平均91.95%,相比磁铁矿中其余元素含量变化不大,Ti、Si含量略减小,P含量略增大,暗示赤铁矿为后生交代磁铁矿成因,继承了磁铁矿元素特征。二者 $w(\text{FeO}_T)$ 与 $w(\text{SiO}_2)$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{Na}_2\text{O})$ 呈不同程度负相关(图8)。

黄铁矿成分稳定, $\mu(\text{Co})$ 小于0.88%, $\mu(\text{Ni})$ 小于0.3%,黄铁矿的Co/Ni比值多 >1 , $w(\text{Pb})$ 平均0.20%(表3),其余元素含量较低或低于检测限。黄铜矿S、Fe、Cu成分稳定,Co、Pb、Ni等含量较低(表3)。

表 1 阿克苏依矿区火山岩主量、稀土元素和微量元素地球化学分析数据

Table 1 Major element and trace element compositions of volcanic rocks in the Akesayi iron deposit

组分	中-基性火山岩				组分	中-基性火山岩			
	AK-28	AK-47	AK-74	AK-121		AK-28	AK-47	AK-74	AK-121
	$w(B) / \%$					$w(B) / 10^{-6}$			
SiO ₂	57.06	49.39	50.69	50.95	Cr	7.90	2.69	101.00	31.70
TiO ₂	0.97	0.74	2.61	0.81	Co	10.40	33.8	27.50	7.32
Al ₂ O ₃	17.10	15.48	14.95	17.98	Ni	8.92	31.10	48.40	18.10
Fe ₂ O ₃	2.32	5.68	5.35	1.85	Pb	1.31	11.60	12.60	3.24
FeO	3.52	4.15	3.84	2.51	Ga	19.50	20.90	22.00	20.30
MnO	0.78	0.90	0.21	0.93	Cu	68.30	105.00	34.70	2.38
MgO	2.57	4.43	4.51	5.68	Mo	0.27	0.26	0.48	0.26
CaO	3.28	3.59	5.60	6.47	W	2.86	11.40	1.05	0.87
Na ₂ O	6.25	5.29	4.18	3.27	La	7.74	18.50	42.80	10.40
K ₂ O	0.26	1.22	1.66	3.80	Ce	20.60	39.80	121.00	22.50
P ₂ O ₅	0.03	0.56	1.23	0.08	Pr	2.71	4.77	16.30	2.40
LOI	4.17	5.67	4.13	4.85	Nd	12.10	20.30	70.00	9.50
总和	98.31	97.10	98.96	99.18	Sm	2.94	4.27	12.30	2.27
FeO ^T	5.61	9.26	8.65	4.17	Eu	0.91	1.50	3.31	0.89
	$w(B) / 10^{-6}$				Gd	3.48	4.92	9.96	3.28
Rb	10.10	34.60	30.90	213.00	Tb	0.62	0.74	1.18	0.51
Sr	56.30	88.40	807.00	278.00	Dy	3.93	4.18	5.61	3.12
Cs	0.67	1.35	1.97	5.01	Ho	0.82	0.80	0.99	0.66
Ba	49.30	738.00	1305.00	1569.00	Er	2.35	2.25	2.37	1.85
Zr	92.10	59.50	228.00	61.20	Tm	0.41	0.36	0.34	0.31
Hf	2.76	1.77	5.21	1.85	Yb	2.80	2.32	1.85	1.87
Th	5.53	2.81	2.20	2.88	Lu	0.46	0.37	0.27	0.32
U	1.81	2.57	0.75	1.24	ΣREE	80.57	124.08	321.48	76.08
Y	18.70	19.00	23.20	16.20	(La/Yb) _N [*]	1.98	5.72	20.47	3.99
Sc	13.80	24.20	18.60	24.70	(La/Sm) _N [*]	1.70	2.80	2.77	2.96
V	84.10	90.60	209.00	162.00	(Gd/Yb) _N [*]	1.03	1.75	4.45	1.45
Ta	0.31	0.23	0.98	0.19	δEu [*]	0.87	1.00	0.89	1.00
Nb	4.37	2.49	15.90	1.95					

注: * 单位为 1; $\text{FeO}^T = \text{FeO} + 0.8998 \times \text{Fe}_2\text{O}_3$; $\delta\text{Eu} = \text{Eu}_N / (\text{Sm}_N \times \text{Gd}_N)^{1/2}$; N 为球粒陨石标准化。样品 AK-28 为安山岩样品; 其他 3 件为玄武岩样品。

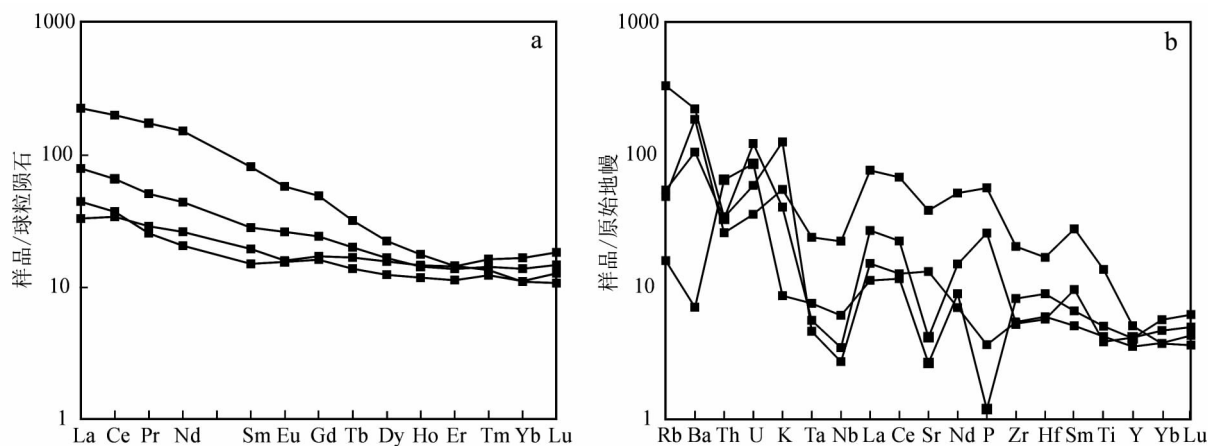


图 7 阿克苏依矿区火山岩稀土元素球粒陨石标准化配分图 (a) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图 (b) (标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE (a) and primitive mantle normalized trace element spider diagrams (b) of the volcanic rocks from the Akesayi iron deposit (normalization values after Sun et al., 1989)

表 2 阿克萨依铁矿床磁铁矿和赤铁矿电子探针分析结果
Table 2 Electron microprobe analyses of magnetite and hematite from the Akesayi iron deposit

样品编号	w(B) /%												
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	MnO	Cr ₂ O ₃	FeO _T	TiO ₂	NiO	总和
磁铁矿													
AK-1-2	0.01	0.02	0.26	0.02	0.22	—	—	0.01	0.10	94.93	0.12	—	95.69
AK-1-3	0.31	0.02	0.28	0.06	0.22	—	—	0.05	0.13	92.40	0.30	0.01	93.78
AK-2-1	0.04	—	0.10	—	—	0.01	—	—	—	96.42	0.06	0.01	96.64
AK-11-1	0.06	0.04	0.07	—	0.10	0.01	—	—	0.06	93.80	0.04	—	94.18
AK-18-1	—	—	0.24	—	—	—	—	0.03	0.10	95.65	0.17	—	96.19
AK-21-2	0.09	0.01	0.08	—	0.08	—	—	—	0.06	94.74	0.26	—	95.32
AK-23-1	0.06	—	0.03	—	0.05	—	—	0.01	0.05	96.70	0.03	—	96.93
AK-40-1	—	0.03	0.29	0.01	0.05	—	—	—	—	95.37	0.16	—	95.91
AK-41-1	0.05	0.02	0.28	0.03	0.06	0.03	—	0.01	0.05	95.95	0.27	—	96.75
AK-42-1	0.01	0.03	0.28	—	0.06	—	—	0.04	0.09	94.30	0.14	—	94.95
AK-42-2	0.01	—	0.14	—	0.07	—	0.11	0.06	0.04	95.27	—	0.06	95.76
AK-65-1	—	—	0.08	0.01	0.01	—	—	—	0.01	94.69	0.20	—	95.00
AK-66-1	0.17	.01	0.12	0.37	0.21	0.02	0.03	—	0.20	91.89	0.14	—	93.16
AK-68-1	0.05	0.11	0.50	0.02	1.17	0.01	0.4	—	0.08	93.57	0.14	—	96.05
AK-82-1	0.18	0.03	0.17	0.04	0.40	0.02	0	0.02	0.04	94.16	0.05	—	95.11
AK-82-2	0.04	0.17	0.51	0.08	0.96	—	—	—	0.04	93.12	0.04	—	94.96
AK-83-1	0.01	0.02	0.03	—	0.02	—	—	0.14	0.01	95.87	0.10	—	96.20
AK-95-1	0.31	0.27	0.35	0.27	0.99	0.05	0.01	0.10	0.06	88.12	0.20	—	90.73
AK-95-2	0.23	—	0.25	0.01	0.12	—	—	—	—	89.59	1.70	—	91.90
AK-120-1	0.08	0.04	0.23	0.03	0.47	—	—	—	—	94.19	0.11	—	95.16
AK-121-3	0.03	0.02	1.20	0.13	1.42	—	—	0.09	0.10	87.47	0.05	—	90.51
赤铁矿													
AK-1-3	0.01	0.04	0.32	0.02	—	—	—	—	0.11	91.71	—	—	92.21
AK-21-2	0.04	0.03	0.07	—	0.06	0.02	—	0.02	0.07	91.68	0.05	—	92.04
AK-21-3	0.09	0.04	0.51	0.01	0.57	0.01	—	0.02	0.06	89.87	0.42	—	91.60
AK-21-3	0.17	0.05	0.07	0.03	0.04	0.02	—	0.09	0.02	90.24	0.18	—	90.91
AK-23-2	0.01	—	0.07	—	0.04	0.03	0.04	—	0.07	93.42	—	—	93.68
AK-26-1	0.05	—	0.01	0.02	0.05	0.01	0.07	—	0.02	91.46	0.03	0.04	91.76
AK-66-3	—	—	0.10	0.01	0.01	0.01	—	—	—	91.24	0.06	—	91.43

注：表中 FeO_T 表示全铁 “—” 表示未检出或低于检测限。

4.3 硫同位素

阿克萨依铁矿床 7 件黄铁矿样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分析结果见表 4。硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $-0.6\text{‰} \sim 0.4\text{‰}$, 变化范围小, 且塔式效应较明显(图 9)。矿区内未见硫酸盐类, 自热液中析出的硫化物具有与总硫相近的硫同位素组成, 故热液硫化物的平均 $\delta^{34}\text{S}$ 值可近似代表成矿热液的 $\delta^{34}\text{S}$ 值, 表明硫源较为单一, 主要为深源岩浆硫(Hoefs 2009)。

5 讨论

5.1 成矿构造背景

阿克沙克组早年解体于大哈拉军山组(李永军等 2009) 其火山岩被认为与大哈拉军山组时代和构造环境接近。阿克萨依铁矿区阿克沙克组火山岩与相邻查岗诺尔、智博、备战等铁矿区大哈拉军山组

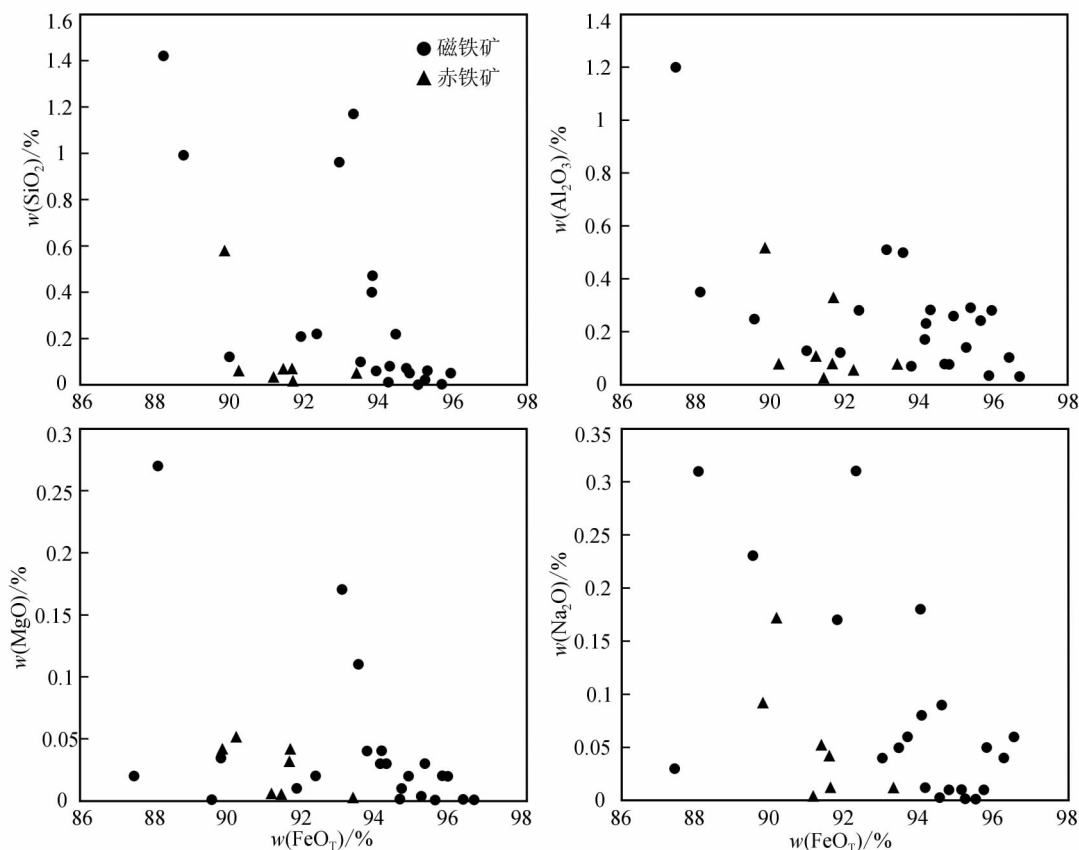


图8 阿克萨依矿床中磁铁矿氧化物相关图解

Fig. 8 Correlation diagram of oxide in magnetite from the Akesayi iron deposit

地球化学特征相似: 以(玄武)安山岩或安山质凝灰岩为主, 富集 Ba、K、Rb、Th 等大离子亲石元素, 而明显地亏损 Nb、Ta、Ti 高场强元素(蒋宗胜等, 2012a; 张喜, 2013; 李大鹏等, 2013), 类似典型岛弧火山岩特征(Pearce, 1983)。因此, 本文将阿克萨依铁矿区火山岩和相邻的查岗诺尔、智博、备战等铁矿区火山岩一起讨论(图 10)。阿克萨依铁矿及相邻铁矿区火山岩, 从低钾-钾玄岩系列均有分布(图 10a), 在 Th-Ta-Hf/3 三角图解(图 10b)中, 这些火山岩均具有从岛弧拉斑玄武岩向钙碱性玄武岩演化的趋势, 表现出岛弧火山岩的特点; 在 Zr/4-Y-Nb*2 三角图解(图 10c)中, 多数玄武质火山岩样品落于岛弧玄武岩区附近; 在不相容元素 Yb 标准化的 Th-Nb 二元协变图(图 10d)中, 多数火山岩样品投点落于大陆岛弧玄武岩和大洋岛弧玄武岩的重叠区, 并偏向大陆岛弧区域。上述分析表明, 阿克萨依矿区阿克沙克组火山岩可能形成于岛弧环境。该结论支持前人岛弧或活动大陆边缘弧的观点(Windley et al., 1990; Zhu et al., 2005; 钱青等, 2006; 孙林华等, 2007; 蒋宗胜等, 2012a; 李大鹏

等, 2013), 而与大陆裂谷或地幔柱的观点(车自成等, 1996; 夏林圻等, 2004)相悖。

5.2 矿床成因

在宏观上, 阿克萨依磁铁矿体切穿围岩火山岩层理, 具有后生特征。矿体围岩蚀变十分发育, 矿体及紧邻的玄武岩、安山岩、凝灰岩围岩均发生强烈的绿泥石化、碳酸盐化蚀变。矿体受构造控制作用较为明显, 呈脉状、透镜状, 膨大收缩、分支复合现象常见。成矿具有多阶段性, 识别出磁铁矿、石英-硫化物和绿泥石-碳酸盐 3 个阶段。其中, 磁铁矿阶段还伴生有极少量的矽卡岩矿物, 如辉石、角闪石。石英-硫化物阶段矿物组合为石英 + 黄铁矿 + 极少量黄铜矿。绿泥石-碳酸盐阶段矿物主要为绿泥石、方解石、石英。成矿方式以充填作用和交代作用为主, 浸染状、脉状构造常见, 局部形成了磁铁矿胶结安山岩碎块的角砾状构造, 或磁铁矿破碎被绿泥石和碳酸盐胶结的角砾状构造, 半自形-他形结构和交代结构发育。从地质特征看, 阿克萨依铁矿床显示热液矿床的特点。

表 3 阿克萨依铁矿床黄铁矿和黄铜矿电子探针分析结果

Table 3 Electron microprobe analyses of pyrite and chalcopyrite from the Akesayi iron deposit

样品编号	w(B) /%											Co/Ni	
	Se	As	S	Pb	Bi	Fe	Cu	Zn	Ni	Sb	Co		总和
黄铁矿													
AK-1-1	0.01	0.01	53.50	0.14	—	46.57	0.02	0.04	0.14	0.01	0.14	100.58	1.00
AK-1-3	0.01	0.02	53.04	0.41	—	46.41	—	0.01	0.09	—	0.13	100.12	1.44
AK-2-1	0.01	—	45.79	0.02	—	47.56	0.01	0.01	—	0.01	0.11	93.52	—
AK-11-2	0.02	0.05	52.87	0.26	—	45.87	—	—	0.11	—	0.63	99.81	5.73
AK-18-1	0.02	0.04	53.45	—	—	46.34	—	0.02	0.30	—	0.10	100.27	0.33
AK-21-1	0.02	—	53.10	—	0.01	46.68	0.01	0.02	—	—	0.41	100.25	—
AK-40-1	0.01	—	53.07	0.21	0.01	46.16	0.02	0.03	0.01	—	0.59	100.11	59.00
AK-40-2	—	0.05	53.25	0.40	—	45.49	—	0.02	0.02	0.01	0.88	100.12	44.00
AK-41-2	—	0.04	53.65	0.23	—	45.92	0.03	—	0.05	—	0.40	100.32	8.00
AK-65-1	—	0.02	53.41	0.36	—	46.55	—	0.02	—	0.01	0.20	100.57	—
AK-68-1	0.01	0.02	53.15	0.22	0.06	46.45	0.01	0.02	0.02	—	0.32	100.28	16.00
AK-71-1	—	—	53.03	0.22	—	46.50	—	—	—	—	0.10	99.85	—
AK-82-1	0.01	—	53.87	0.16	—	46.54	—	—	0.01	—	0.14	100.73	14.00
AK-82-2	0.01	0.02	53.11	—	—	46.39	—	—	0.01	—	0.36	99.90	36.00
AK-82-5	—	—	53.67	—	—	46.10	—	—	0.11	—	0.23	100.11	2.09
AK-83-3	0.02	0.02	53.13	0.28	0.12	46.76	0.05	—	0.02	—	0.12	100.52	6.00
AK-83-4	—	—	52.89	0.21	0.01	46.74	—	0.01	—	0.01	0.10	99.97	—
AK-117-1	0.01	0.02	53.57	0.32	—	45.83	—	—	0.27	0.01	0.15	100.18	0.56
AK-117-1	0.01	0.01	53.50	0.30	0.05	45.98	—	0.02	0.16	—	0.11	100.14	0.69
黄铜矿													
AK-40-1	0.02	—	34.39	—	—	31.98	34.03	0.04	—	—	0.04	100.50	
AK-40-2	—	—	34.90	0.11	—	32.14	33.94	0.07	—	0.01	0.06	101.23	
AK-41-1	—	—	34.55	0.05	0.02	32.01	33.95	0.06	—	0.01	0.07	100.72	
AK-68-1	—	—	34.48	0.06	—	30.16	34.57	0.01	—	—	0.07	99.35	
AK-120-1	—	0.02	34.54	0.23	—	29.38	34.33	0.05	—	—	0.04	98.59	

注 “—”表示未检出或低于检测限。

表 4 阿克萨依矿床金属硫化物同位素分析结果
Table 4 Sulfur isotopic composition of sulfides from the Akesayi iron deposit

样品编号	岩性	测试对象	$\delta^{34}S_{V-CDT}/\text{‰}$
AK-54	浸染状铁矿石	黄铁矿	0.4
AK-68	脉状铁矿石	黄铁矿	0.2
AK-69	浸染状铁矿石	黄铁矿	0.4
AK-70	浸染状铁矿石	黄铁矿	-0.5
AK-71	浸染状铁矿石	黄铁矿	-0.2
AK-73	脉状铁矿石	黄铁矿	0.2
AK-120	浸染状铁矿石	黄铁矿	-0.6

磁铁矿微量元素成分特征对探知磁铁矿矿床的成因类型具有一定的指示意义(徐国风等,1979)。阿克萨依铁矿区内磁铁矿的 $w(\text{Ti})$ 、 $w(\text{Cr})$ 、 $w(\text{Ni})$ 均较低,有别于攀枝花钒钛磁铁矿等晚期岩浆分异的岩浆型铁矿床中高 $w(\text{TiO}_2)$ ($\geq 5.4\%$,真允庆等,1984)的特点。 $w(\text{TiO}_2)$ 变化较大,平均0.2%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 平均0.26%, $w(\text{MnO})$ 平均0.03%,与热

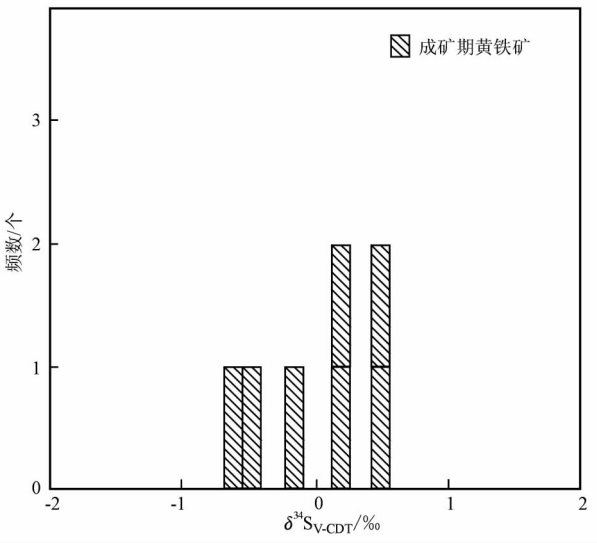


图 9 阿克萨依铁矿床黄铁矿硫同位素直方图
Fig. 9 Sulfur isotope histogram of the Akesayi iron deposit

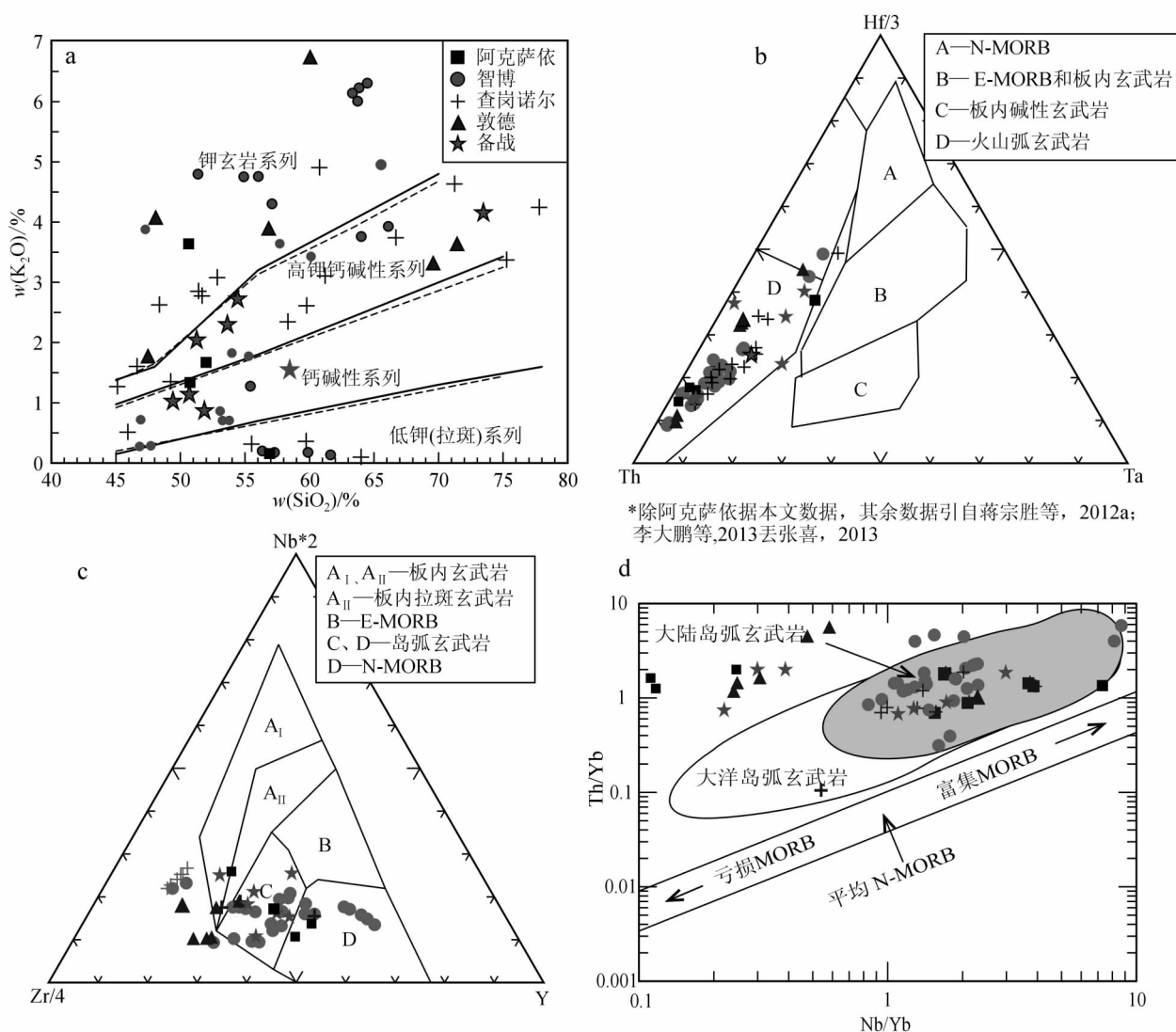


图 10 阿克苏依、智博、查岗诺尔、敦德、备战铁矿区火山岩 SiO_2-K_2O 图解 (a 据 Peccerillo et al. ,1976) 和构造判别图解 (b ~ d ,分别据 Wood ,1980; Meschede ,1986; Pearce et al. ,1995)

Fig. 10 SiO_2-K_2O diagram (a , after Peccerillo et al. , 1976) and discrimination of tectonic setting for the volcanic rocks from the Akesayi , Zhibo , Chagangnuoer , Dundu and Beizhan iron deposits (b ~ d , after Wood , 1980; Meschede , 1986; Pearce et al. , 1995)

液型和接触交代型矿床相似 ($w(TiO_2)$ 平均 0.18% ~ 0.33% [徐国风等, 1979])。因此, 磁铁矿微量元素成分特征支持阿克苏依铁矿床为热液型矿床。

黄铁矿的微量元素在一定程度上反映了其形成条件, 一般认为 Co/Ni 比值越大, 黄铁矿形成温度越高 (盛继福等, 1999)。利用 $Co-Ni$ 图解可判别黄铁矿成因 (Brill, 1989; Monteiro et al. , 2008; 单强等, 2009)。阿克苏依矿区不同类型矿石中大部分黄铁矿的 Co/Ni 比值都较高 (>1) (表 3), 表明其形成温度较高, 在 $Co-Ni$ 图解 (图 11a) 中, 多数点投于火山成因和热液成因区域, 少部分点落于岩浆型与二者

之间的区域, 这同样支持内生热液型矿床的观点。

阿克苏依铁矿区的硫化物组合简单, 仅有黄铁矿和极微量黄铜矿, 因此, 黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值可大致代表热液的总硫值 (Ohmoto et al. , 1979)。热液成矿期的黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值集中于 $-0.6\text{‰} \sim 0.4\text{‰}$, 代表成矿流体中的总硫值与岩浆-热液矿床硫化物的 $\delta^{34}S$ 值 ($-3\text{‰} \sim 1\text{‰}$) 相似 (Hoefs, 2009)。相比邻区铁矿床 (自东向西) 硫同位素值 (图 11b), 与智博铁矿非常接近, 为典型岩浆硫特征, 备战、敦德、查岗诺尔铁矿中硫化物 $\delta^{34}S$ 值相对略高, 但都具有岩浆硫的特征。因此, 本文认为阿克苏依铁矿床可能是与火山活动

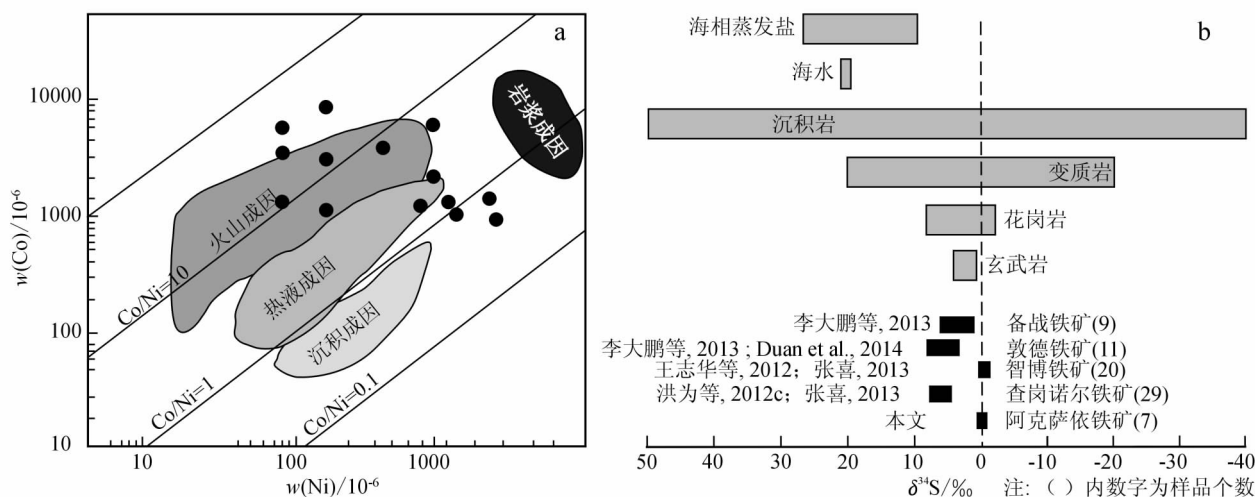


图 11 阿克萨依铁矿各类黄铁矿 Co-Ni 图解 (a) (底图据 Monteiro et al. 2008) 和阿克萨依、查岗诺尔、智博铁矿床硫同位素组成及重要的硫同位素储库 (b) (底图据 Hoefs 2009)

Fig. 11 Co-Ni diagram of different pyrites from the Akesayi iron deposit (a) (after Monteiro et al. ,2008) and sulfur isotopic composition of sulfides from the Akesayi , Chagangnuoer , Zhibo , Dundu , Beizhan iron deposits and some important sulfur reservoirs (b) (after Hoefs ,2009)

紧密相关的热液交代型铁矿床。

晚古生代西天山阿吾拉勒铁成矿带内岩浆-火山活动强烈,古火山机构发育(陈毓川,等 2008;冯金星等 2010)。阿吾拉勒铁成矿带内铁矿床分布与火山机构密切相关(Zhang et al. 2012),由机构中心向两侧,铁矿化可能形成于不同的火山旋回(张喜,2013),其成因被认为是与火山-次火山气液交代(Duan et al. ,2014)或部分与铁岩浆(王志华等,2012;蒋宗胜等,2012a;2012b;Jiang et al. ,2014)有关。阿克萨依铁矿床也被认为产在火山机构中(四川省地质矿产勘查开发局四〇五地质队,2011),矿区的火山岩相主要分为爆发相、喷溢相、喷发-沉积相、潜火山岩相,据此圈出的火山机构中心位于东矿区,具有一定的变形,现在为长轴东西向的椭圆形,中心岩性以次火山岩——安山质凝灰熔岩为主,外侧依次为安山岩、火山碎屑岩,火山通道附近的次级断裂、裂隙中赋存了铁矿体,形态较复杂;火山机构对应环状的磁异常和重力异常。

综合以上证据,笔者认为阿克萨依铁矿床可能是与火山活动紧密相关的火山-次火山热液交代型铁矿床。

6 结 论

阿克萨依铁矿床的富矿围岩火山岩形成于岛弧

环境,矿床的形成与岛弧内发育的火山机构有关,矿床的形成稍晚于围岩,受火山机构的次级断裂控制,矿床的形成具有多阶段性,包括磁铁矿、石英-硫化物和绿泥石-碳酸盐 3 个阶段。

阿克萨依铁矿区磁铁矿的 $w(\text{TiO}_2)$ (范围 0 ~ 1.7%、平均值 0.2%)、 $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ (范围 0 ~ 0.2%、平均值 0.06%) 和 $w(\text{NiO})$ (平均值接近 0) 都较低,明显不同于岩浆分异型钒钛磁铁矿床内磁铁矿的 $w(\text{TiO}_2)$,而与热液型和接触交代型铁矿床磁铁矿的 $w(\text{TiO}_2)$ 、 $w(\text{MnO})$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 等相似;黄铁矿的 Co/Ni 比值都较高(>1),具火山成因、热液成因黄铁矿的特征;硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 -0.6‰ ~ 0.4‰ ,成矿流体具岩浆硫的特征。综合分析,笔者初步认为阿克萨依铁矿床可能是与火山活动紧密相关的火山-次火山热液交代型铁矿床。

志 谢 野外工作期间得到了四川省四〇五地质队阿克萨依铁矿项目组成员的大力支持和帮助,电子探针分析过程得到中国地质科学院矿产资源研究所陈振宇和陈小丹老师的指导。审稿专家提出了宝贵的修改意见,进一步完善了本文。在此一并表示感谢!

参考文献/References

车自成,刘 良,刘洪福,罗金海. 1996. 论伊犁古裂谷[J]. 岩石学

- 报, 12(3): 478-490.
- 陈毓川, 刘德权, 唐延龄, 王登红, 董连慧, 徐新, 王晓地. 2008. 中国天山矿产及成矿体系[M]. 北京: 地质出版社. 246-287.
- 董连慧, 李基宏, 冯京, 庄道泽, 刘斌, 李凤鸣, 屈迅, 姜云辉. 2012. 新疆地质矿产勘查2011年主要成果和进展[J]. 新疆地质, 30(1): 1-4.
- 冯金星, 石福品, 汪邦耀, 胡建明, 王江涛, 田敬全. 2010. 西天山阿吾拉勒成矿带火山岩型铁矿[M]. 北京: 地质出版社. 1-132.
- 高俊, 钱青, 龙灵利, 张喜, 李继磊, 苏文. 2009. 西天山的增生造山过程[J]. 地质通报, 28(12): 1804-1816.
- 洪为, 张作衡, 赵军, 王志华, 李凤鸣, 石福品, 刘兴忠. 2012a. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床矿物学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 31(2): 191-211.
- 洪为, 张作衡, 蒋宗胜, 李凤鸣, 刘兴忠. 2012b. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床磁铁矿和石榴石微量元素特征及其对矿床成因的制约[J]. 岩石学报, 28(7): 2089-2101.
- 洪为, 张作衡, 李凤鸣, 刘兴忠. 2012c. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床稳定同位素特征及其地质意义[J]. 岩矿测试, 31(6): 1077-1087.
- 蒋宗胜, 张作衡, 侯可军, 洪为, 王志华, 李凤鸣, 田敬全. 2012a. 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): 2074-2088.
- 蒋宗胜, 张作衡, 王志华, 李凤鸣, 田敬全. 2012b. 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, 31(5): 1051-1066.
- 李大鹏, 杜杨松, 庞振山, 涂其军, 张永平, 葛松胜, 沈立军, 王开虎. 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.
- 李凤鸣, 彭湘萍, 石福品, 周昌平, 陈建中. 2011. 西天山石炭纪火山-沉积盆地铁锰矿成矿规律浅析[J]. 新疆地质, 29(1): 55-60.
- 李继磊, 苏文, 张喜, 刘新. 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(12): 1852-1862.
- 李永军, 李注苍, 周继兵, 高占华, 高永利, 佟黎明, 刘静. 2009. 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, 25(6): 1332-1340.
- 钱青, 高俊, 熊贤明, 龙灵利, 黄德志. 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): 1307-1323.
- 单强, 张兵, 罗勇, 周昌平, 于学元, 曾乔松, 杨武斌, 牛贺才. 2009. 新疆尼勒克县松湖铁矿床黄铁矿的特征和微量元素地球化学[J]. 岩石学报, 25(6): 1456-1464.
- 盛继福, 李岩, 范书义. 1999. 大兴安岭中段铜多金属矿床微量元素研究[J]. 矿床地质, 18(2): 153-160.
- 四川省地质矿产勘查开发局四〇五地质队. 2011. 新疆新源县阿克萨依铁矿详查地质报告[R]. 内部资料.
- 孙林华, 彭头平, 王岳军. 2007. 新疆特克斯东南大哈拉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.
- 汪帮耀, 胡秀军, 王江涛, 邵青红, 凌锦兰, 郭娜欣, 赵彦锋, 夏昭德, 姜常义. 2011. 西天山查岗诺尔铁矿床地质特征及矿床成因研究[J]. 矿床地质, 30(3): 385-402.
- 王春龙, 王义天, 董连慧, 张兵, 任毅. 2012. 新疆西天山松湖铁矿床稀土和微量元素地球化学特征及其意义[J]. 矿床地质, 31(5): 1038-1050.
- 王志华, 张作衡, 蒋宗胜, 洪为, 田敬全. 2012. 西天山智博铁矿床磁铁矿成分特征及其矿床成因意义[J]. 矿床地质, 31(5): 983-998.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平, 王立社. 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.
- 徐国风, 邵洁涟. 1979. 磁铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 地质与勘探, 3: 30-37.
- 袁涛. 2003. 新疆西天山莫托沙拉铁(锰)矿床与式可布台铁矿床地质特征对比[J]. 地质找矿论丛, 18: 88-92.
- 张喜. 2013. 西天山智博和查岗诺尔铁矿成矿成矿背景与成矿作用研究(博士论文)[D]. 导师: 董连慧, 高俊. 北京: 中国科学院大学. 1-159.
- 张作衡, 洪为, 蒋宗胜, 段士刚, 王志华, 李凤鸣, 石福品, 赵军, 郑仁乔. 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.
- 真允庆, 马丽华, 李中生. 1984. 鞍山式铁矿与邯邢式铁矿的可能联系[J]. 武汉地质学院学报, 27(4): 71-80.
- 朱志新, 董连慧, 王克卓, 赵同阳, 徐仕琪, 陈邦学, 李平, 靳留圆. 2013. 西天山造山带构造单元划分与构造演化[J]. 地质通报, 32(2-3): 297-306.
- Brill B A. 1989. Trace-element contents and partitioning of elements in ore minerals from the CSA Cu-Pb-Zn deposit[J]. Australia, Canadian Mineralogist, 27: 263-274.
- Duan S G, Zhang Z H, Jiang Z S, Zhao J and Zhang Y P. 2014. Geology, geochemistry, and geochronology of the Dundee iron-zinc ore deposit in western Tianshan, China[J]. Ore Geology Review, 57: 441-461.
- Floyd P A and Winchester J A. 1978. Identification and discrimination of altered and metamorphosed volcanic rocks using immobile elements[J]. Chemical Geology, 21(3-4): 291-306.
- Hoefs J. 2009. Stable isotope geochemistry [J]. 6th edition. Berlin: Springer Verlag. 1-285.
- Jiang Z S, Zhang Z H, Wang Z H, Duan S H, Li F M and Tian J Q. 2014. Geology, geochemistry, and geochronology of the Zhibo iron deposit in the Western Tianshan, NW China: Constraints on metallogen-

- esis and tectonic setting[J]. *Ore Geology Review*, 57: 406-424.
- Long L L, Gao J, Klemd R, Beier C, Qian Q, Zhang X, Wang J B and Jiang T. 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(3-4): 321-340.
- Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. *Chemical Geology*, 56(3-4): 207-218.
- Monteiro L V S, Xavier R P, Hizman M W, Juliani C, Filho C R S and Carvalho E R. 2008. Mineral chemistry of ore and hydrothermal alteration at Sossego iron-copper-gold deposit, Carajás mineral province, Brazil[J]. *Ore Geology Review*, 34: 317-336.
- Ohmoto H and Rye R O. 1979. Isotopes of Sulfur and Carbon[A]. In: Barnes H L, ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*[C]. New York: Wiley and Sons. 509-567.
- Pearce J A. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins[A]. In: Hawkesworth C J and Norry M J, eds. *Continental basalts and mantle xenoliths*[C]. U. K: Shiva, Cheshire. 230-249.
- Pearce J A and Peate D W. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc lavas[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 251-285.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63-81.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[A]. In: Saunders A D and Norry M J, eds. *Magmatism in the ocean basin*[C]. Geological Society Special Publications #2(1) 313-345.
- Wang B, Faure M, Cluzel D, Shu L, Charvet J, Meffre S and Ma Q. 2006. Late Paleozoic tectonic evolution of the north West Chinese Tianshan belt[J]. *Geodinamica Acta*, 19(3-4): 237-247.
- Wang B, Shu L S, Cluzel D, Faure M and Charvet J. 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.
- Windley B F, Allen M B, Zhang C, Zhao Z Y and Wang G R. 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tien Shan Range, central[J]. *Asia. Geology*, 18(2): 128-131.
- Wood D A. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 50(1): 11-30.
- Xiao W J, Windley B, Huang B C, Han C M, Yuan C, Chen H L, Sun M, Sun S and Li J L. 2009. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1189-1217.
- Zhang X, Tian J, Gao J, Klemd R, Dong L, Fan J, Jiang T, Hu C and Qian Q. 2012. 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 Z H, Hong W, Jiang Z S, Duan S G, Li F M and Shi F P. 2014. Geological characteristics and metallogenesis of iron deposits in western Tianshan, China[J]. *Ore Geology Review*, 57: 425-440.
- Zhu Y F, Zhang L F, Gu L B, Guo X and Zhou J. 2005. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan Mountains[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(19): 2201-2212.