

文章编号: 0258-7106(2012)05-1038-13

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*

王春龙¹, 王义天^{1*}, 董连慧², 张兵³, 任毅³

(1 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; 2 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局, 新疆 乌鲁木齐 830000; 3 新疆地质矿产勘查开发局第七地质大队, 新疆 乌苏 833300)

摘要 松湖铁矿床位于新疆西天山阿吾拉勒成矿带中段, 赋存于石炭系大哈拉军山组火山-沉积岩系中。矿体呈似层状、透镜状, 主要受近EW向、NNW向高角度逆断层控制。矿石主要呈块状、条带状、团块状构造, 结构主要为半自形-他形粒状, 矿石矿物主要为磁铁矿, 其次为赤铁矿、黄铁矿及黄铜矿, 脉石矿物主要为钾长石、绿泥石、方解石、绿帘石及阳起石等。围岩蚀变发育, 在垂向和水平方向上具有分带性。矿区围岩是阿吾拉勒地区早石炭世岛弧火山岩的组成部分, 不同岩性具有类似的稀土元素配分模式, 均为轻稀土元素富集的右倾型, 发育弱的负铈异常, 中到弱的负钕或正钕异常。矿石中磁铁矿的 ΣREE 值变化于 $20.75 \times 10^{-6} \sim 65.41 \times 10^{-6}$, 配分模式为轻稀土元素富集的右倾型, 发育中到弱的负铈及负钕异常。磁铁矿与围岩的稀土元素特征表明二者具有成因联系, 与岛弧火山作用有关。磁铁矿微量元素特征表明成矿物质来源于深部, 磁铁矿为火山热液交代成因。结合矿床地质特征, 认为松湖铁矿床为海相火山热液型矿床。

关键词 地球化学 稀土和微量元素 铁矿床 松湖 西天山

中图分类号 P618.31

文献标志码 A

Geochemical characteristics of rare earth and trace elements compositions of Songhu iron deposit in western Tianshan of Xinjiang and their significance

WANG ChunLong¹, WANG YiTian¹, DONG LianHui², ZHANG Bing³ and REN Yi³

(1 MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 3 No. 7 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Wusu 833300, Xinjiang, China)

Abstract

Located in the center of the Awulale metallogenic belt of Western Tianshan, the Songhu iron deposit is hosted by Lower Carboniferous Dahalajunshan volcanic-sedimentary Formation. Ore bodies which occur in stratoïd and lenticular forms are mainly controlled by the nearly EW-trending or NWW-trending thrust faults. Ore structures mainly occur in massive, striped, and agglomerated forms, whereas ore textures dominantly display the subhedral-anhedral granular form. Ore minerals are mainly magnetite, with minor hematite, pyrite and chalcopyrite, while gangue minerals are mainly potassium feldspar, chlorite, calcite, epidote and actinolite. The alteration of wall rock with zonation in vertical and horizontal directions is well developed. The wall rocks constitute a part of volcanic rocks of the Carboniferous island arc in Awulale area, having similar chondrite-normalized

* 本文受中国地质调查局地质大调查工作项目(编号: 1212011085527)资助

第一作者简介 王春龙, 男, 1987年生, 硕士研究生, 矿床学专业。Email: chunlong-wang@hotmail.com

** 通讯作者 王义天, 男, 1969年生, 博士, 研究员, 从事构造与成矿研究。Email: wyt69@263.net

收稿日期 2012-06-30; 改回日期 2012-08-30。秦思婷编辑。

REE patterns and rich LREE, with weak Ce negative anomalies and moderate to weak Eu positive or negative anomalies. Magnetite contains $20.75 \times 10^{-6} \sim 65.41 \times 10^{-6}$ REE, and there exist LREE enrichment, weak Ce negative anomalies and moderate to weak Eu negative anomalies. REE characteristics of the wall rock and the magnetite imply that there is a genetic connection between them, and both of them are related to volcanism in an island arc environment. Trace elements of the magnetite show that the ore-forming material was derived from the depth and magnetite was generated by volcano-hydrothermal replacement. Combined with ore geology, the authors have drawn the conclusion that the Songhu iron deposit is a marine volcanic hydrothermal deposit rather than a volcanic sedimentary deposit as considered by previous researchers.

Key words: geochemistry, REE and trace elements, iron deposit, Songhu, Western Tianshan

新疆西天山阿吾拉勒成矿带中铁矿床普遍发育,已发现的大、中型铁矿床主要有查岗诺尔、备战、智博、式可布台、松湖、尼新塔格等,显示了巨大的成矿潜力和良好的找矿前景(董连慧等,2012)。近年来也取得了一系列研究成果(如董连慧等,2011;蒋宗胜等,2012;王志华等,2012;洪为等,2012;张作衡等,2012;Zhang X et al., 2012; Zhang et al., 2012)。松湖铁矿床是近年来在成矿带中段发现的中型铁矿床,前人的研究相对较少。王军年等(2009)根据矿床地质特征以及赋矿建造特征,认为其属于与海相火山-侵入活动有关的弱磁性沉积型铁矿床;单强等(2009)研究了其矿物特征和微量元素特征,认为该矿床为与火山岩有关的沉积型铁矿床。本文在大量野外调查基础上,以松湖铁矿床的围岩和矿石中的磁铁矿为研究对象,对其进行了系统的稀土和微量元素地球化学研究,以探讨成矿作用过程中元素地球化学行为,进而揭示成矿物质来源。

1 地质背景

新疆西天山阿吾拉勒成矿带的大地构造位置为西天山伊犁石炭纪—二叠纪裂谷(图 1a)。石炭纪—二叠纪时期,阿吾拉勒发生了从俯冲-碰撞造山向后碰撞伸展-拉张环境的构造转折,经历了洋壳俯冲、弧火山活动、陆块碰撞以及地壳伸展减薄等演化过程(Gao et al., 1998;熊小林等,2001;赵振华等,2004;朱永峰等,2006;龙灵利等,2008;高俊等,2009;Jong et al., 2009;杨武斌等,2010)。其中,铁成矿作用主要与石炭纪的岛弧-陆缘弧火山作用有关,早期发育的一系列岛弧钙碱性火山岩为火山热液及火山沉积型铁矿床的赋矿围岩(袁涛,2003;卢宗柳等,2006),中-后期形成弧后拉张环境的玄武岩-

流纹岩组合,则为矿浆复合型铁矿床的含矿岩系(冯金星等,2010;汪帮耀等,2011)。

区内出露的地层由古至新主要有中-上泥盆统坎苏组、下石炭统大哈拉军山组、下石炭统阿克沙克组、上石炭统伊什基里克组、中-下侏罗统喀什河组、古近系红色岩组和第四系陆源碎屑沉积物(图 1b)。坎苏组主要由中性和酸性凝灰岩以及火山碎屑岩组成。大哈拉军山组为一套火山岩及火山碎屑岩组合,岩性包括玄武质安山岩、安山岩、凝灰岩及灰岩。阿克沙克组下部为海相碳酸盐-化学沉积建造,上部为海相中基性火山岩、火山碎屑岩组合。伊什基里克组为海相基性、中性、中酸性、酸性和碱性火山岩组合,以及火山碎屑沉积建造和碳酸盐岩-化学沉积岩建造。喀什河组第一岩性段由砾岩、砂砾岩、细砂岩夹泥质粉砂岩组成,第二岩性段主要为含煤岩层。红色岩组由泥岩、钙质泥质砂砾岩组成。

区域上,阿吾拉勒山南、北两侧的巩乃斯河大断裂和喀什河大断裂是成矿带的边界断裂。区内褶皱构造主要为巩乃斯复向斜,呈 NWW 向展布,松湖铁矿床即位于复向斜的北翼。

区内侵入岩以中性及酸性深成侵入岩为主,主要有二叠纪的花岗岩,多呈近 EW 向、NW 向岩基状产出,个别呈岩株状产出(图 1b)。规模较大的岩体主要有库尔德能岩体、依生布古岩体和坎苏岩体,岩性以碱性正长花岗岩为主,局部见少量中酸性脉岩。

2 矿床地质特征

2.1 地层

矿区出露地层主要为下石炭统大哈拉军山组第二岩性段,为一套火山碎屑岩-碳酸盐岩组合(图 2)。火山碎屑岩包括凝灰质砂岩、岩屑晶屑凝灰岩、含角砾岩屑晶屑凝灰岩、晶屑熔结凝灰岩等;碳酸盐岩主

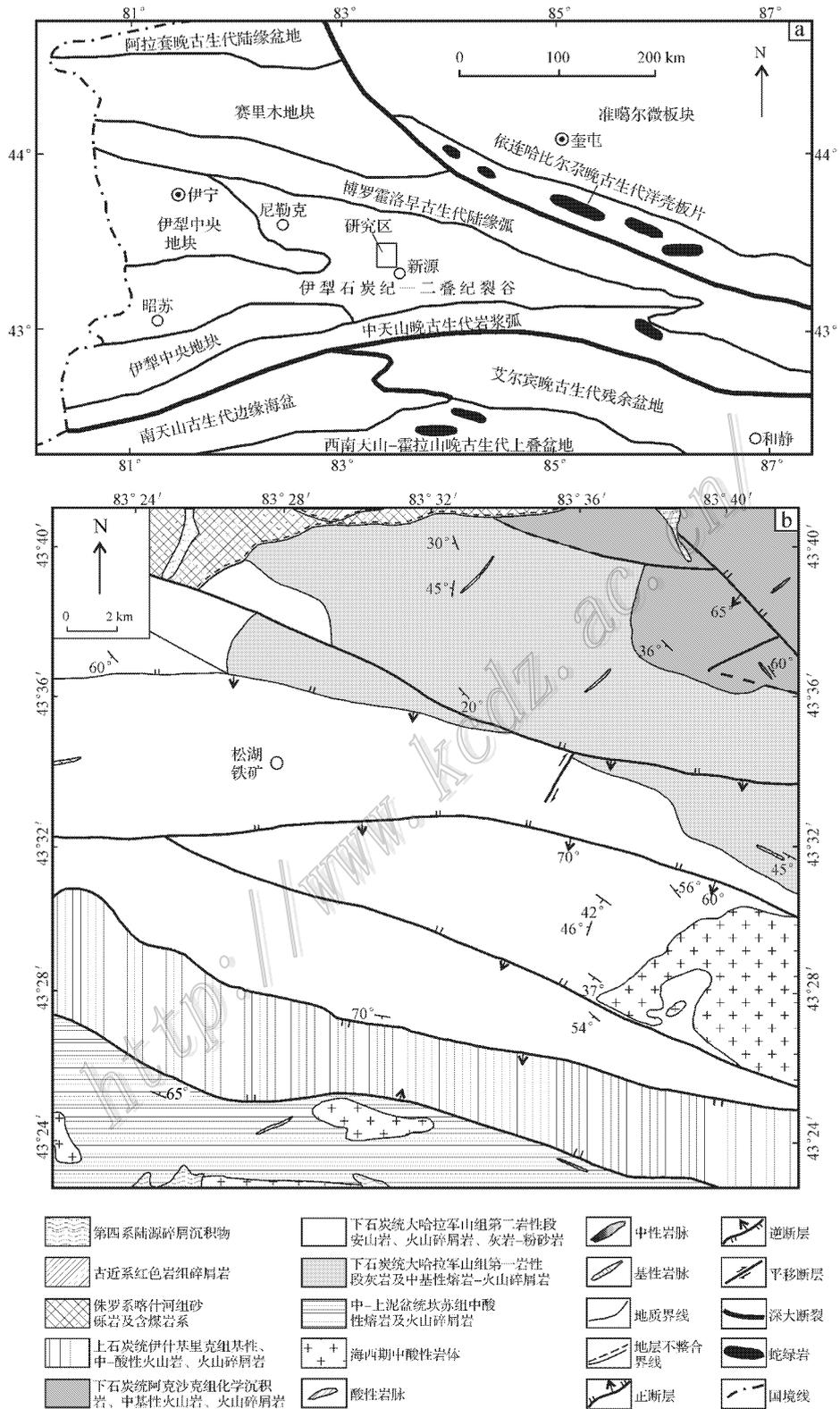


图 1 西天山大地构造位置图(a)据何国琦等 2004)和松湖铁矿地质图(b)

Fig. 1 Tectonic map of Western Tianshan (a) after He et al., 2004) and geological map of the Songhu iron deposit (b)

新疆地矿局第七地质大队. 2010. 新疆尼勒克县松湖铁矿深部及外围调查评价总体设计. 内部资料.

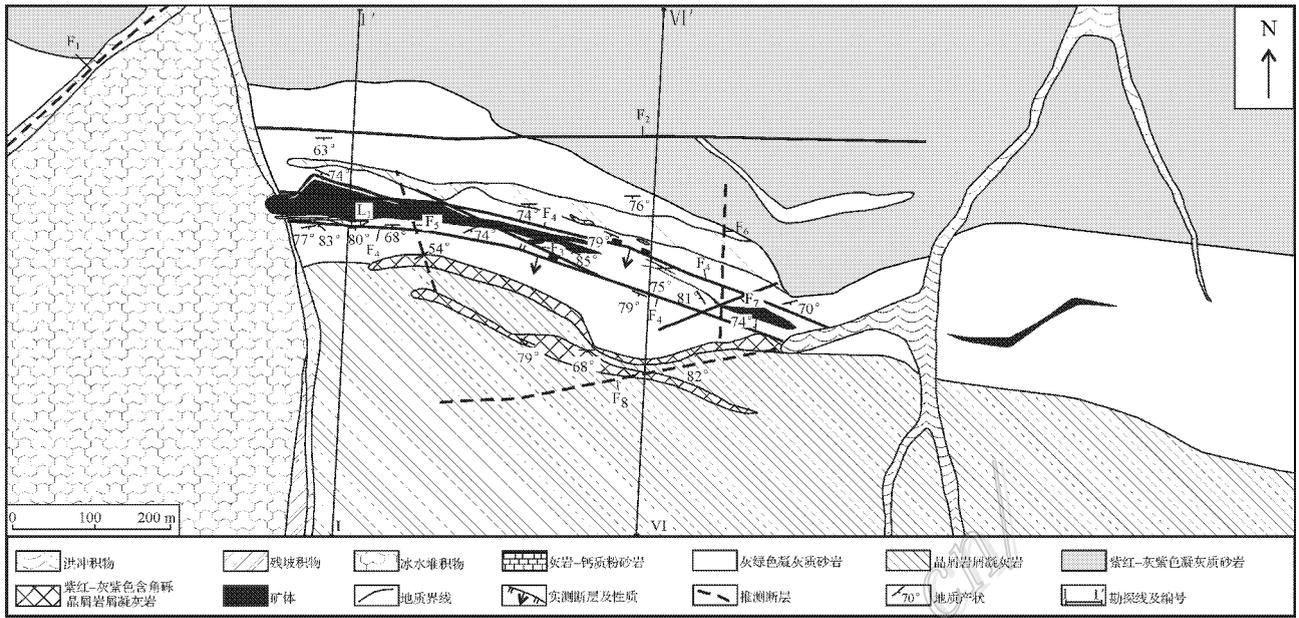


图 2 松湖铁矿矿床地质图^①

Fig. 2 Geological map of the Songhu iron deposit

要以夹层的形式分布于火山碎屑岩中,岩性包括灰岩、钙质粉砂岩和砂屑灰岩。

2.2 构造

矿区总体表现为单斜构造,褶皱不发育,断裂构造和节理裂隙发育。近 EW 向以及 NWW 向断层、节理为主要控矿构造,矿化蚀变沿破碎带发育(图 2)。NE 向断裂发育于矿体边部及内部,性质为正左行断层,形成较晚,明显破坏了矿体的连续性。NW 向以及近 SN 向断裂构造与矿体呈大角度相交并穿插矿体,由于断距较小,对矿体的完整性和连续性影响不大。

2.3 矿体及矿石特征

松湖铁矿在地表圈定 4 个主要矿体,但在钻孔深部位于矿区西部的 3 个矿体合为一个,因而平面图上统一编号为 L₁ 矿体。L₁ 矿体与围岩呈整合接触,赋矿围岩主要为凝灰质砂岩,其次为砂屑灰岩和钙质粉砂岩。矿体形态为似层状、透镜状,近 EW-NWW 向展布,延长约 800 m,中-西部较厚,向两端逐渐变薄,产状较陡,总体产状为 180°~212°∠75°~84°。矿体延深可达 710 m,发育膨大收缩、分枝复合、尖灭等现象(图 2、3)。

矿石中矿物组成较为复杂,矿石矿物主要为磁

铁矿,其次为赤铁矿、黄铁矿、黄铜矿;脉石矿物主要为钾长石、绿泥石、阳起石、绿帘石、方解石、石英,其次为钠长石、磷灰石等。矿石构造包括块状、条带状、角砾状、脉状、浸染状及团块状。矿石主要呈半自形-他形粒状结构,少数呈自形粒状、板状,交代、碎裂及重结晶结构发育。

2.4 围岩蚀变

围岩蚀变主要类型为钾长石化、绿泥石化、方解石化、黄铁矿化、黄铜矿化、赤铁矿化、阳起石化、绿帘石化、硅化等。蚀变分布不均匀,具有一定的分带性。在垂向上,方解石化、绿泥石化、硅化及绿帘石化主要发育于浅部,黄铁矿化、黄铜矿化、阳起石化则在深部更为发育,在水平方向上,钾化、阳起石化、绿帘石化与硅化主要发育于矿体上部或顶板附近的围岩中,黄铜矿化、赤铁矿化、绿泥石化则在底板附近更为发育。

2.5 成矿期次划分

通过野外及室内镜下观察,根据矿物共生组合及相互穿插关系,将成矿作用过程划分为热液期和表生期,热液期进一步划分为 5 个阶段:

(1) 钾长石-绿泥石-磁铁矿阶段,主要形成钾长石、绿泥石、磁铁矿,其次为钠长石和黄铁矿。该阶

① 新疆地矿局第七地质大队, 2010. 新疆尼勒克县松湖铁矿深部及外围调查评价总体设计. 内部资料.

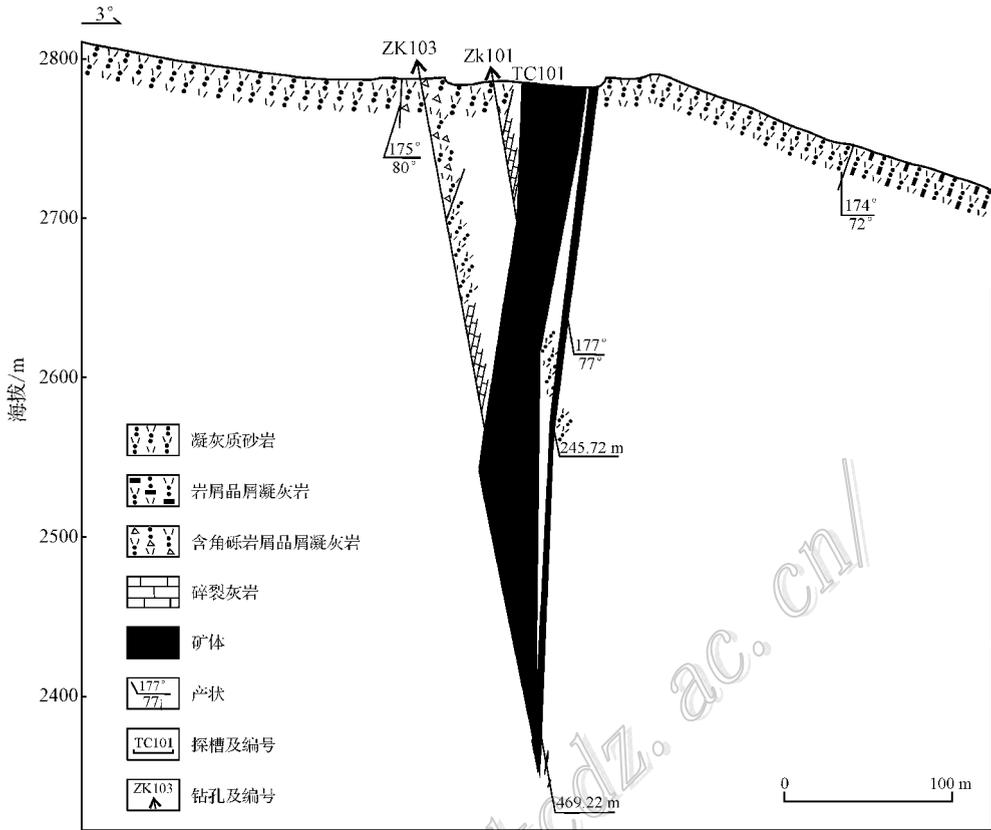


图3 松湖铁矿床 I-I' 勘探线剖面图^①

Fig. 3 Geological section along No. I exploration line of the Songhu iron deposit

段早期形成条带状矿石,以及呈浸染状、不连续脉状发育的黄铁矿,晚期发育少量呈细脉状或浸染状的磁铁矿化。

(2) 阳起石-绿帘石-磁铁矿阶段,形成磁铁矿、赤铁矿等金属矿物,以及绿泥石、绿帘石、阳起石、石英等非金属矿物。该阶段形成角砾状、脉状及浸染状矿石,叠加于早期条带状矿石之上。

(3) 磁铁矿-硫化物阶段,为最主要的成矿阶段,形成块状及团块状磁铁矿石。该阶段形成的金属矿物主要为磁铁矿,后期形成大量黄铁矿与黄铜矿,非金属矿物包括少量石英、绿帘石及绿泥石。

(4) 石英-方解石-硫化物阶段,主要形成方解石、石英、黄铁矿及黄铜矿,该阶段热液活动导致早阶段形成的矿石发生重结晶作用。早期形成脉状黄铁矿及黄铜矿化,与呈团块状或不连续脉状的石英密切共生,该阶段晚期形成浸染状黄铁矿与黄铜矿,发育于顺层产出的方解石脉中。

(5) 方解石-赤铁矿阶段,以赤铁矿的大量发育为特征,其他矿物包括方解石、石英、绿泥石等。赤铁矿呈团块状、浸染状分布于方解石脉中,结晶程度较好,呈自形的板状或片状,集合体呈放射状。

表生期在地表及浅部矿体中形成针铁矿、镜铁矿、黄钾铁矾、孔雀石、斑铜矿和蓝铜矿等次生矿物。

3 样品及分析方法

3.1 样品

本次用于分析的19件岩石样品采自矿区内新鲜无蚀变的围岩,包括5件岩屑晶屑凝灰岩、3件凝灰质砂岩、4件含角砾岩屑晶屑凝灰岩、3件晶屑熔结凝灰岩、2件灰岩-钙质粉砂岩以及2件砂屑灰岩;8件矿石样品采于主矿体 L_1 ,包括2件块状矿石、3件条带状矿石和3件团块状矿石。

岩屑晶屑凝灰岩(图4a):为矿区内最为发育的

① 新疆地矿局第七地质大队, 2010. 新疆尼勒克县松湖铁矿深部及外围调查评价总体设计. 内部资料.

岩性,按成分可分为安山质和英安质 2 类。安山质岩屑晶屑凝灰岩中晶屑主要为斜长石和钾长石(图 4b)岩屑以安山质为主。英安质岩屑晶屑凝灰岩中钾长石晶屑含量增至 20%,石英晶屑含量约为 25%(图 4c)岩屑成分以安山质、英安质为主。

凝灰质砂岩(图 4d):呈紫红色或灰绿色,细砂-粉砂状结构,块状构造,局部发育粒序层理。主要由细碎屑物与凝灰质、泥质胶结物组成,细碎屑物按粒度分为细砂屑(约 60%)和粉砂屑(15%),以呈浑圆状、次圆状或次棱角状的长石为主,含少量安山质、英安质岩屑以及铁质碎屑。

含角砾岩屑晶屑凝灰岩(图 4e):紫红色-灰紫色,晶屑结构,角砾状-块状构造。角砾含量 20%左右,呈暗红色、灰紫色、灰绿色,形态为棱角状、次棱角状、次圆状或不规则状,砾径 2~20 mm,少数可达 40~50 mm。岩屑以安山质为主,晶屑主要由斜长石和石英组成,含量约为 40%。

晶屑熔结凝灰岩(图 4f):紫红色-灰紫色,晶屑结构,块状构造,主要由晶屑、塑性玻屑及火山玻璃组成。晶屑主要为呈自形-半自形粒状的钾长石,含量可达 30%~40%;斜长石晶屑含量约为 15%,粒度 0.5~2 mm,简单双晶发育。塑性玻屑含量为 30%~40%,呈条带状、流动状分布,发育假流纹构造。

灰岩-钙质粉砂岩:两种岩石相间分布构成韵律层。灰岩呈灰白色,粉晶-鲕粒结构,主要由粉晶方解石(50%)、鲕粒(30%~40%)及少量火山碎屑物组成,钙质粉砂岩呈紫红色,粉砂状结构,主要由火山碎屑物(约 60%)与钙质胶结物组成,其中,火山碎屑物主要由粉砂级的岩屑组成,胶结物以泥晶方解石为主。

砂屑灰岩:呈透镜状发育于凝灰质砂岩中,平行层理发育。灰绿色,砂状结构,砂屑主要为棱角及次棱角状长石晶屑及安山质岩屑,胶结物为亮晶方解石。

块状磁铁矿石(图 4g):为最主要的富铁矿石,分布于矿体中部及顶、底板附近。呈铁黑色-钢灰色,块状构造,主要由磁铁矿组成(70%~80%),其次为黄铁矿、赤铁矿、黄铜矿、方解石、石英以及绿泥石。磁铁矿镜下呈深灰色或淡棕色,形态为半自形-他形粒状,碎裂及重结晶结构发育,粒径一般为 0.05~0.1 mm(图 4h)。

条带状铁矿石(图 4i):主要位于矿体中-上部及顶板附近,由呈条带状、相间分布的钾长石、绿泥石和磁铁矿组成。磁铁矿含量 40%左右,呈自形-半自形粒状,发育碎裂及重结晶结构,粒径 0.05~0.15 mm。钾长石与绿泥石呈宽 3~5 cm 的条带状分布,含量分别为 30%与 20%(图 4j)。

团块状铁矿石(图 4k):发育于深部矿体围岩夹层附近,主要由磁铁矿、赤铁矿、黄铜矿、黄铁矿组成。磁铁矿主要呈斑点状、团块状分布于凝灰质围岩中,含量约为 20%~30%,呈深灰色,自形-半自形粒状(图 4l),赤铁矿呈细脉状或浸染状分布,沿边部对磁铁矿进行交代,发育板状自形晶及放射状集合体。黄铜矿主要呈宽约 1~3 cm 的不规则脉状,胶结并沿边部交代早期磁铁矿与黄铁矿。黄铁矿含量较少,主要呈浸染状分布。

3.2 分析方法

对岩石样品进行清洗、粉碎、缩分,将其在玛瑙研钵中研磨至 200 目以下粉末备用。矿石中磁铁矿单矿物挑选由河北省廊坊市科大地质技术服务公司完成。

样品分析工作在北京市矿冶研究总院测试研究所完成,分析仪器为美国热电公司制造的 VG PQ ExCell ICP-MS 质谱仪,分析方法采用标准曲线法,执行标准参照 DZ/T0223-2001,分析误差 $\leq 10\%$ 。火山碎屑岩、灰岩的稀土元素测试结果以及磁铁矿单矿物的稀土及微量元素测试结果列于表 1、表 2,表中的 REE 球粒陨石标准采用 Sun 等(1989)的数据,铈异常和铈异常分别采用 $\delta Eu = 2E_{N}/(Sm_N + Gd_N)$, $\delta Ce = 2Ce_N/(La_N + Pr_N)$ 来计算。

4 分析结果

4.1 围岩和磁铁矿的稀土元素

岩屑晶屑凝灰岩:包括 5 件英安质和安山质岩屑晶屑凝灰岩样品, ΣREE 值变化于 65.48×10^{-6} ~ 165.44×10^{-6} 。稀土元素具有类似的配分模式(图 5a),表现为轻稀土元素相对富集的右倾型, $LREE/HREE = 7.37 \sim 10.22$ (La/Yb)_N 为 7.19~14.43;轻稀土元素分馏程度总体强于重稀土元素[(La/Sm)_N = 3.24~5.34] (Gd/Yb)_N = 1.10~2.29];发育有中到弱的负铈及弱的正铈异常($\delta Eu = 0.58 \sim 1.29$),铈异常较弱($\delta Ce = 0.85 \sim 1.33$)。

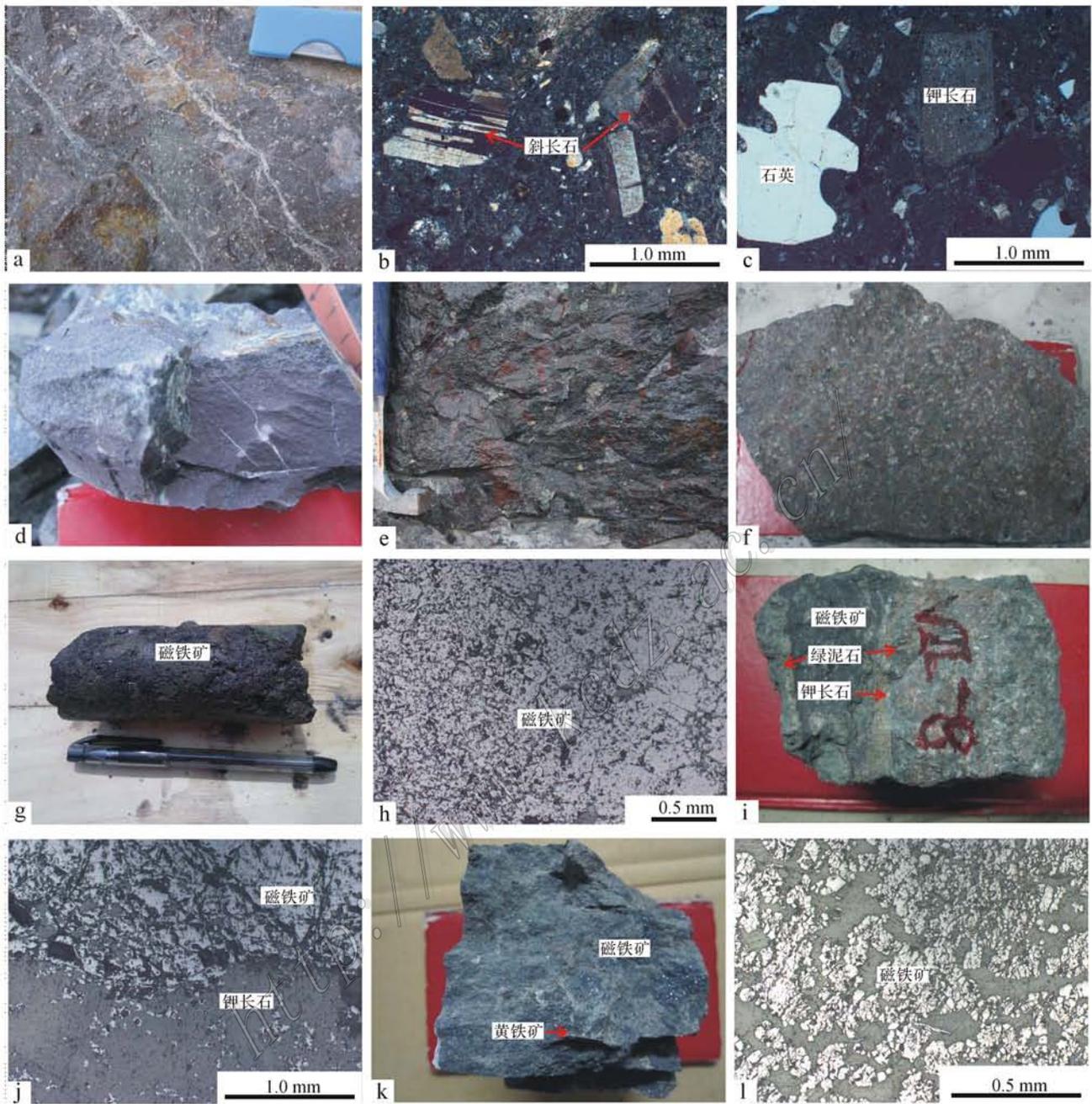


图4 松湖铁矿床矿石及围岩特征

a. 岩屑晶屑凝灰岩; b. 双晶发育的斜长石晶屑; c. 石英及钾长石晶屑; d. 凝灰质砂岩; e. 含角砾岩屑晶屑凝灰岩; f. 晶屑熔结凝灰质; g. 块状矿石; h. 粒度不同的磁铁矿; i. 条带状矿石; j. 磁铁矿与钾长石接触界面; k. 团块状矿石; l. 半自形-他形粒状磁铁矿

Fig. 4 Features of ores and wall rocks from the Songhu iron deposit

a. Debris-crystal fragment tuff; b. Plagioclase crystal fragment with twinned crystal; c. Quartz and potassium feldspar crystal fragment; d. Tuffaceous sandstone; e. Debris-crystal fragment tuff with lapilli; f. Ignimbrite with potassium-feldspar crystal fragment; g. Massive magnetite ore; h. Magnetite of different granulinity; i. Striped ore; j. The contact border between potassium feldspar and magnetite; k. Agglomerated ore; l. Subhedral-anhedral magnetite

凝灰质砂岩: 3件样品的 ΣREE 值变化范围较大($101.59 \times 10^{-6} \sim 224.51 \times 10^{-6}$); $\text{LREE}/\text{HREE} = 6.80 \sim 11.29$, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为7.38~12.70; 轻稀土元素

分馏程度总体强于重稀土元素($(\text{La}/\text{Sm})_N = 3.04 \sim 5.53$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.57 \sim 1.93$); 发育较弱的铈及铈异常($\delta\text{Eu} = 0.84 \sim 1.08$, $\delta\text{Ce} = 0.93 \sim 1.35$)。

表 1 松湖铁矿床围岩的稀土元素组成
Table 1 Rare earth elements of wall rocks from the Songhu iron deposit

样品编号	名称	$w(B)/10^{-6}$														LREE/		(La/		(Gd/				
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Tm	Yb	Lu	Σ LREE	Σ HREE	HREE	Yb _N	Sm _N	Yb _N	Eu	δ Ce				
SH-3-1		23.17	46.64	5.74	23.73	4.91	1.31	4.44	0.74	4.06	0.84	0.46	0.35	2.25	0.37	121.00	105.50	15.51	6.80	7.38	3.04	1.63	0.84	0.96
SH-3-4	凝灰质砂岩	21.95	39.61	4.40	17.65	3.89	1.35	3.61	0.62	3.27	0.71	2.04	0.30	1.90	0.30	101.59	88.85	12.74	6.98	8.29	3.64	1.57	1.08	0.93
SHN-13		44.59	118.20	9.27	27.33	5.21	1.64	5.87	0.84	4.54	0.97	2.71	0.40	2.52	0.42	224.51	206.24	18.27	11.29	12.70	5.53	1.93	0.90	1.35
SHN-12	安山质岩屑	31.05	61.57	7.61	31.47	6.18	2.30	4.28	0.78	3.82	0.78	1.99	0.28	1.54	0.25	153.90	140.18	13.72	10.22	14.43	3.24	2.29	1.29	0.95
SHN-14	晶屑凝灰岩	19.28	36.38	3.83	15.89	3.24	1.09	2.54	0.47	2.40	0.51	1.30	0.18	1.02	0.16	88.29	79.71	8.57	9.30	13.61	3.84	2.07	1.12	0.98
BGKL-1		30.03	83.41	7.37	23.07	4.60	1.65	4.87	0.71	3.85	0.82	2.35	0.31	2.07	0.33	165.44	150.13	15.31	9.80	10.39	4.22	1.94	1.06	1.33
BGKL-4	英安质岩屑	21.32	33.13	3.63	13.44	2.58	0.84	2.57	0.38	2.05	0.45	1.32	0.20	1.21	0.21	83.31	74.93	8.38	8.94	12.65	5.34	1.76	0.98	0.85
SH-3-2	晶屑凝灰岩	15.03	25.63	3.02	11.44	2.15	0.40	1.99	0.30	1.75	0.41	1.38	0.22	1.50	0.28	65.48	57.66	7.82	7.37	7.19	4.52	1.10	0.58	0.88
SH-1-1		23.11	39.70	4.99	19.67	4.03	2.22	4.23	0.68	3.19	0.71	2.01	0.32	1.87	0.35	107.06	93.72	13.35	7.02	8.86	3.70	1.87	1.63	0.86
SH-5-7	含角砾岩屑	21.27	37.65	4.92	20.74	4.65	1.69	4.40	0.74	4.22	0.87	2.34	0.32	1.88	0.27	105.96	90.92	15.04	6.04	8.11	2.96	1.93	1.13	0.87
BGKL-11	晶屑凝灰岩	22.10	63.08	4.29	13.14	2.59	0.94	2.97	0.41	2.22	0.49	1.39	0.21	1.38	0.22	115.44	106.13	9.30	11.41	11.46	5.52	1.78	1.03	1.49
SHN-15		35.52	58.78	6.65	26.22	5.08	1.43	3.80	0.67	3.43	0.70	1.84	0.25	1.46	0.23	146.05	133.68	12.38	10.80	17.47	4.51	2.16	0.95	0.87
IV-6		8.57	17.62	2.39	9.78	2.25	1.08	2.38	0.39	2.25	0.45	1.27	0.17	1.10	0.15	49.83	41.69	8.14	5.12	5.61	2.46	1.79	1.42	0.94
SHN-4	晶屑熔结凝灰质	8.60	14.42	1.71	7.28	1.53	0.72	1.20	0.24	1.47	0.35	1.06	0.16	1.00	0.18	39.92	34.26	5.66	6.05	6.18	3.63	1.00	1.57	0.87
SHNS-6		5.52	11.34	1.44	6.58	1.79	0.84	1.78	0.38	2.26	0.53	2.08	0.25	1.58	0.27	36.64	27.51	9.14	3.01	2.50	1.99	0.93	1.42	0.96
SH-2-1	灰岩-钙质	23.51	47.41	5.54	24.16	5.08	1.49	4.60	0.78	4.19	0.89	2.70	0.34	2.05	0.33	123.07	107.19	15.88	6.75	8.21	2.99	1.85	0.92	0.98
SH-2-6	粉砂岩	15.13	23.75	3.09	12.76	2.70	0.82	2.41	0.41	2.33	0.50	1.51	0.20	1.26	0.20	67.08	58.25	8.83	6.60	8.59	3.61	1.58	0.96	0.81
SH-4-2	砂屑灰岩	15.08	24.00	2.97	12.57	2.71	0.64	2.55	0.40	2.21	0.48	1.38	0.19	1.23	0.19	66.61	57.98	8.63	6.72	8.83	3.59	1.72	0.73	0.83
SH-4-3		26.61	42.99	5.24	21.24	4.41	1.27	3.91	0.64	3.34	0.70	1.92	0.27	1.66	0.24	114.45	101.76	12.69	8.02	11.48	3.90	1.95	0.91	0.84

表2 松湖铁矿床矿石中磁铁矿的稀土及微量元素组成
Table 2 Rare earth and trace elements composition of magnetite from the Songhu iron deposit

组分	$\mu(B) \times 10^{-6}$							
	磁铁矿块状矿石		磁铁矿条带状矿石			磁铁矿团块状矿石		
	SH '3-1	I-7	SH '6-1	SH '7-1	I-10	I-13	VII-6	PD2700
Sc	1.47	14.67	0.64	0.80	13.60	15.66	21.65	19.19
Ti	—	81.72	—	—	83.00	142.08	2190.00	950.00
Co	18.79	43.74	11.27	48.75	172.10	160.00	12.39	64.99
Ni	22.44	19.57	6.02	8.37	12.29	17.54	5.15	9.24
Cu	256.19	—	221.90	294.60	236.00	426.78	53.17	—
Zn	59.85	—	104.60	197.50	49.17	189.84	165.50	501.10
Ga	25.63	25.59	6.01	9.78	34.39	41.80	22.84	12.70
Ge	0.97	2.10	2.61	2.57	1.96	2.37	2.23	2.30
Rb	4.51	11.58	1.42	2.46	4.25	8.19	11.81	2.35
Sr	30.18	22.86	21.90	46.85	19.63	54.70	32.09	22.38
Y	2.88	5.44	7.51	11.06	7.52	9.43	5.28	4.09
Pb	173.99	67.96	69.92	143.70	26.41	121.31	27.66	32.64
Bi	1.68	0.87	0.78	0.91	0.12	0.1	0.19	1.17
La	6.39	19.88	20.98	15.53	25.82	15.19	28.76	7.86
Ce	7.88	18.04	17.59	12.41	24.72	13.20	15.25	8.77
Pr	0.83	1.38	1.45	1.15	1.96	1.15	9.07	0.74
Nd	3.09	4.19	5.38	5.03	6.20	3.93	5.72	2.60
Sm	0.56	0.65	0.99	1.16	0.98	0.61	0.76	0.51
Eu	0.18	0.20	0.22	0.27	0.23	0.16	0.14	0.31
Gd	0.46	0.95	1.13	1.30	1.31	0.99	2.99	0.69
Tb	0.08	0.14	0.18	0.24	0.16	0.16	0.18	0.10
Dy	0.41	0.83	0.94	1.40	0.94	1.00	0.96	0.61
Ho	0.11	0.18	0.26	0.39	0.21	0.26	0.20	0.18
Er	0.30	0.62	0.74	1.05	0.68	0.80	0.62	0.31
Tm	0.05	0.10	0.13	0.18	0.11	0.11	0.09	0.07
Yb	0.33	0.75	0.61	0.83	0.81	0.78	0.59	0.42
Lu	0.08	0.15	0.11	0.14	0.17	0.15	0.10	0.08
Σ REE	20.75	48.05	50.69	41.06	64.29	38.47	65.41	23.25
Σ LREE	18.92	44.34	46.62	35.54	59.92	34.23	59.69	20.79
Σ HREE	1.82	3.72	4.08	5.53	4.38	4.24	5.72	2.46
LREE/HREE*	10.37	11.93	11.44	6.43	13.69	8.07	10.44	8.44
$(La/Yb)_N^*$	13.75	19.11	24.87	13.41	22.89	14.04	35.20	13.36
$(La/Sm)_N^*$	7.42	19.76	13.63	8.66	17.04	16.16	24.59	9.91
$(Gd/Yb)_N^*$	1.13	1.05	1.54	1.29	1.34	1.05	4.23	1.35
δEu^*	1.09	0.80	0.64	0.66	0.63	0.63	0.25	1.60
δCe^*	0.72	0.60	0.55	0.52	0.62	0.57	0.23	0.70

* 单位为 1。

含角砾岩屑晶屑凝灰岩:4件样品的 Σ REE值变化于 $105.96 \times 10^{-6} \sim 146.05 \times 10^{-6}$,LREE/HREE=6.04~11.41($La/Yb)_N=8.11 \sim 17.47$ 。轻稀土元素分馏程度总体强于重稀土元素[($La/Sm)_N=2.96 \sim 5.52$ ($Gd/Yb)_N=1.78 \sim 2.16$];钕异常与钷异常总体较弱($\delta Eu=0.95 \sim 1.63$, $\delta Ce=0.86 \sim 1.49$)。

晶屑熔结凝灰岩:3件样品的 Σ REE值变化于 $36.64 \times 10^{-6} \sim 49.83 \times 10^{-6}$,LREE/HREE=3.01~6.05($La/Yb)_N=2.50 \sim 6.18$ 。轻稀土元素分馏程度

总体强于重稀土元素[($La/Sm)_N=1.99 \sim 3.63$ ($Gd/Yb)_N=0.93 \sim 1.79$];发育弱的正钕异常与负钷异常($\delta Eu=1.42 \sim 1.57$, $\delta Ce=0.87 \sim 0.96$)。

灰岩-钙质粉砂岩与砂屑灰岩:4件样品的 Σ REE值变化于 $67.08 \times 10^{-6} \sim 123.07 \times 10^{-6}$,LREE/HREE=6.60~8.02($La/Yb)_N=8.21 \sim 11.48$ 。轻稀土元素分馏程度总体强于重稀土元素[($La/Sm)_N=2.99 \sim 3.90$ ($Gd/Yb)_N=1.58 \sim 1.95$];发育弱的负钕异常与负钷异常($\delta Eu=0.73 \sim 0.96$, $\delta Ce=0.81 \sim 0.98$)。

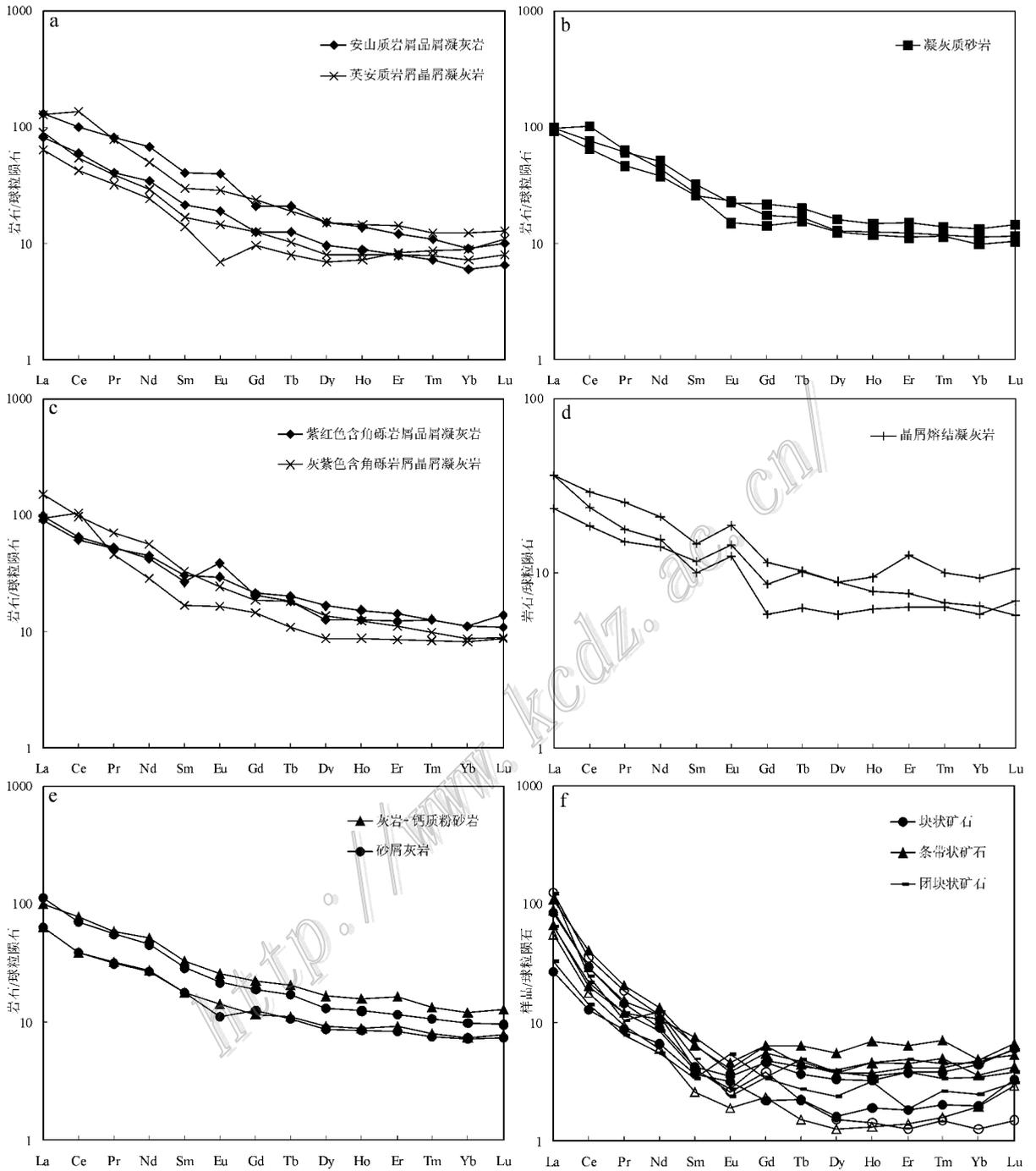


图 5 松湖铁矿床围岩(a~e)及磁铁矿(f)稀土元素配分模式图

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of wall rocks (a~e) and magnetite (f) from the Songhu iron deposit

磁铁矿：8 件样品的 Σ REE 值变化于 $20.75 \times 10^{-6} \sim 65.41 \times 10^{-6}$ ，平均 44.00×10^{-6} ；LREE/HREE 介于 6.43~13.69，平均值 10.10，表明轻稀土元素较为富集 (La/Yb)_N 变化于 13.36~35.20，平均 19.58，显示轻、重稀土元素具一定程度的分馏；

(La/Sm)_N 介于 7.42~24.59，平均 14.65 (Gd/Yb)_N 变化于 1.05~4.23，平均 1.35，表明轻稀土元素分馏程度强于重稀土； δEu 值的范围为 0.25~1.60，平均 0.79，除 2 件样品表现为弱的正铕异常外，其余样品均为中到弱的负铕异常； δCe 值为 0.23

~0.72, 平均 0.56, 总体表现为中到弱的负铈异常。

4.2 磁铁矿微量元素

8件磁铁矿中, $w(\text{Sc})$ 为 $0.64 \times 10^{-6} \sim 21.65 \times 10^{-6}$, 平均 10.96×10^{-6} ; $w(\text{Ti})$ 变化范围较大, 为 $81.72 \times 10^{-6} \sim 2190.00 \times 10^{-6}$; $w(\text{Ni})$ 为 $5.15 \times 10^{-6} \sim 22.44 \times 10^{-6}$, 平均 12.58×10^{-6} ; $w(\text{Co})$ 为 $11.27 \times 10^{-6} \sim 172.10 \times 10^{-6}$, 平均 66.50×10^{-6} , 团块状及条带状矿石相对富钴; $w(\text{Ga})$ 为 $6.01 \times 10^{-6} \sim 41.80 \times 10^{-6}$, 平均 22.34×10^{-6} ; $w(\text{Ge})$ 为 $0.97 \times 10^{-6} \sim 2.61 \times 10^{-6}$, 平均 2.14×10^{-6} ; $w(\text{Cu})$ 变化范围较大, 为 $53.17 \times 10^{-6} \sim 426.78 \times 10^{-6}$, 平均值为 248.11×10^{-6} ; $w(\text{Zn})$ 为 $49.17 \times 10^{-6} \sim 501.10 \times 10^{-6}$, 平均 181.80×10^{-6} ; $w(\text{Pb})$ 为 $26.41 \times 10^{-6} \sim 173.99 \times 10^{-6}$, 平均 82.95×10^{-6} 。

5 讨论

5.1 围岩稀土元素特征

围岩中火山碎屑岩与碳酸盐岩的 ΣREE 值接近, 配分模式类似(图5), 均为轻稀土元素相对富集的右倾型, 轻稀土元素的分馏程度略高于重稀土元素。两类围岩主要显示弱的负铈异常, 铈异常特征略有差异, 火山碎屑岩表现为中到弱的正铈或弱的负铈异常, 碳酸盐岩都为弱的负铈异常。松湖矿区的火山碎屑岩是伊犁北部地区早石炭世岛弧火山岩系列的组成部分, 其稀土元素组成与区域火山岩(姜常义等, 1995; 李注苍等, 2006; 王博等, 2006; 龙灵利等, 2008)具有类似的特征。

5.2 磁铁矿稀土和微量元素特征

松湖铁矿床磁铁矿中 ΣREE 值与其他火山岩型铁矿相比相对较高, 与瑞典基鲁纳铁矿(Rudyard et al., 1995)、新疆磁海铁矿(王玉往等, 2008)以及乔夏哈拉铁矿(应立娟等, 2008)的部分磁铁矿样品值接近。不同类型矿石的稀土元素总量亦有差异, 形成较早的条带状铁矿石中磁铁矿的 ΣREE 值一般高于块状及团块状矿石, 表明成矿作用演化至晚阶段时热液体系中的 REE 含量降低。磁铁矿主要表现为中到弱的负铈异常, 表明成矿流体中有海水的加入(丁振举等, 2003)。除一件团块状矿石之外, 其他矿石中的磁铁矿均表现为中到弱的负铈异常, 表明其形成于相对还原的环境。

磁铁矿的 Co 、 Ni 、 Cu 含量相对较高, 反映成矿物

质来源较深(王玉往等, 2006); Co 、 Ni 、 Ti 的含量变化范围较大, 不同于基鲁纳与 El Laco 铁矿(Nystrom et al., 1994), 表明磁铁矿为非岩浆成因。不同类型磁铁矿的 Ni/Co 比值范围为 $0.07 \sim 1.19$, 均小于 2, 显示出火山热液交代成因的特征(叶庆同, 1982; 王奎仁, 1989)。 Pb 、 Zn 含量相对较高, 表明发育有后期热液叠加作用。 Ge 的含量较低(小于 5×10^{-6}), 排除了海相火山沉积成因的可能性(王文斌等, 1982)。

5.3 成矿物质来源分析

松湖铁矿围岩与矿石中稀土元素配分模式类似, 围岩稀土元素的含量高于磁铁矿(图6), 这一特征与基鲁纳型铁矿相同(Rudyard et al., 1995)。在 $(\text{La}/\text{Yb})_N - (\text{La}/\text{Sm})_N$ 图解(图7)中, 样品表现出一

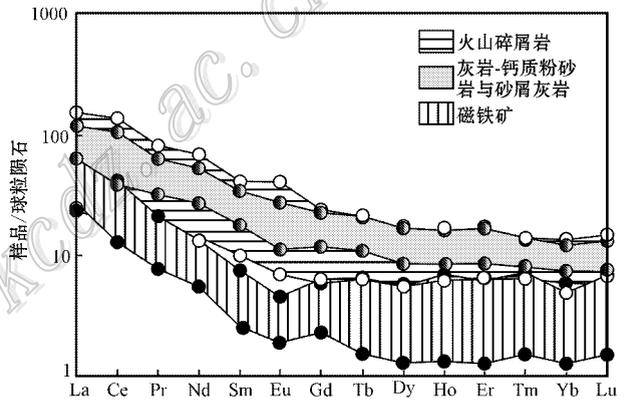


图6 松湖铁矿床磁铁矿、火山碎屑岩及沉积岩稀土元素配分模式对比图

Fig. 6 Comparison of chondrite-normalized REE patterns between magnetite, volcanic clastic and sedimentary rocks from the Songhu iron deposit

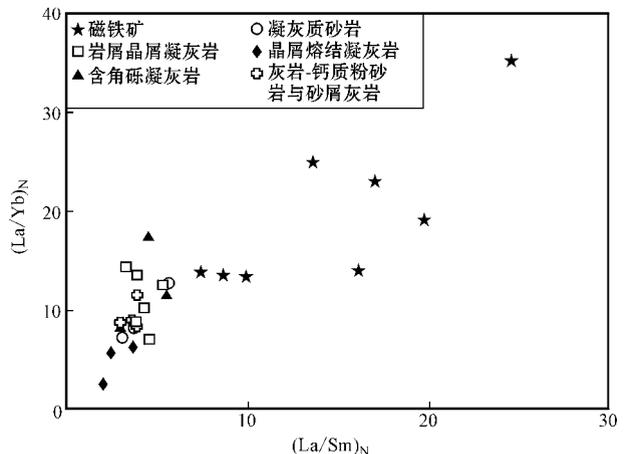


图7 松湖铁矿床磁铁矿与围岩 $(\text{La}/\text{Yb})_N - (\text{La}/\text{Sm})_N$ 图解
Fig. 7 $(\text{La}/\text{Yb})_N - (\text{La}/\text{Sm})_N$ diagram of magnetite and wall rocks from the Songhu iron deposit

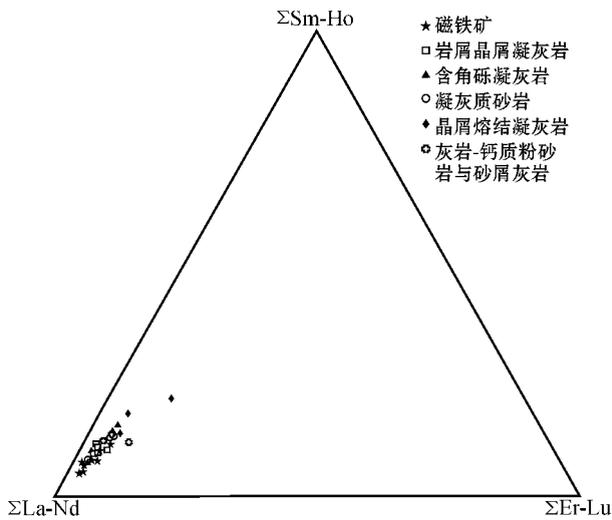


图 8 松湖铁矿床磁铁矿与围岩 $\Sigma\text{La-Nd}$ - $\Sigma\text{Sm-Ho}$ - $\Sigma\text{Er-Lu}$ 图解

Fig. 8 $\Sigma\text{La-Nd}$ - $\Sigma\text{Sm-Ho}$ - $\Sigma\text{Er-Lu}$ diagram of magnetite and wall rocks from the Songhu iron deposit

定程度的正相关性;在 $\Sigma\text{La-Nd}$ - $\Sigma\text{Sm-Ho}$ - $\Sigma\text{Er-Lu}$ 图解(图 8)中,样品基本呈直线分布,表现出明显的线性关系。

以上特征指示了矿石中的磁铁矿与围岩的稀土元素组成具有相似性和成因联系,而火山碎屑岩的成岩物质主要源于岛弧火山作用,暗示成矿作用与岛弧火山作用有关,成矿物质为岩浆源。硫同位素组成特征也反映了相同的信息,23 件硫化物样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值集中于 $-2.9\text{‰} \sim 3.7\text{‰}$,平均值为 -0.6‰ (另文发表),表现为岩浆硫或幔源硫的特征。

6 结论

(1) 松湖铁矿床的火山碎屑岩围岩是伊犁北部地区早石炭世岛弧火山岩的组成部分,其稀土元素组成与矿石中磁铁矿的稀土元素具有相似性和成因联系。

(2) 磁铁矿的稀土和微量元素特征表明其形成于相对还原的环境,成矿物质来源于深部,成矿流体有海水的加入,磁铁矿是火山热液交代作用的产物。

(3) 结合矿床地质特征,认为松湖铁矿床为海相火山热液型矿床。

志 谢 野外工作得到新疆地矿局第七地质大队第四分队工作人员的大力帮助,样品测试工作由

北京市矿冶研究总院测试研究所冯先进研究员完成,在此表示衷心感谢。

参考文献/References

- 丁振举,刘丛强,姚书振,周宗桂,杨明国. 2003. 东沟坝多金属矿床矿质来源的稀土元素地球化学限制[J]. 吉林大学学报(地球科学版),37(4): 437-442.
- 董连慧,冯京,庄道泽,李凤鸣,屈迅,刘德权,唐延龄. 2011. 新疆富铁矿成矿特征及主攻类型成矿模式探讨[J]. 新疆地质,29(4): 416-422.
- 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. 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. 56-108.
- 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.
- 何国琦,成守德,徐新,李锦轶,郝杰. 2004. 中国新疆及邻区大地构造图(1:250 000)说明书[M]. 北京:地质出版社. 1-65.
- 姜常义,吴文奎,张学仁,崔尚森. 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.
- 蒋宗胜,张作衡,王志华,李凤鸣,田敬全. 2012. 新疆西天山智博铁矿蚀变矿物学、矿物化学特征及矿床成因探讨[J]. 矿床地质,31(5): 1051-1066.
- 洪为,张作衡,蒋宗胜,李凤鸣,刘兴忠. 2012. 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对矿床成因的制约[J]. 岩石学报,28(7): 2089-2102.
- 李注苍,李永军,李景宏,栾新东,郭文杰. 2006. 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,24(2): 120-124.
- 龙灵利,高俊,钱青,熊贤明,王京彬,王玉往,高立明. 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.
- 卢宗柳,莫江平. 2006. 新疆阿吾拉勒富铁矿地质特征和矿床成因[J]. 地质与勘探,42(5): 8-11.
- 单强,张兵,罗勇,周昌平,于学元,曾乔松,杨武斌,牛贺才. 2009. 新疆弥勒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.
- 汪邦耀,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): 386-402.
- 王博,舒良树,Cluzel D, Faure M, Charvet J, 马前. 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.
- 王军年, 白新兰, 李岩龙, 陈春明. 2009. 新疆尼勒克县松湖铁矿地质特征[J]. 资源环境与工程, 23(2): 104-107.
- 王奎仁. 1989. 地球与宇宙成因矿物学[M]. 合肥: 安徽教育出版社. 109-129.
- 王文斌, 王润华, 季绍新, 邢文臣. 1982. 从磁铁矿的某些特征看闽西南地区马坑铁矿的成因[J]. 地质论评, 28(3): 118-125.
- 王玉往, 沙建明, 程春. 2006. 新疆磁海铁(钴)矿床磁铁矿成分及其成因意义[J]. 矿床地质, 25(增刊): 321-324.
- 王志华, 张作衡, 蒋宗胜, 洪为, 田敬全. 2012. 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, 31(5): 983-998.
- 熊小林, 赵振华, 白正华, 梅厚钧, 许继峰, 王强. 2001. 西天山阿吾拉勒埃达克岩成因: Nd 和 Sr 同位素组成的限制[J]. 岩石学报, 17(4): 514-522.
- 杨武斌, 牛贺才, 罗勇, 单强, 周昌平, 廖思平, 于学元. 2010. 新疆尼勒克县布谷拉超钾质岩浆岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄和地球化学特征[J]. 岩石学报, 26(10): 3065-3073.
- 叶庆同. 1982. 粤东一些铁矿床中磁铁矿的表型特征及其成因意义[J]. 岩矿测试, 1(1): 44-51.
- 应立娟, 王登红, 李建康, 陈郑辉, 席忠, 杨文华, 刘乃忠. 2008. 新疆乔夏哈拉铁铜金矿床与国内外 IOCG 矿床的对比研究[J]. 大地构造与成矿学, 32(3): 338-345.
- 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.
- 赵振华, 熊小林, 王强, 白正华, 梅厚钧. 2004. 新疆西天山莫斯早特石英钠长斑岩铜矿床——一个与埃达克岩有关的铜矿实例[J]. 岩石学报, 20(2): 249-258.
- 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.
- 朱永峰, 郭璇, 周晶. 2006. 西天山石炭系火山岩的岩石学及 Sr-Nb 同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 22(5): 1341-1350.
- Gao J, Li M S, Xiao X C, Tang Y Q and He G Q. 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China[J]. Tectonophysics, 287: 213-231.
- Jong K D, Wang B, Faure M, Shu L S, Cluzel D, Charvet J, Ruffet G and Chen Y. 2009. New ⁴⁰Ar/³⁹Ar age constraints on the Late Palaeozoic tectonic evolution of the western Tianshan (Xinjiang, northwestern China), with emphasis on Permian fluid ingress[J]. International Journal of Earth Science, 98: 1239-1258.
- Nystrom J O and Hoenriquez F. 1994. Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden: Ore textures and magnetite geochemistry[J]. Econ. Geol., 89: 820-839.
- Rudyard F and Perdahl J A. 1995. Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types[J]. Ore Geology Reviews, 9: 489-510.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications. 42: 313-345.
- Zhang X, Tian J Q, Gao J, Klemd R, Dong L H, Fan J J, Jiang T, Hu C J 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, Xu L G, Li F M, Guo X C and Zhao Z G. 2012. 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.