

王大川, 贾金典, 段士刚, 等. 西天山铁木里克铁矿床矿物学及稳定同位素特征[J]. 中国地质, 2014, 41(6): 1853-1872.  
Wang Dachuan, Jia Jindian, Duan Shigang, et al. Mineralogy and stable isotopic characteristics of the Tiemulike iron deposit in West Tianshan Mountains[J]. Geology in China, 2014, 41(6): 1853-1872(in Chinese with English abstract).

## 西天山铁木里克铁矿床矿物学及稳定同位素特征

王大川<sup>1,2</sup> 贾金典<sup>3</sup> 段士刚<sup>2</sup> 张作衡<sup>2</sup> 蒋宗胜<sup>2</sup> 陈 杰<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院矿产资源所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队, 新疆 哈密 839000)

**摘要:**铁木里克铁矿是西天山阿吾拉勒成矿带上一个高品位的磁铁矿矿床, 赋存于石炭纪大哈拉军山组火山岩中。矿区围岩蚀变较弱, 主要以低温热液阶段的绿泥石化和绿帘石化为主。根据野外矿石组构以及镜下观察, 该矿床可以划分为四个成矿阶段。目前该矿床的研究程度较低, 矿床成因存在较大争议。磁铁矿和赤铁矿的电子探针结果显示, 该矿床的形成与岩浆-热液系统密切相关; 辉石和角闪石的电子探针结果显示, 辉石未发生蚀变, 只有角闪石轻微地发生了阳起石化。矿石中的黄铁矿硫同位素(0.1‰~2.9‰)显示具有深源地幔特征, 磁铁矿的氧同位素(-2.7‰~-0.5‰)暗示岩浆热液对成矿具有重要作用, 以及成矿晚期低温热液过程对早先形成的磁铁矿起到了改造作用。结合区域铁矿带的成矿地质特征, 本文认为铁木里克铁矿的形成主要与岩浆-热液系统密切相关, 在大量磁铁矿形成之后, 有少量成矿流体与海水混合, 对矿床和围岩进行了低温热液蚀变, 形成了充填在磁铁矿矿石气孔中的赤铁矿和黄铁矿。

**关键词:** 西天山; 铁木里克铁矿; 矿物学; 稳定同位素; 矿床成因

**中图分类号:** P618.31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2014)06-1853-20

阿吾拉勒铁铜成矿带位于新疆西天山地区, 是一条东西延伸达 250 km, 南北宽 10~20 km 的复杂的多金属成矿带。近年来, 随着勘查工作的进一步深入, 先后发现了查岗诺尔<sup>[1-3]</sup>、智博<sup>[4-6]</sup>、敦德<sup>[7]</sup>、备战<sup>[8-9]</sup>、式可布台<sup>[10]</sup>、尼新塔格<sup>[11]</sup>等一系列大中型铁矿, 累计铁矿石量超过 15 亿 t, 成为全国十大新资源基地之一(图 1)。这些铁矿床多产于石炭纪火山岩中, 石炭纪广泛分布的中基性火山岩对成矿具有重要作用<sup>[12]</sup>。矿床成因呈现出多样化的特点, 包括火山沉积型、火山热液型、岩浆-热液型以及矽卡岩型等诸多类型<sup>[13]</sup>。因构造运动及成矿作用复杂, 关于阿吾拉勒

成矿带中富铁矿的成因存在着较大的争议。

铁木里克铁矿位于新疆伊犁自治州新源县境内, 目前由新疆伊犁利源实业有限责任公司负责开采, 是一个小型高品位的富铁矿。截止 2013 年, 矿区资源量约为 100 万 t, 平均全铁品位为 30%~70%, 其中 TFe≥50% 的矿石占总量的 80% 以上。目前, 铁木里克铁矿的研究工作十分薄弱, 对其成因也存在着争议。卢宗柳等(2006)<sup>[14]</sup>认为, 矿床主要是由于铁矿浆的分异形成, 属于岩浆型铁矿; 李凤鸣等(2011)<sup>[15]</sup>认为, 铁木里克铁矿主要与火山沉积作用有关, 属于火山沉积型铁矿。深入探讨铁木里克铁

收稿日期: 2014-11-13; 改回日期: 2014-11-21

基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAB06B02)、国家自然科学基金项目(41203035)、国家重点基础研究发展计划(2012CB416803)和中国地质调查局地质矿产调查评价项目(1212011090300)联合资助。

作者简介: 王大川, 男, 1991 年生, 地质工程专业; E-mail: wangdachuan0735@163.com。

通讯作者: 段士刚, 男, 1983 年生, 博士, 研究方向为矿床学与矿床地球化学; E-mail: dsg1102231@163.com。

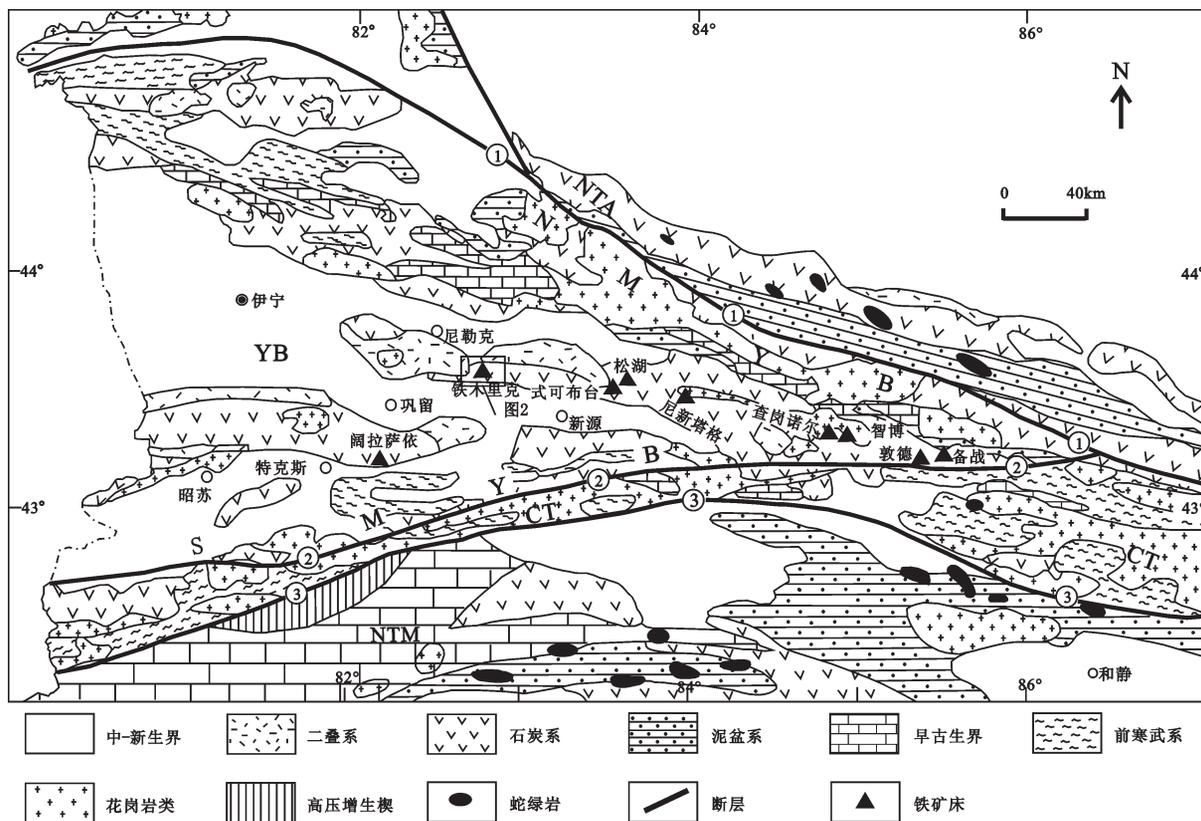


图1 西天山区域地质简图(据文献[15,20])

YB—伊犁地块;NTA—北天山弧增生体;NMYB—伊犁地块北缘活动陆缘;SMYB—伊犁地块南缘活动陆缘;CT—中天山复合弧地体;NTM—塔里木北部陆缘;①—天山北缘断裂带;②—尼古拉耶夫线—那拉提北坡断裂;③—中天山南断裂

Fig.1 Simplified geological map of West Tianshan Mountains (modified after references [15,20])

YB—Yili Block; NTA—North Tianshan Accretionary Wedge; NMYB—Northern Active Continental Margin of Yili Block; SMYB—Southern Active Continental Margin of Yili Block; CT—Central Tianshan Arc Terrane; NTM—Northern margin of Tarim Block; ①—North Tianshan Suture; ②—Nikolaev Line—North Nalati Suture; ③—South Central Tianshan Suture

矿的成因以及成矿模式,对于了解阿吾拉勒铁铜成矿带中富铁矿的成矿模式及成矿机理具有十分重要的指示意义。基于此,本文通过对采自矿区的磁铁矿、赤铁矿等矿石矿物和围岩中发育的辉石、角闪石等脉石矿物开展了详细的矿物学工作,并且结合C、O、S等稳定同位素地球化学特征,对该矿床成因进行初步探讨。

## 1 区域地质背景

铁木里克铁矿位于西天山阿吾拉勒铁铜成矿带中段,邻近的铁矿有式可布台、和统哈拉盖、木汉萨伊以及阿合公该铁矿,矿床的赋矿围岩主要为下石炭统大哈拉军山组。在大地构造位置上,矿区位于哈萨克斯坦板块、伊犁微板块、阿吾拉勒晚古生代弧后盆地

北侧。西天山地区经历了不同时期多形式的造山作用,形成了一条不同性质大陆边缘叠加的复杂的褶皱山系<sup>[16]</sup>。伊犁微板块主要出露太古宙和古元古代变质结晶基底<sup>[17-18]</sup>,从泥盆纪开始,受到南天山洋和北天山洋的持续双向俯冲作用<sup>[19]</sup>,一直到晚石炭世,增生造山运动才停止<sup>[20]</sup>。进入二叠纪以后,西天山地区开始进入后碰撞阶段<sup>[21-22]</sup>。西天山地区发育大量古生代侵入岩和火山岩,侵入岩主要与早石炭世洋盆俯冲以及晚石炭世同碰撞活动有关,火山岩主要与二叠纪裂谷活动有关,并伴随有部分水下塌沉积岩<sup>[23]</sup>。晚石炭世特殊的大地构造环境可能对阿吾拉勒铁铜矿带的形成具有重要的作用,但是具体的成矿机制还需进一步的深入工作。

铁木里克矿床及其附近出露的地层主要是

石炭系、二叠系、侏罗系以及古近—新近系、第四系沉积物。石炭系主要出露在矿区中部和北部,包括下石炭统大哈拉军山组、阿克萨依组,岩性主要为一套中酸性火山岩及碎屑岩夹碎屑沉积岩。二叠系主要出露在区域中偏北部,包含下二叠统乌郎组和中二叠统铁木里克组地层,岩性主要为中酸性火山岩、碎屑沉积岩、局部夹少量碳酸盐。侏罗系主要分布在区域北部,在区域西南角零星出露,为一套碎屑沉积岩,局部夹煤层及菱铁矿结核。区域断裂构造发育,可分为北西向、东西向和北东向3组,以北西向为主。北西向的和统哈拉盖断裂和则克台断裂为区域上规模较大的断裂,控制着区内的地层、岩浆岩及矿产的分布。区域内的侵入岩多呈串珠状、带状展布,出露规模较小,多为石炭纪、二叠纪中酸性岩类。

## 2 矿区地质背景

### 2.1 矿区地质

矿区面积约0.11 km<sup>2</sup>,出露的地层主要是下石炭统大哈拉军山组,以火山岩为主,火山岩主要分为爆发相、喷溢相、侵入相、爆发角砾岩相。主要的岩石类型有花岗斑岩、石英二长斑岩、闪长岩、玄武安山岩以及绿泥石化安山岩。矿体呈脉状产于绿泥石化安山岩之中,沿矿体周围发生绿泥石化、绿帘石化等。铁木里克铁矿矿区构造较发育,主要为向斜及断裂。但因区内黄土覆盖较厚,构造形迹不甚清楚。断裂的总体构造线分为两组,南北向和东西向,构成较明显的菱形网格状构造格架。向斜轴走向近南北,轴面陡倾,向斜北端翘起,向南倾伏。向斜南北长大于300 m,东西宽200~300 m,北窄南宽。矿区由于受到火山活动以及区域构造运动的影响,区域动力变质作用以及低温热液变质作用广泛发育。矿区内广泛发生矿物变形和重结晶现象,出现大量的绿泥石、绢云母以及方解石等低温变质矿物。

### 2.2 矿体地质

铁木里克铁矿矿区共圈定矿体14个,其中,Fe I、Fe II矿体为地表出露矿体,Fe III~Fe IV矿体为钻孔控制深部盲矿体(图2)。矿体形态较复杂,地表多以透镜体或似层状为主,次为脉状或分支复合体,剖面上矿体呈不对称的向斜。各个矿体品位变化

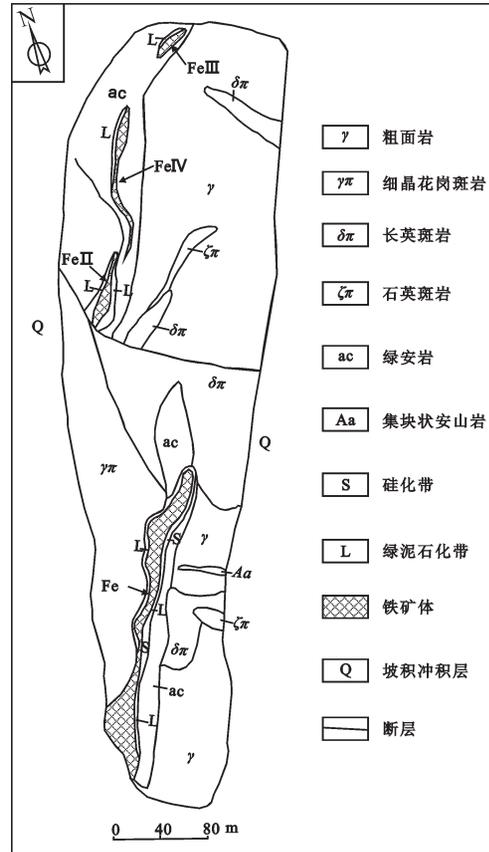


图2 铁木里克矿区平面地质图  
Fig.2 Geological map of the Tiemulike iron deposit

较均匀,矿体TFe平均品位一般在35.98%~50.83%,矿床平均TFe品位44.05%,全区品位变化系数为45.96%。矿区最大的主矿体为Fe I,次为Fe III、Fe IV,其他都为分散的小矿体。Fe I矿体分布在下石炭统大哈拉军山组第一岩性段安山岩与英安岩的外接触带安山岩一侧;矿体出露地表长775 m,北东走向,倾向北西,倾角30°~61°;受后期平推断层影响,被错断为南、北两段;矿体TFe最高品位63.78%,最低品位28.15%,平均品位48.06%,品位变化60.24%,有用组分铁在矿体中分布较均匀;最大厚度21.54 m,最小厚度1.07 m,平均厚度11.83 m,厚度变化系数76.21%,矿体厚度变化中等。Fe III号磁铁矿体分布于向斜的西翼,隐伏矿体的中部,呈透镜状产出,走向控制长度大于200 m;总体倾向北东东,倾角40°~45°。矿体厚度1.53~7.07 m,平均厚度4.26 m,厚度变化系数60.34%,变化程度中等。矿体平均品位TFe为38.95%。总体来看,有

用组分分布较均匀。FeⅣ号磁铁矿体为矿区新发现最大的主矿体,资源量占矿区保有资源量的40.29%,分布于向斜的西翼,隐伏矿体的底部,呈透镜状产出,地表无出露,矿体沿走向连续,长度大于200 m,延伸在地表200 m以下。矿体倾角在35°~50°。矿体顶、底板均为一套石英角斑岩。矿体厚度在0.86~14.92 m,平均厚度6.11 m,矿体中部膨胀,在空间上呈一个大透镜体。矿体品位36.69%,品位变化系数20.91%,有用组分分布较均匀,该矿体磁铁矿含量大于80%。

矿区围岩蚀变现象较为普遍,主要发育绿泥石化、绿帘石化、钠长石化以及硅化。绿泥石化:广泛发育在绿泥石化安山岩中,是形成绿泥石化安山岩的主要原因。绿泥石化反映的热液交代与成矿具有重要关系。绿帘石化:主要发育在矿体上盘的英安岩中,闪长岩中也有少量出现,多呈团块状、网脉状出现。钠长石化:区域内近零星发育,主要产生在凝灰岩中,表现为钠长石交代其他矿物,强烈者,钠长石含量可高达50%(一般为20%),钠长石多呈他形、半自形粒状集合体产出。硅化:主要有3种表现形式,一种是形成石英细脉,网脉;二是呈分散状充填在其他矿物颗粒间;三是交代其他矿物。硅化常与绿泥石化、钠化、黄铁矿化、镜铁矿化、绢云母化等相伴出现,可能是多期硅化蚀变所致。

### 2.3 矿石特征

矿石矿物以磁铁矿为主,次为赤铁矿以及镜铁矿,脉石矿物主要为斜长石、石英、绿泥石以及榍石,硫化物主要为黄铁矿以及少量黄铜矿(图3)。磁铁矿主要以自形-半自形和他形浸染状为主,赤铁矿主要充填在磁铁矿矿石形成的气孔构造中,镜铁矿多呈片状与黄铁矿一起充填在气孔中。黄铁矿主要有2种形式,一种是呈充填结构充填在气孔中,另一种是呈浸染状存在于磁铁矿矿石中;黄铜矿分布较少,主要呈浸染状,部分蚀变为孔雀石和蓝铜矿;斜长石和石英多呈颗粒状分布在磁铁矿矿石中;榍石是磁铁矿矿石中常见的副矿物,颗粒较小;绿泥石是后期热液蚀变的主要矿物,一般分布在矿石表面,常与绿帘石共生。

区内矿石结构以自形板条状为主,主要发育他形-半自形结构、自形-半自形中粗粒状结构、他形-半自形-自形粒状结构、碎裂-角砾化结构。矿

石主要构造有块状构造、气孔状构造、稠密浸染状构造、细脉浸染状构造。块状矿石主要分布在矿体的下部,除磁铁矿外几乎不含其它矿物,显微镜下,偶尔会见钛铁矿的出熔叶片。气孔状矿石主要位于矿体的上部,常见气孔中充填有镜铁矿、黄铁矿以及钾长石、石英等矿物。角砾状矿石主要分布在矿体的上部(图4)。

### 2.4 成矿期次划分

根据野外对矿石组构的实际观察及室内镜下对各种矿物之间生长关系的研究,铁木里克铁矿可以主要划分为4个成矿阶段。

(1)磁铁矿阶段:这个阶段主要以产生大量磁铁矿为主,磁铁矿主要为致密块状,稠密浸染状为主,一般为他形-半自形结构,后期随着温度的降低,形成他形黄铁矿充填在磁铁矿空隙中。矿石与围岩的接触关系较为截然,几乎无蚀变作用发生。

(2)赤铁矿-磁铁矿-高温绿泥石阶段:以发育脉状及网脉状矿石构造为主,可见后期的赤铁矿充填早期岩浆成因的气孔状矿石形成杏仁构造。后期还发育石英和黄铁矿,显微镜下,磁铁矿多呈他形-半自形的充填-交代结构。

(3)石英-硫化物阶段:主要发育石英-黄铁矿-少量黄铜矿组合,呈杏仁构造以及浸染状构造,充填早期形成的磁铁矿以及赤铁矿空隙。

(4)低温绿泥石-绿帘石-碳酸盐阶段:绿泥石普遍存在于铁矿石以及矿体的围岩之中,呈叶片状产出;绿帘石在矿体上盘英安岩中较为发育,可见磁铁矿呈树枝状穿插在绿帘石中,部分绿帘石中还可可见褐帘石包体。方解石穿插在围岩及矿石裂隙之中,可见其中包含的细粒的磁铁矿。

## 3 样品及分析方法

对采自Fe I矿体的29件样品中的辉石、角闪石、绿帘石、绿泥石和磁铁矿以及赤铁矿进行了电子探针分析,这些样品主要采自于早期的磁铁矿成矿阶段。电子探针实验是在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室进行,实验仪器型号是JXA-8230,实验条件是碳酸盐、氧化物的加速电压为5 kV、电流20 nA、束斑直径5 $\mu$ m,标样采用天然矿物或合成金属国家标准,分析精度可以精确到0.01%。

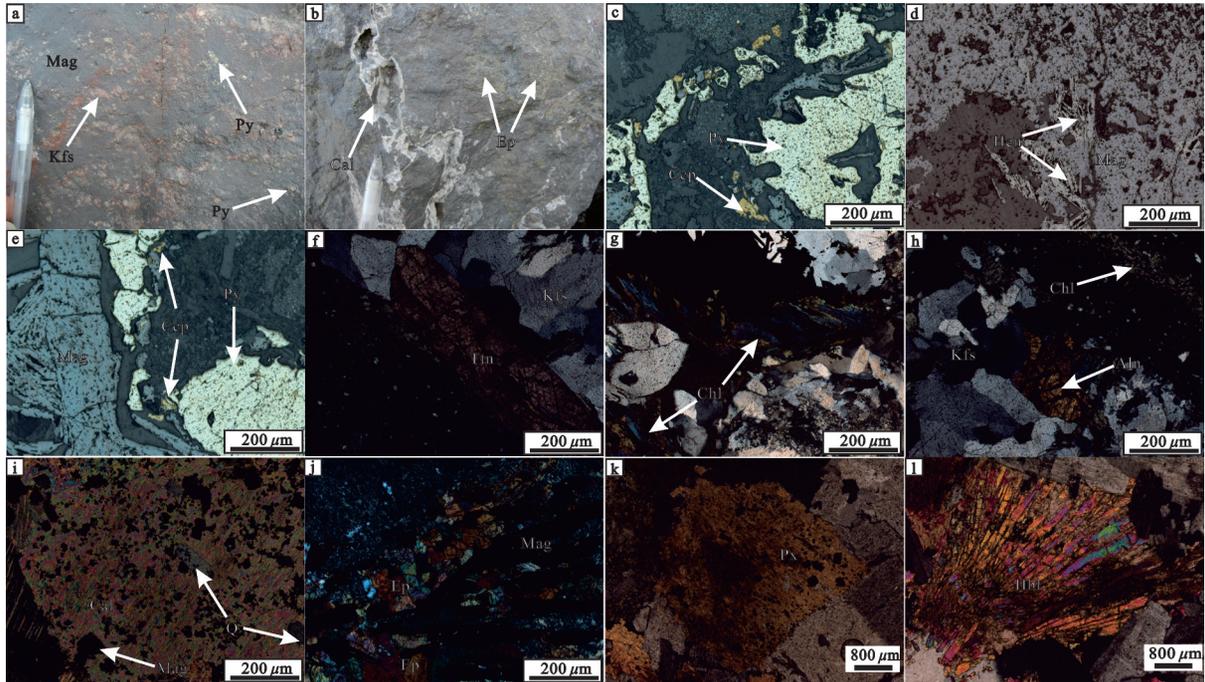


图3 铁木里克矿区的主要矿物组成及其结构特征

a—磁铁矿矿石中的黄铁矿和钾长石,手标本;b—磁铁矿矿石中的方解石脉和绿帘石,手标本;c—磁铁矿矿石中的港湾状黄铁矿和黄铜矿,反射光;d—磁铁矿矿石中充填的后期赤铁矿,反射光;e—磁铁矿矿石中充填的黄铁矿和黄铜矿,反射光;f—安山岩钾华脉中的榍石,正交偏光;g—绿泥石化安山岩中与磁铁矿、钾长石共生的绿泥石,正交偏光;h—蚀变安山岩中共生的钾长石、褐帘石以及绿泥石,正交偏光;i—围岩中的方解石脉及其包含的石英,正交偏光下;j—英安岩中的与板条状磁铁矿共生的绿帘石,正交偏光;k—围岩中的辉石,正交偏光;l—围岩中的角闪石,正交偏光;Mag—磁铁矿;Py—黄铁矿;Kfs—钾长石;Ccp—黄铜矿;Ep—绿帘石;Chl—绿泥石;Aln—褐帘石;Cal—方解石;Q—石英;Ttn—榍石;Px—辉石;Hbl—角闪石

Fig. 3 Composition and structural characteristics of main minerals in the Tiemulike ore district

a—Pyrite and K-feldspar in magnetite ores, hand specimens; b—Calcite veins and epidotes in magnetite ores, hand specimens; c—Harbor-like pyrite and chalcopyrite in magnetite ores, reflective light; d—Late hematite filling early magnetite, reflective light; e—Pyrite and chalcopyrite in magnetite ores, reflective light; f—Potassic veins with titanite in andesite, crossed nicols; g—Chlorite associated with magnetite, K-feldspar in chloritized andesite, crossed nicols; h—K-feldspar, allanite and chlorite in altered andesite, crossed nicols; i—Calcite veins associated with quartz in wall rocks, crossed nicols; j—Epidote associated with lath magnetite in dacite, crossed nicols; k—Pyroxene in wall rocks, crossed nicols; l—Hornblende in wall rocks, crossed nicols; Mag—Magnetite; Py—Pyrite; Kfs—K-feldspar; Ccp—Chalcopyrite; Ep—Epidote; Chl—Chlorite; Aln—Allanite; Cal—Calcite; Q—Quartz; Ttn—Titanite; Px—Pyroxene; Hbl—Hornblende

用于稳定同位素分析测试的样品来自Fe I矿体以及1号、2号采坑,利用双目镜对已经粉碎的样品进行挑选,挑选纯度99%以上的磁铁矿、黄铁矿、方解石等单矿物,然后将其研磨至200目的粉末。

磁铁矿氧同位素分析采用传统的 $\text{BrF}_5$ 分析方法,用 $\text{BrF}_5$ 与含氧矿物在真空和高温条件下反应提取矿物氧,并与灼热电阻石墨棒燃烧转化成 $\text{CO}_2$ 气体,分析测试在国土资源部同位素地质重点实验室利用MAT253EM型质谱计完成,分析精度为 $\pm 2\%$ ,相对标准为V-SMOW。

硫同位素分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。将硫化物单矿物和氧化亚铜

按一定比例(黄铁矿为1:10,黄铜矿为1:8)研磨至粒径小于0.075 mm的粉末,并混合均匀,在真空度达 $2 \times 10^{-2}$  Pa的状态下加热,进行氧化反应,反应温度为 $980^\circ\text{C}$ ,生成 $\text{SO}_2$ 气体。真空条件下,用冷冻法收集 $\text{SO}_2$ 气体,并用MAT251气体同位素质谱分析硫同位素组成。测量结果以CDT为标准,记为 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ ,分析精度优于 $\pm 2\%$ 。硫化物参考标准为GBW04414、GBW04415硫化银标准,其 $\delta^{34}\text{S}$ 分别为 $-0.07\text{‰} \pm 0.13\text{‰}$ 和 $22.15\text{‰} \pm 0.14\text{‰}$ 。

方解石碳氧同位素分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。测试按国标DZ/T0184.17-1997碳酸盐矿物或岩石中碳、氧同位素

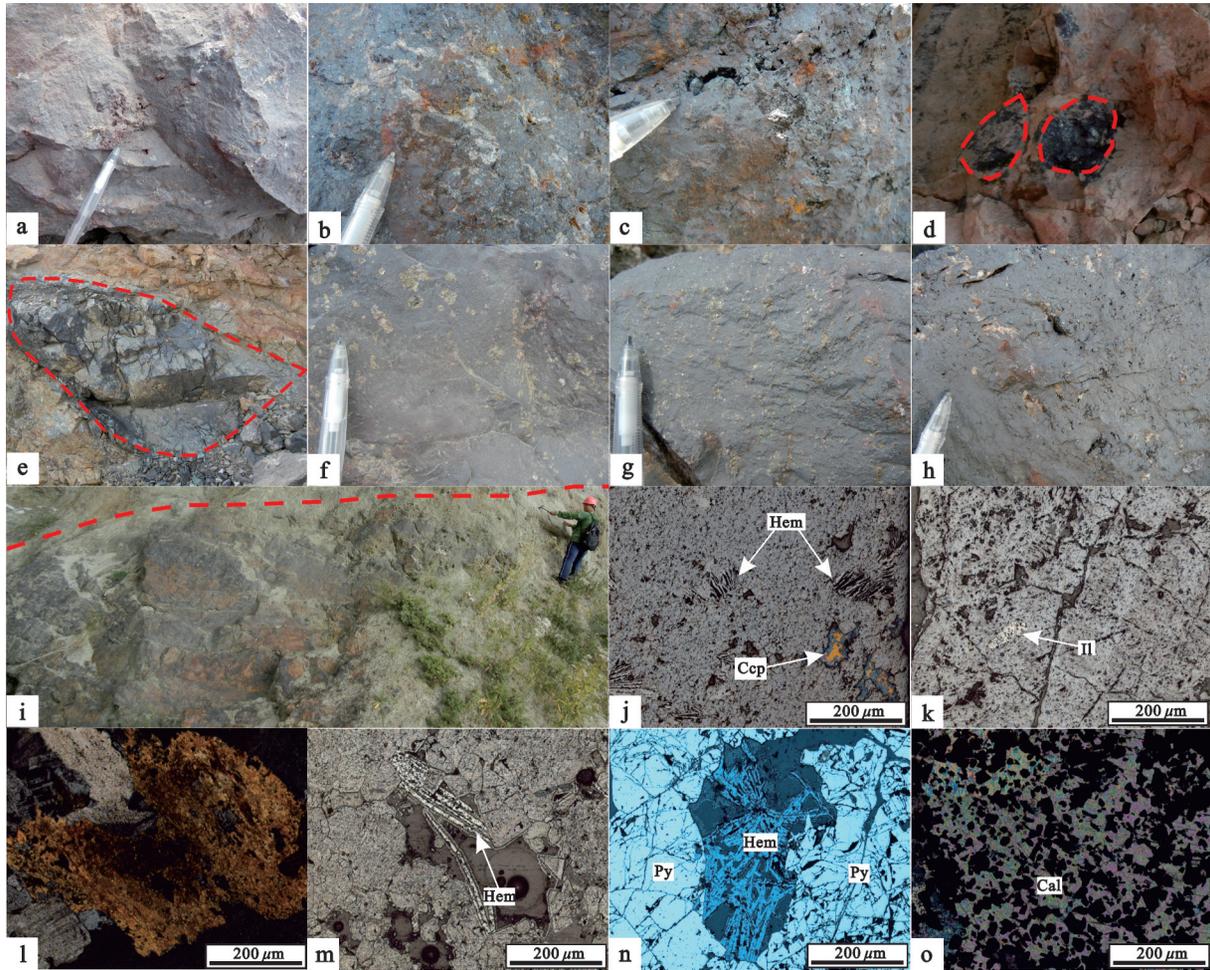


图4 铁木里克铁矿主要的矿石类型及镜下特征

a—块状磁铁矿矿石；b—矿石中的钾长石碎屑；c—流动构造矿石；d—角砾状矿石；e—角砾状矿石；f—矿石中的黄铁矿杏仁构造；g—矿石中的浸染状黄铁矿；h—气孔构造矿石；i—矿体与上盘围岩的接触界线；j—气孔状磁铁矿矿石中充填的赤铁矿和黄铜矿，正交偏光；k—早期矿浆型磁铁矿中出熔的钛铁矿；l—辉石中析出的磁铁矿；m—磁铁矿矿石中充填的赤铁矿；n—矿石中被黄铁矿包裹的赤铁矿；o—后期热液方解石脉中沉淀的磁铁矿；Hem—赤铁矿；Py—黄铁矿；Il—钛铁矿；Ccp—黄铜矿；Cal—方解石

Fig. 4 Main ore types and microscopic features of the Tiemulike iron deposit

a—Massive magnetite ore; b—K-feldspar debris in magnetite ores; c—Flow configuration ore; d—Brecciated ores; e—Brecciated ores; f—Almond structure of pyrite in ores; g—Disseminated pyrite in ores; h—Vesicular ores; i—Boundary between orebody with its wall rocks; j—Chalcopyrite and hematite filling vesicular magnetite ores; k—Ilmenite in magnetite of early slurry type ores; l—Magnetite separated from pyroxene; m—Hematite filling magnetite ores; n—Hematite wrapped by pyrite in magnetite ores; o—Magnetite precipitated from late hydrothermal calcite veins;

Hem—Hematite; Py—Pyrite; Il—Ilmenite; Ccp—Chalcopyrite; Cal—Calcite

组成的磷酸法测定方法执行。在真空条件中，样品与100%的磷酸在25℃恒温条件下反应4 h以上，用冷冻法分离生成的水，收集纯净的CO<sub>2</sub>气体，并在MAT251质谱仪上进行测量。

## 4 分析结果

### 4.1 透明矿物分析结果

铁木里克铁矿矿区辉石、角闪石、绿帘石、绿泥石的分析结果、阳离子数及端元组分见表1~4。辉石

主要是普通辉石，角闪石主要是普通角闪石，少量蚀变为阳起石。辉石以及角闪石中包含有细粒的磁铁矿颗粒，说明形成铁矿的物源可能部分萃取自围岩中含铁元素的矿物。

辉石：主要存在于围岩及稀疏浸染状矿石中，是铁木里克铁矿早期成矿阶段的产物，主要与钠长石和磁铁矿具有成因关系。主要呈自形-半自形柱状、粒状出现，单偏光下无色，正高突起(图3-k)，正交偏光下呈二级蓝绿干涉色，常见有后期绿帘石、

表1 铁木里克铁矿代表性辉石电子探针分析数据(%)

Table 1 Representative electron microprobe analyses of clinopyroxene from the Tiemulike iron deposit

样号	TM34-1	TM34-2	TM34-3	TM34-4	TM34-5	TM34-6	TM34-7	TM33-1	TM33-2	TM33-3
SiO <sub>2</sub>	53.4	53.25	53.93	52.58	53.27	53.63	51.82	55.35	55.51	55.51
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.15	0.45	0.52	0.04	0.08	0.03	0.09	0.08	0.05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.82	0.61	1.44	1.99	1.1	1	1.23	1.05	1.05	1.07
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.09	0	0.04	0	0.04	0	0.02	0	0
FeO	13.74	14.34	7.15	8.1	15.6	15.65	15.55	15.78	15.92	15.72
MnO	0.29	0.25	0.07	0.08	0.21	0.21	0.28	0.34	0.37	0.17
MgO	14.22	14.39	19.88	18.23	13.64	13.4	13.22	14.25	14.03	13.9
CaO	12.23	11.94	11.57	12.18	11.92	11.79	12.22	11.94	11.81	12
Na <sub>2</sub> O	0.26	0.31	0.51	0.46	0.48	0.42	0.31	0.33	0.35	0.33
K <sub>2</sub> O	0.05	0.05	0.11	0.13	0.07	0.06	0.08	0.04	0.05	0.05
NiO	0.01	0.02	0.03	0.02	0	0.04	0	0	0	0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0	0	0.07	0	0	0.01	0	0	0
基于6个氧原子数计算										
Si	2.07	2.07	2.03	2.01	2.06	2.07	2.04	2.07	2.07	2.08
Al <sup>VI</sup>	0.11	0.09	0.09	0.1	0.11	0.11	0.1	0.11	0.12	0.13
Fe <sup>3+</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ti	0	0	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0
Fe <sup>2+</sup>	0.46	0.47	0.23	0.26	0.51	0.51	0.52	0.5	0.51	0.5
Mn	0.01	0.01	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.82	0.83	1.11	1.04	0.79	0.77	0.78	0.79	0.78	0.78
Ca	0.51	0.5	0.47	0.5	0.49	0.49	0.52	0.48	0.47	0.48
Na	0.02	0.02	0.04	0.03	0.04	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02
K	0	0	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0
Total	3.93	3.94	3.95	3.95	3.94	3.93	3.95	3.93	3.93	3.92
端元组分										
Wo	28.32	27.4	25.75	27.67	27.44	27.38	28.32	26.76	26.65	27.25
En	45.81	45.98	61.56	57.65	43.7	43.31	42.62	44.46	44.04	43.93
Fs	25.87	26.62	12.69	14.68	28.86	29.3	29.05	28.77	29.31	28.82

注: FeOT为全铁氧化物。

绿泥石等矿物的叠加改造。电子探针分析表明(表1),铁木里克铁矿中的辉石属于钙质辉石的普通辉石系列(图5),以顽火辉石为主(En=42.62%~61.56%),其次是硅辉石(Wo=25.74%~28.32%),铁辉石含量最低(Fs=12.69%~29.30%),Mn/Fe≤0.02。

角闪石:分布较广,主要分布在蚀变火山岩及磁铁矿体中。大部分呈暗绿色-黄绿色纤维柱状(图3-1),部分呈短柱状,可能由辉石蚀变而成,常

被后期绿帘石、绿泥石交代。根据 Leake 等(1997)<sup>[24]</sup>的计算分类方法,铁木里克铁矿角闪石主要属钙质角闪石系列,少部分蚀变为阳起石(图6),主要为铁镁钙闪石,其主要成分为 Si<sub>T</sub>=5.52~5.67, (Na+K)<sub>A</sub>=0~0.02, Mg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>)=0~0.04, Mg/(Mg+Al)=0~0.001, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为 19.80%~22.34%, TiO<sub>2</sub>含量很低,多小于 0.1%(表2)。

绿帘石:绿帘石主要出现在矿区的后期蚀变阶

表2 铁木里克铁矿角闪石电子探针分析数据(%)

Table 2 Representative electron microprobe analyses of clinopyroxenes from the Tiemulike iron deposit										
样号	TM42-1	TM42-2	TM42-3	TM42-4	TM42-5	TM44-1	TM44-2	TM44-3	TM44-4	TM44-5
SiO <sub>2</sub>	36.15	36.55	36.76	36.1	36.78	55.08	54.96	55.27	54.91	50.09
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.02	0	0	0.03	0.31	0.28	0.3	0.23	0.25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.99	20.73	19.93	19.8	21.9	2.2	2.14	2	2.44	0
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0	0	0	0.06	0	0	0.02	0	0.02
FeO <sup>T</sup>	14.28	15.37	16.36	16.54	13.08	7.41	7.36	6.77	6.91	7.41
MnO <sub>2</sub>	0.18	0.06	0.1	0.06	0.2	0.01	0.11	0.09	0.04	0.08
MgO	0	0.01	0.02	0.01	0	19.61	19.5	19.89	20.32	19.74
CaO	22.43	22.23	22.33	22.42	21.98	12.01	11.59	11.61	12.02	11.72
Na <sub>2</sub> O	0.06	0.01	0.04	0	0	0.79	1.09	0.95	1.03	0.96
K <sub>2</sub> O	0.02	0	0	0	0	0.18	0.21	0.21	0.14	0.13
基于 23 个氧原子数计算										
Si	5.52	5.61	5.63	5.56	5.67	7.74	7.75	7.78	7.67	7.62
Al <sup>IV</sup>	2.48	2.39	2.37	2.44	2.33	0.26	0.25	0.22	0.33	0
Al <sup>VI</sup>	1.48	1.36	1.23	1.16	1.65	0.1	0.11	0.11	0.08	0
Fe <sup>3+</sup>	0.97	1.02	1.13	1.28	0.67	0	0	0	0	0.38
Ti	0	0	0	0	0	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03
Cr	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0
Fe <sup>2+</sup>	0.85	0.95	0.96	0.85	1.02	0.87	0.87	0.8	0.81	0.56
Mn	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	0	0.01	0.01	0	0.01
Mg	0	0	0	0	0	4.11	4.1	4.17	4.23	4.48
Ca	3.67	3.66	3.66	3.7	3.63	1.81	1.75	1.75	1.8	1.91
Na	0.02	0	0.01	0	0	0.22	0.3	0.26	0.28	0.28
K	0	0	0	0	0	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02
Total	15.02	15	15.01	15	15	15.17	15.21	15.17	15.25	15.31
Na+K	0.02	0	0.01	0	0	0.25	0.34	0.3	0.31	0.31
Mg/(Mg+Al)	0	0	0	0	0	0.92	0.92	0.93	0.91	1

注: FeOT为全铁氧化物。

段,在围岩和矿石中均有分布。正交镜下主要显黄绿色或草绿色,单偏光下正高突起(图3-j)。矿体上盘的英安岩中发育明显的绿帘石化,绿帘石中包含有板条状的磁铁矿。晚期绿帘石脉交代早期蚀变矿物组合,此时常伴生有钾长石、石英和方解石等晚期蚀变矿物。电子探针分析(表3)表明,矿区内绿帘石相对富铁,其Fe/(Fe+Al)=0.22~0.36。此外,局部可见褐帘石(图3-h)呈包体的形式赋存于绿帘石中。

绿帘石:绿帘石分布范围较广,围岩与矿体中均有产出,部分与磁铁矿具有密切的共生关系(图

3-g),大部分呈灰绿色-黄绿色鳞片状结构,电子探针分析结果见表4。根据Hey等(1954)<sup>[25]</sup>绿泥石的计算分类图解,铁木里克铁矿区的绿泥石主要为密绿泥石以及蠕绿泥石(图7)。根据Xie等(1997)<sup>[26]</sup>得出的绿泥石温度计: $T(K) = 321.98 \{Al^{IV} + 1.33 [0.31 - Fe/(Fe+Mg)]\} - 61.92 (Fe/(Fe+Mg) < 0.31)$ ;  $T(K) = 321.98 \{Al^{IV} - 1.33 [Fe/(Fe+Mg) - 0.31]\} - 61.92 (Fe/(Fe+Mg) > 0.31)$ ;计算可得与磁铁矿、钾化脉紧密共生的绿泥石温度大都在400℃以上,最高可接近500℃;而与绿帘石紧密共生的绿泥石温度则较低,一般在280℃左右,不超过300℃。

表3 铁木里克铁矿绿帘石电子探针分析数据(%)

Table 3 Representative electron microprobe analyses of epidote from the Tiemulike iron deposit										
样号	TM03-1	TM03-2	TM03-3	TM03-4	TM04-1	TM04-2	TM42-7	TM42-8	TM42-9	TM42-10
SiO <sub>2</sub>	28.49	33.79	33.98	33.12	34.35	34.37	37.88	38.14	37.42	37.71
TiO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.45	17.55	17.94	16.49	18.07	16.68	24.8	24.45	23.26	24.16
FeO <sup>T</sup>	15.55	13.38	12.5	14.14	13	15.24	10.61	11.37	12.57	11.53
MnO	0.05	0	0	0	0	0	0.17	0.29	0.13	0.16
MgO	21.88	0.97	1.2	1.19	0.95	0.55	0.01	0	0	0.03
CaO	0.02	12.2	11.35	11.36	11.77	12.59	22.61	22.48	22.55	22.63
SrO	0	0	0	0	0	0	0.68	0.65	0.09	0.65
Na <sub>2</sub> O	0	0	0	0.55	0	0.03	0.06	0.1	0.1	0.06
K <sub>2</sub> O	0	0.01	0.02	0.18	0.01	0	0.01	0.05	0.05	0.03
Total	85.44	77.89	76.98	77.02	78.16	79.46	97.02	97.61	96.3	97.05
基于 25 个氧原子数计算										
Si	5.48	7.15	7.18	7.18	7.18	7.26	6.38	6.42	6.44	6.4
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Al	4.41	4.38	4.47	4.21	4.45	4.16	4.92	4.85	4.72	4.83
Fe <sup>3+</sup>	1.13	1.06	0.99	1.15	1.02	1.21	0.67	0.72	0.81	0.74
Mn	0.01	0	0	0	0	0	0.02	0.04	0.02	0.02
Mg	6.28	0.31	0.38	0.38	0.3	0.17	0	0	0	0.01
Ca	0	2.77	2.57	2.64	2.64	2.85	4.08	4.05	4.16	4.11
Sr	0	0	0	0	0	0	0.07	0.06	0.01	0.06
Na	0	0	0	0.23	0	0.01	0.02	0.03	0.03	0.02
K	0	0	0.01	0.05	0	0	0	0.01	0.01	0.01
Total	17.31	15.66	15.59	15.85	15.59	15.67	16.17	16.18	16.21	16.2

注: FeOT 为全铁氧化物。

## 4.2 矿石矿物分析结果

26 件磁铁矿、22 件赤铁矿分析结果如表 5 和表 6 所示。磁铁矿的主要成分为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, 赤铁矿的主要成分为 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。

磁铁矿主要呈他形、半自形—自形晶结构, 少量呈树枝状结构, 空隙中常充填有赤铁矿和黄铁矿。磁铁矿全铁 FeO<sup>T</sup> 含量 88.973%~92.504%, 平均值为 90.71% (表 5), 磁铁矿的化学成分整体上以低 SiO<sub>2</sub> (≤0.855%, 平均值为 0.16%)、TiO<sub>2</sub> (≤1.147%, 平均值为 0.098%)、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (≤0.07%, 平均值为 0.025%) 为特征, 明显不同于林师整 (1982)<sup>[27]</sup> 统计的副矿物型磁铁矿的平均值, 而与徐国凤等 (1979)<sup>[28]</sup> 统计的热液交代矿床具有较高的相似性。

赤铁矿主要充填在早期磁铁矿形成的气孔中,

呈板条状结构, 部分被黄铁矿包裹或穿插黄铁矿。赤铁矿全铁 FeO<sup>T</sup> 含量 71.569%~88.713%, 平均值为 85.37%, SiO<sub>2</sub> 含量 0.79%~1.701%, 平均值为 1.50%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 0~1.041%, 平均值为 0.24%, TiO<sub>2</sub> 含量 0~0.37%, 平均值为 0.052%, MnO 含量 0~0.079%, 平均值为 0.024%, MgO 含量 0~1.254%, 平均值为 0.21%, CaO 含量 0~1.414%, 平均值为 0.21% (表 6), 赤铁矿的化学成分表现出 Si、Al、Mg、Ca 含量相对较高, Ti、Cr、Mn、Ni 含量相对较低, 与典型热液型铁矿含量较为接近。

## 4.3 稳定同位素分析结果

### 4.3.1 氧同位素 ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ )

铁木里克铁矿的磁铁矿氧同位素分析结果 (表 7) 显示: 4 件块状磁铁矿矿石的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  变化于 -2.7‰~

表4 铁木里克铁矿绿泥石电子探针分析结果(%)

Table 4 Representative electron microprobe analyses of chlorite from the Tiemulike iron deposit

样号	TM61-1	TM03-5	TM03-6	TM03-7	TM03-8	TM03-9	13TM03-1	13TM03-2	13TM03-3	13TM03-4	TM94-1	TM94-2
SiO <sub>2</sub>	29.42	29.49	31.4	31.58	31.85	31.34	27.71	28.25	29.46	28.2	27.48	27.31
TiO <sub>2</sub>	0.05	0.01	0	0	0.02	0.03	0.03	0	0.01	0.09	0	0.05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.27	18.72	16.82	17.19	17.15	17.18	19.81	20.17	19.52	19.6	19.51	20.64
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	0	0.02	0.02	0	0.02	0.2	0.1	0.13	0.19	0.07	0.05
FeO <sup>T</sup>	17.31	16.45	14.99	14.35	15.06	14.89	15.2	15.45	16.31	16.45	17.97	17.82
MnO	0.13	0.05	0.12	0.12	0.28	0.07	0.04	0.07	0.08	0.09	0.12	0.08
MgO	21.71	22.9	24.91	24.5	24.71	24.66	23.14	22.96	22.14	22.17	21.33	20.5
CaO	0.02	0.05	0.07	0.06	0.05	0.06	0.07	0	0.04	0.05	0.03	0.04
Na <sub>2</sub> O	0.04	0.05	0	0.06	0.06	0.1	0.52	0.24	0.06	0.23	0.09	0.05
K <sub>2</sub> O	0.1	0.01	0.01	0.01	0.04	0.02	0.27	0.11	0.09	0.14	0.06	0.02
F	0.07	0	0	0	0	0	0.07	0	0	0	0	0
Cl	0.01	0.05	0.01	0.02	0.03	0.04	0.01	0.05	0.01	0.02	0.03	0.04
Ni <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.02	0.05	0.02	0.02	0	0	0	0.03	0.02	0.01	0
H <sub>2</sub> O*	11.79	11.98	12.2	12.19	12.32	12.2	11.81	11.95	12.03	11.87	11.7	11.71
Total	99.18	99.86	100.68	100.36	101.8	100.77	98.91	99.37	100.01	99.12	98.51	98.42
Si	5.92	5.88	6.16	6.18	6.17	6.13	5.53	5.64	5.85	5.68	5.61	5.57
Al <sup>IV</sup>	2.08	2.12	1.84	1.82	1.83	1.87	2.47	2.36	2.15	2.32	2.39	2.43
Al <sup>VI</sup>	2.27	2.28	2.05	2.17	2.1	2.11	2.24	2.4	2.43	2.34	2.32	2.55
Ti	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0.01
Cr	0.01	0	0	0	0	0	0.03	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01
Fe <sup>3+</sup>	0.14	0.09	0.12	0.19	0.15	0.13	0	0	0.15	0	0	0.08
Fe <sup>2+</sup>	2.78	2.65	2.34	2.16	2.29	2.31	2.68	2.59	2.55	2.78	3.1	2.96
Mn	0.02	0.01	0.02	0.02	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
Mg	6.51	6.8	7.28	7.15	7.14	7.19	6.88	6.83	6.55	6.66	6.5	6.24
Ni	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zn	0.02	0	0	0.02	0.01	0	0	0	0	0	0.02	0
Ca	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0.01
Na	0.03	0.04	0	0.04	0.05	0.07	0.4	0.19	0.05	0.18	0.07	0.04
K	0.05	0.01	0	0.01	0.02	0.01	0.14	0.06	0.05	0.07	0.03	0.01
Ba	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0.01
Rb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	0.09	0	0	0	0	0	0.09	0	0	0	0	0
Cl	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.03
OH*	15.9	15.97	15.99	15.99	15.98	15.98	15.9	15.97	15.99	15.99	15.98	15.97
Total	35.84	35.89	35.84	35.77	35.83	35.87	36.4	36.1	35.84	36.1	36.09	35.93

注: FeOT为全铁氧化物。

0.5‰,平均值为-0.75‰,基本集中在0两侧对称分布;2件赤铁矿的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 分别为-2.1‰和-0.8‰。

#### 4.3.2 硫同位素( $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ )

块状磁铁矿矿石中5件黄铁矿样品的硫同位素的分析结果(表8)显示:黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值变化于

0.1‰~2.9‰,除了1件样品的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}} < 2\%$ ,其他4件样品的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 均在2‰~3‰,分布较为集中。

#### 4.3.3 碳氧同位素( $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ )

4件石英-碳酸盐阶段的方解石碳氧同位素分析结果(表9)显示:铁木里克铁矿成矿晚期阶段的

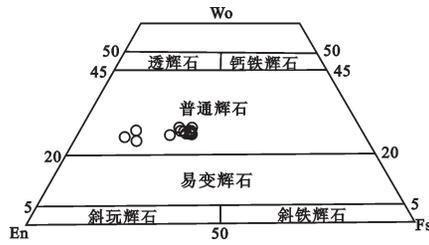


图5 铁木里克辉石分类图解

Fig.5 Classification of pyroxenes from the Tiemulike iron deposit

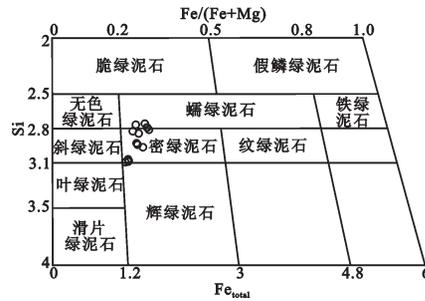


图7 铁木里克铁矿绿泥石分类图解

Fig.7 Classification of chlorites from the Tiemulike iron deposit

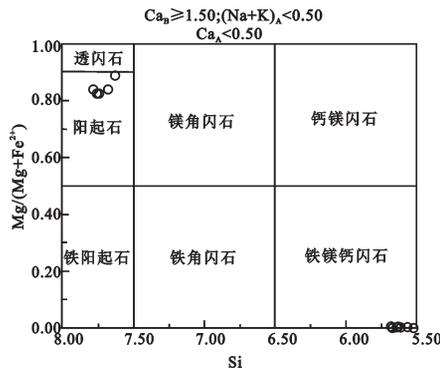


图6 铁木里克铁矿角闪石分类图解

Fig.6 Classification of amphiboles from the Tiemulike iron deposit

方解石  $\delta^{13}C_{V-PDB}$  值变化于  $-0.8\text{‰}$ ~ $3.6\text{‰}$ , 平均值为  $-1.8\text{‰}$ , 极差为  $2.8\text{‰}$ ;  $\delta^{18}O_{V-PDB}$  值为  $-18\text{‰}$ ~ $-20\text{‰}$ , 平均值为  $-19.3\text{‰}$ , 极差为  $1.4\text{‰}$ 。  $\delta^{18}O_{V-SMOW}$  值介于  $10.2\text{‰}$ ~ $12.3\text{‰}$ , 平均值为  $11.0\text{‰}$ , 极差为  $2.1\text{‰}$ , 表明成矿晚期阶段的碳氧同位素变化范围特别窄, 分馏程度很低。

陈光远等<sup>[29]</sup>通过  $TiO_2-Al_2O_3-MgO$  成因图解来判别磁铁矿的成因类型。但对于磁铁矿而言, 磁铁矿中除了 Fe 元素以外, 其他元素都属于微量元素, 所以电子探针分析结果精度有限, 仅可以作为参考。铁木里克铁矿区的磁铁矿主要落在沉积变质-接触交代区, 少部分落在酸性-碱性岩浆区(未列出图表)。Dupuis 和 Beaudoin<sup>[30]</sup>最近的研究表明, 铁氧化物中微量元素,  $(Ca+Al+Mn)-(Ti+V)$  图解能很好地区分铁氧化物-铜-金型、基鲁那型、斑岩型、矽卡岩型、BIF 型和钒钛-铁型的铁矿床。铁木里克磁铁矿和赤铁矿的  $(Ca+Al+Mn)-(Ti+V)$  的值大都落在矽卡岩型和斑岩型, 少部分落在 BIF 型中(图 8)。

## 5 讨论

### 5.1 磁铁矿的成分特征

不同成因类型中的磁铁矿具有不同的成分标型<sup>[28]</sup>, 磁铁矿中的  $TiO_2$ 、 $V_2O_5$ 、 $Al_2O_3$ 、 $Cr_2O_3$ 、 $MgO$ 、 $MnO$ 、 $CaO$  等的含量具有一定的成因意义。铁木里克铁矿床的磁铁矿  $TiO_2$  含量  $0\sim 1.147\%$ , 平均值为  $0.098\%$ , 与林师整等<sup>[27]</sup>统计的接触交代型铁矿含量相当;  $V_2O_5$  含量在  $0\sim 0.139\%$ , 平均值为  $0.031\%$ , 与热液交代铁矿石含量相当;  $MnO$  含量  $0\sim 0.075\%$ , 平均值为  $0.019\%$ ,  $MgO$  含量  $0\sim 0.572\%$ , 平均值为  $0.05\%$ , 与火山沉积-热液叠加型铁矿床含量相当。磁铁矿的化学成分表现出 Si、Cr、Mg、Na、Ti 含量较低, 与岩浆型铁矿床差异较大, Al、Ni、Mn 含量与典型的接触交代及热液型铁矿较为接近。

张志欣(2011)<sup>[31]</sup>认为相对酸性的环境不利于磁铁矿的形成, 相对基性的环境有利于磁铁矿的形成。磁铁矿中的  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $MgO$ 、 $CaO$  含量与全铁(FeO)含量未表现出明显的线性相关关系, 主要呈集中分布状态; 赤铁矿中的  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $MgO$ 、 $CaO$  含量与全铁(FeO)含量表现出明显的负相关关系(图 9)。这种分布形式说明铁木里克铁矿主矿体的形成过程中物理化学条件变化不大, 个别呈负相关分布的磁铁矿可能是由后期热液叠加改造而成, 这一点也与赤铁矿中氧化物的相关关系吻合。铁矿层的围岩下盘主要为安山岩、玄武安山岩等中基性岩石, 有利于磁铁矿的形成, 而上盘围岩主要为英安岩, 为酸性岩, 不利于磁铁矿的形成。物理化学条件的变化可以帮助准确的限定成矿作用的年代, 铁木里克铁矿下盘的安山岩以及玄武安山岩测得

表5 铁木里克铁矿床磁铁矿电子探针分析结果(%)

Table 5 Representative electron microprobe analyses of magnetite from the Tiemulike iron deposit													
样号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>T</sup>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	NiO	Total
TM-15-1-1	0.06	0	0.05	0	90.06	0.01	0	0	0.09	0.01	0.01	0	90.34
TM-92-1-1	0.83	0	0.17	0.05	91.14	0.05	0.1	0.06	0.4	0.07	0.01	0.04	93.03
TM-92-1-2	0.21	0.04	0.06	0.03	92.5	0	0	0	0.25	0.03	0	0.01	93.2
TM-92-2-1	0.21	0	0.03	0.01	93.83	0.1	0.05	0	0	0	0	0	94.25
TM-92-3-2	0.04	0	0	0.04	94	0	0.04	0	0.06	0.01	0	0.02	94.35
TM-02-2-1	0.02	0.06	0.23	0	89.6	0	0	0	0.11	0	0	0	90.12
TM-02-2-2	0.86	0	0.05	0.05	90.53	0	0.26	0.08	0.14	0	0	0	92.05
TM-02-4-1	0.43	0	0.05	0.03	91.59	0	0.04	0	0.09	0.01	0	0	92.25
TM-02-4-2	0.86	0.02	0.07	0	91.52	0.02	0.17	0.07	0.12	0	0.03	0	92.99
TM-02-6-1	0.02	0	0.06	0.05	88.78	0.01	0.03	0	0.08	0	0	0	89.16
TM-16-3-1	0.04	0	0.33	0.07	89.81	0.02	0	0	0.08	0.01	0	0.03	90.48
TM-16-4-1	0	0.38	0.15	0	90	0	0	0	0.04	0.01	0	0.05	90.69
TM-16-6-1	0.04	0.01	0.01	0	89.48	0	0.04	0	0.06	0.01	0.02	0	89.79
TM-23-5-1	0.03	0.04	0.11	0	89.88	0	0	0	0	0.01	0	0	90.16
TM-13-1-1	0.13	0.09	0.12	0.05	90.53	0	0.05	0	0.34	0.01	0	0.01	91.59
TM-13-2-1	0.02	0	0.09	0.05	91.03	0.01	0.01	0	0.12	0.01	0.01	0	91.58
TM-13-3-1	0.04	0.1	0.13	0	91.51	0.02	0.01	0	0.12	0	0	0	92.1
TM-13-4-1	0.05	0.06	0.14	0.03	90.83	0.02	0.06	0	0.01	0.02	0.01	0	91.36
TM-13-5-1	0.04	0.17	0.06	0	91.4	0.01	0.03	0	0.13	0.02	0.02	0	91.94
TM-13-7-1	0.09	0.14	0.01	0	91.56	0.04	0.06	0	0.09	0	0	0	92.11
TM-13-8-1	0.08	1.15	0.02	0.05	91.14	0.05	0	0	0.02	0.02	0.01	0	92.7
TM-13-9-1	0.07	0.21	0.13	0.05	91.8	0.03	0	0	0.15	0.01	0	0	92.5
TM-21-1-1	0	0.08	0	0.05	88.52	0	0.01	0	0.43	0.03	0.02	0	89.22
TM-21-2-1	0	0	0.01	0.04	90.04	0	0	0	0	0	0.01	0	90.13
TM-21-3-1	0.08	0.01	0.43	0	88.09	0.08	0	0	0.16	0.03	0.01	0.02	88.97
TM-21-7-1	0	0.02	0.04	0	89.4	0.03	0	0	0.07	0.02	0	0	89.61

注: FeO<sup>T</sup>为全铁氧化物。

的年龄分别为(320.2±2.2)Ma和(318.2±2.1)Ma,上盘的英安岩测得的年龄为(318.4±3.4)Ma(本文作者未发表数据),由此可以推测矿体与围岩几乎同时形成。另一方面可能是在成矿过程的后期阶段,热液萃取围岩中的角闪石、辉石等含铁较高的矿物中的铁质,在成矿条件发生改变的时候聚集沉淀,从而使磁铁矿的纯度逐渐升高,而Si、Al、Mg、Ca等元素进入绿帘石、绿泥石等矿物之中(图3-k,图4-1)<sup>[32]</sup>。

在磁铁矿的成因矿物学图解中(未列出),铁木里克磁铁矿的电子探针数据绝大部分落入沉积变质-接触交代区域内,少部分落入酸性-碱性岩浆

区。根据矿体上下盘围岩的矿化程度分析,矿体中的部分磁铁矿可能是火山喷发过程中沉积作用形成的产物,并且在后期遭受到了热液的叠加改造。主体大量形成磁铁矿可能是岩浆热液快速冷凝形成的,后期的低温热液作用对磁铁矿的改造起到了重要作用;赤铁矿形成的比磁铁矿稍晚一些,受构造控制较为明显,几乎全部是后期热液沿构造裂隙发生交代作用的产物。

Dupuis等<sup>[30]</sup>通过整理典型铁矿床,对铁氧化物中的微量元素进行研究,指出(Ca+Al+Mn)-(Ti+V)对区分铁氧化物-铜-金型(IOCg)、基鲁纳型、斑岩

表6 铁木里克铁矿区赤铁矿电子探针分析结果(%)

**Table 6 Representative electron microprobe analyses of hematite from the Tiemulike iron deposit**

样号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>T</sup>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	NiO	Total
13TM-15-2-1	4.13	0.03	0.12	0.18	80.6	0	0.02	0	0.27	0.07	0.01	0	85.6
13TM-22-1-1	1.25	0.37	0.14	0.04	87.5	0	0.05	0.01	0.14	0.02	0.03	0	89.6
13TM-22-2-1	0.84	0	0.1	0	87.6	0.03	0.01	0	0.22	0.02	0.02	0	89
13TM-22-3-1	0.82	0.01	0.08	0	88	0	0.03	0	0.25	0.04	0	0	89.3
13TM-22-4-1	0.79	0	0.43	0.03	85.3	0	0.03	0	0.08	0.02	0.07	0.02	86.8
13TM-22-5-1	0.83	0.06	0.05	0.04	87.4	0.08	0.01	0	0.04	0.01	0.01	0	88.6
13TM-79-1-1	0.63	0.03	0.11	0.1	87.8	0.05	0.11	0.12	0.15	0.08	0	0.02	89.4
13TM-79-2-1	3.97	0.1	0.25	0.02	84.8	0.06	0.98	1.22	0.12	0.17	0	0	91.8
13TM-79-3-1	5.32	0.19	0.42	0.02	82.9	0.06	1.25	1.41	0.09	0.23	0.03	0	92
13TM-79-4-1	0.46	0.01	0.11	0.08	87.5	0.04	0.03	0.01	0.67	0.09	0.03	0	89.2
13TM-02-1-1	0.06	0.01	0.07	0.01	88.4	0	0	0	0.1	0	0	0	88.7
13TM-02-1-2	1.7	0.05	0.14	0.01	88.7	0.02	0.43	0.15	0.07	0.02	0	0	91.3
13TM-02-3-1	4.68	0.03	0.13	0.07	84.3	0	0.94	0.63	0.12	0.01	0.03	0	91
13TM-16-1-1	0.3	0	0.06	0.02	88.7	0.02	0	0	0.23	0.04	0	0	89.6
13TM-23-2-2	1.54	0.04	0.71	0.05	85.4	0	0.16	0.26	0.17	0.01	0.02	0	88.6
13TM-23-3-1	1.45	0	0.24	0	78.7	0.03	0	0	0.15	0.01	0.01	0	80.8
13TM-23-3-2	1.04	0.01	0.35	0.01	84.6	0.05	0.12	0.14	0.11	0	0.02	0	86.4
13TM-23-4-1	0.83	0.02	0.09	0.13	84.3	0	0.04	0.01	0.47	0.1	0	0.02	86
13TM-23-5-2	1.33	0.09	0.99	0	85.1	0.02	0.22	0.36	0.08	0.04	0	0	88.2
13TM-23-7-1	1.01	0	0.32	0	80.3	0.03	0.03	0.02	0.13	0	0	0	82.1
13TM-23-7-2	1.37	0	0.14	0.01	82.9	0.02	0.05	0	0.07	0	0	0	84.7
13TM-21-7-2	1.27	0.08	0.15	0.24	82.5	0	0.03	0.02	0.19	0.05	0	0	84.6

注: FeO<sup>T</sup>为全铁氧化物。

表7 铁木里克铁矿磁铁矿氧同位素分析结果  
Table 7 Oxygen isotopic data of magnetite in the Tiemulike deposit

样号	岩性	采样	样品	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$
		位置	名称	
13TM-16	块状矿石	Fe I 矿体	磁铁矿	-2.7
13TM-21	块状矿石	2号采坑	磁铁矿	-1.2
TM-8	含镜铁矿 矿石	Fe I 矿体	磁铁矿	0.5
TM-39	含黄铁矿 矿石	1号采坑	磁铁矿	0.4

表8 铁木里克铁矿黄铁矿硫同位素分析结果  
Table 8 Sulfur isotopic data of pyrite in the Tiemulike deposit

样号	岩性	采样位置	样品 名称	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$
13TM-15	块状矿石	Fe I 矿体	黄铁矿	2.4
13TM-16	块状矿石	Fe I 矿体	黄铁矿	2.9
13TM-19	块状矿石	1号采坑	黄铁矿	2.2
13TM-22	块状矿石	2号采坑	黄铁矿	0.1
13TM-23	块状矿石	2号采坑	黄铁矿	2.3

表9 铁木里克铁矿方解石碳氧同位素分析结果

Table 9 Analytical results of carbon and oxygen isotope compositions in the Tiemulike deposit

样号	岩性	样品名称	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$
TM-77	含方解石脉矿石	方解石	-1.3	-19.6	10.7
TM-83	含方解石脉矿石	方解石	-0.8	-19.6	10.7
TM-86	方解石脉	方解石	-3.6	-18	12.3
TM-87	方解石脉	方解石	-1.4	-20	10.2

型、矽卡岩型、BIF型和钒钛-铁型的铁矿床具有重要作用。而在铁木里克铁矿的(Ca+Al+Mn)-(Ti+V)图解中,大部分样品落入矽卡岩型铁矿的区域,反映了磁铁矿主体形成与热液作用有关,少部分样品落入BIF型和斑岩型铁矿区域内。与斑岩(玢岩)有关的铁矿在我国以宁芜地区的玢岩铁矿为代表,以发育阳起石-磷灰石-磁铁矿为特征,侯通等(2010)<sup>[33]</sup>认为宁芜南段钟姑矿田的成矿作用与深部的岩浆-矿浆-热液成矿系统具有密切关系。根据区域地质资料,铁木里克铁矿位于铁木里克-巴依图马古火山机构附近,受到则可台断裂的控制,磁铁矿的电子探针数据落入斑岩型矿床的区域中,暗示成矿作用可能与矿浆-热液系统有关。

## 5.2 同位素物源分析

### 5.2.1 磁铁矿的氧同位素

不同成因的磁铁矿具有特征的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,因此可以利用 $\delta^{18}\text{O}$ 值反映不同类型的铁矿床。Taylor指出<sup>[34]</sup>,岩浆成因的磁铁矿的 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 值非常的均一, $\delta^{18}\text{O}$ 介于1‰~4‰。超出该范围的磁铁矿矿体,或具有不同的成因,或经历重结晶作用,或遭受了后期的蚀变作用。铁木里克铁矿块状磁铁矿矿石中的磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}$ 介于-2.7‰~0.5‰,比典型的岩浆成因的磁铁矿要低,而与智利火山岩带次火山-火山型矿床较为接近。磁铁矿氧同位素分布特征暗示不同阶段的成矿热液主要来自岩浆流体,后期低温热液叠加对早期形成的磁铁矿起到了改造的作用(图10)。

### 5.2.2 黄铁矿的硫同位素

矿床中的硫化物的硫元素主要有三个来源,分别对应地幔、地壳以及混合硫。另外,成矿过程中物理化学条件的不同,也会造成硫同位素分馏的差

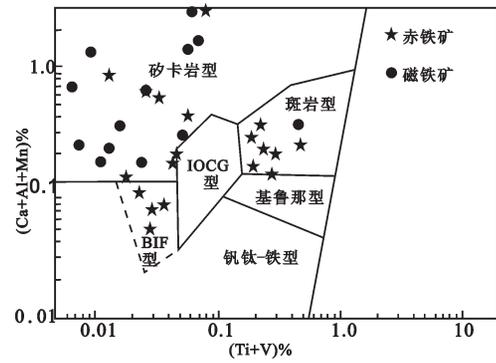


图8 铁木里克矿区磁铁矿(Ca+Al+Mn)-(Ti+V)图解(底图据文献[30])

Fig.8 Plots of Ca+Al+Mn versus Ti+V for EMPA data of magnetite from the Tiemulike iron deposit (modified after reference [30])

异。岩浆矿床(如Cu-Ni矿床)的 $\delta^{34}\text{S}$ 值通常位于0附近,被认为具有幔源起因。岩浆-热液矿床硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于-3‰~1‰。而硫酸盐 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化较大(8‰~15‰)。火山岩型块状硫化物矿床(VMS)的 $\delta^{34}\text{S}$ 值一般大于0。铁木里克铁矿矿石中的硫化物组合简单,主要为黄铁矿,少量为黄铜矿,因此黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 可以代表热液的总硫值。块状矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 的平均值为1.98‰,主要显示岩浆硫的来源来自于深部地幔(图11)。

### 5.2.3 方解石的碳氧同位素

C-O同位素在示踪流体来源以及反演流体演化过程中都具有重要的指示作用。地壳流体中碳的来源有三大主要源区,即岩浆-地幔、海相碳酸盐和沉积有机质。温度、压力以及氧化还原环境的变化,都会使C-O同位素体系呈现趋势性的变化。铁木里克成矿晚期阶段的方解石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 平均值为-1.775‰。将其组成与几个重要的碳同位素储库对比(图12),可以发现该矿床方解石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 变化范围十分窄,与海相碳酸盐的组成比较接近,可能指示后期低温热液中有海洋流体的混入。

## 5.3 矿床成因讨论

关于铁木里克矿床的成因争议目前主要有以下两种:

一种是矿浆喷溢型<sup>[14]</sup>,另一种是火山沉积型<sup>[15]</sup>。通过将铁木里克铁矿与国内典型的不同成因类型的铁矿床进行对比,铁木里克铁矿与宁芜南段钟姑矿田中的姑山式铁矿以及白象山式铁矿具有

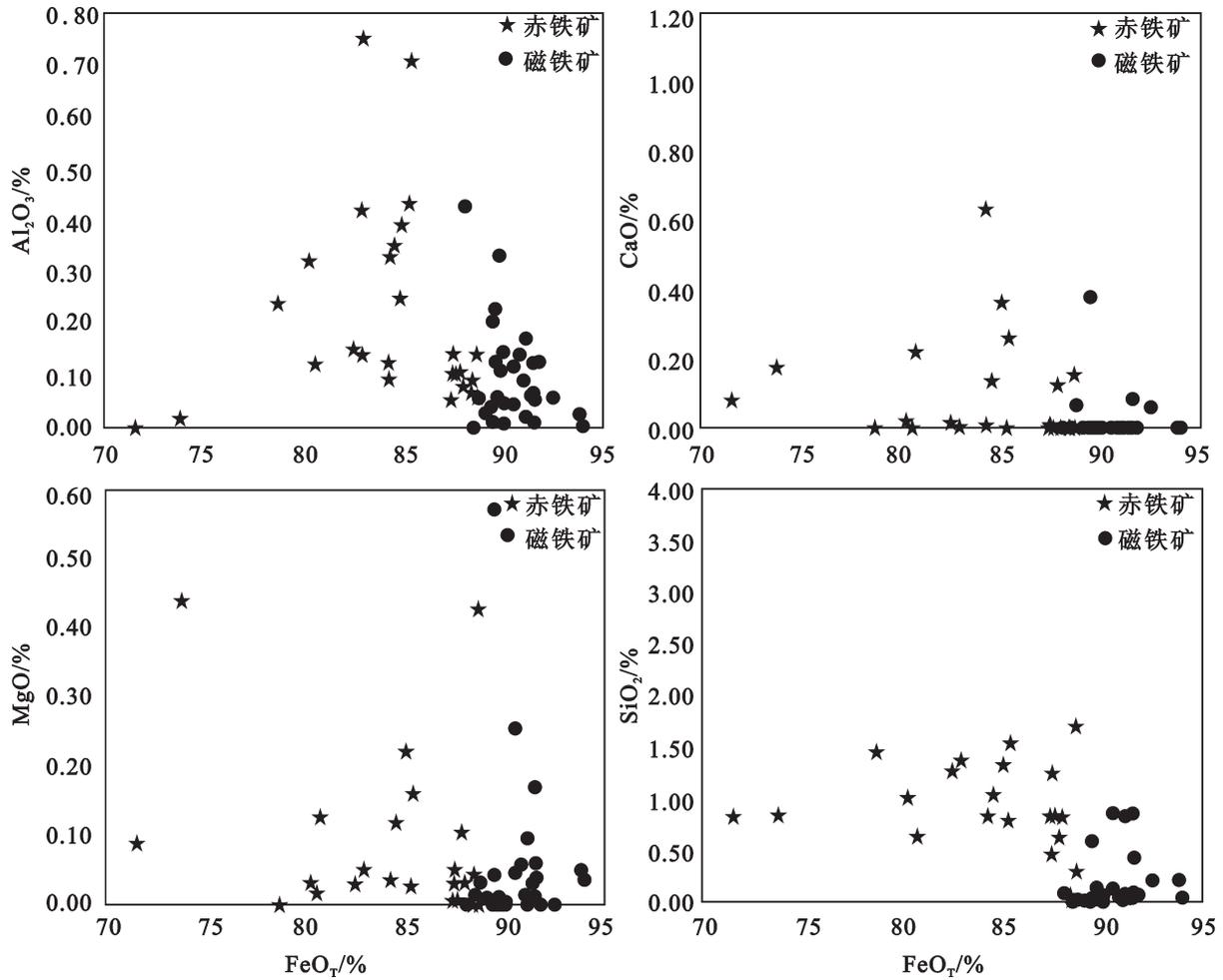


图9 铁木里克铁矿中磁铁矿中的氧化物的相关图解  
Fig.9 Correlogram of oxides in magnetite from the Tiemulike iron deposit

较多的相似点,赋矿围岩都是中基性的岩浆岩以及火山岩,矿体形态呈层状、似层状<sup>[37-40]</sup>。在矿物组合和围岩蚀变方面,铁木里克铁矿发育磷灰石-磁铁矿-榍石组合,多绿帘石、绿泥石蚀变而缺阳起石、透辉石化。

翟裕生等(1982)<sup>[41]</sup>总结了一些岩浆型(或岩浆型)铁矿的特征:矿体与围岩的接触界线较为截然,围岩没有明显蚀变;矿区的控矿因素主要为构造因素,矿体多以充填贯入的形式形成;磁铁矿晶体之上有时又生长有金云母、黄铁矿、方解石等矿物的晶体,这些特点都说明多孔状矿石是原生的,孔洞并非其他矿物被淋滤而形成,只有粘稠的矿浆中含有大量气体时才可形成这类矿石;岩体与矿体中的磷灰石稀土元素配分模式和含量都十分接近;矿体

中常发育角砾状矿石;岩浆型铁矿很少单独形成铁矿床,而是常与接触交代型、热液型铁矿床共同产出。铁木里克铁矿的赋矿围岩为早石炭世的一套火山岩,顶底板围岩为英安岩和安山岩,矿体与围岩的界线较截然,几乎没有任何过渡,并且矿体厚度较大,以层状、似层状为主,矿石成分简单、品位高,比较大的几个矿体品位在50%左右,最高可达65%左右,早期矿石含有少量黄铁矿,局部矿石发育气孔状和杏仁状构造,或伴生有钾长石等高温矿物,钾长石常与角砾状磁铁矿和浸染状磁铁矿伴生,发育在矿体底部和周边。早期磁铁矿以中-细粒他形-半自形结构、块状、浸染状构造为主,围岩主要在成矿后期发育轻微的绿帘石化、绿泥石化等蚀变,矿物组合和蚀变类型相对比较简单,比较符

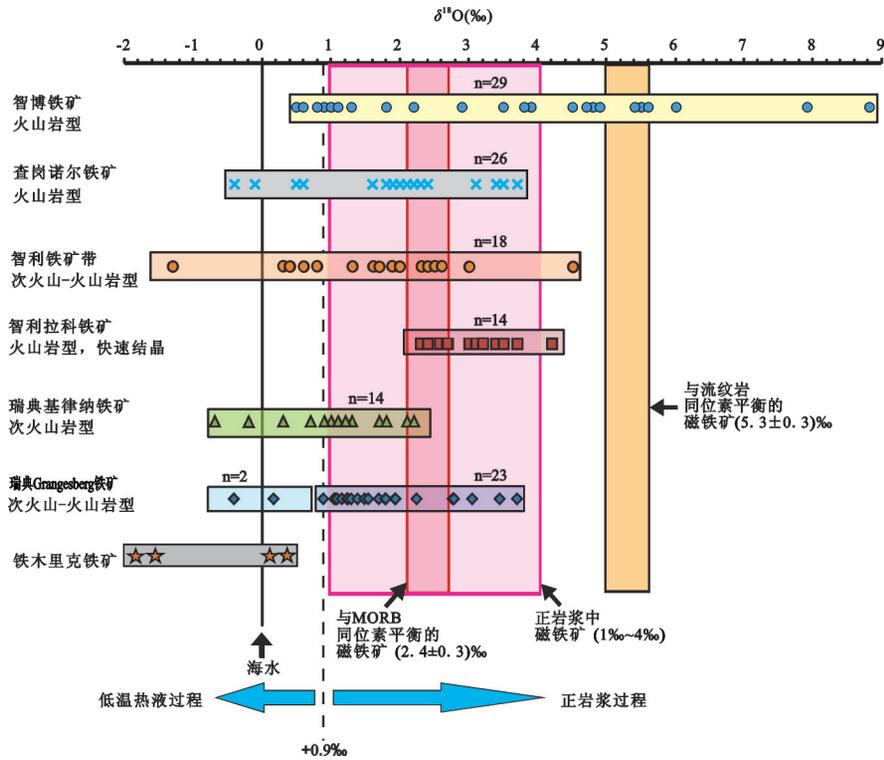


图10 铁木里克铁矿磁铁矿  $\delta^{18}\text{O}$  同位素特征(底图据文献[35]修改)

Fig. 10 Magnetite  $\delta^{18}\text{O}$  values of the Tiemulike deposit compared with data of other volcanics-related iron ore deposits (modified after reference [35])

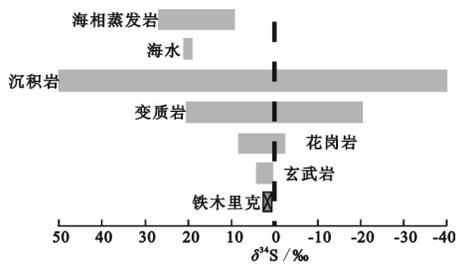


图11 铁木里克铁矿硫化物  $\delta^{34}\text{S}$  同位素特征 (底图据文献[36]修改)

Fig.11 Sulfide  $\delta^{34}\text{S}$  values of the Tiemulike deposit compared with data of other volcanics-related iron ore deposits (modified after reference [36])

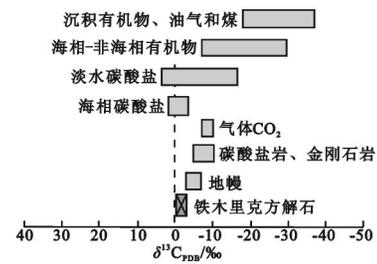


图12 铁木里克铁矿床  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 组成及重要的碳同位素储库(底图据文献[36]修改)

Fig.12  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  compositions of the Tiemulike iron deposit and some important carbon reservoirs (modified after reference [36])

合岩浆-热液成因的特征。

卢宗柳等(2006)<sup>[41]</sup>获得的硫同位素数据及本文获得的磁铁矿中包裹的黄铁矿的硫同位素数据显示为幔源硫,说明硫来自于深部岩浆源。块状磁铁矿矿石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值显示出火山岩型铁矿的特征,并且受到了后期的围岩蚀变等热液活动的改造。成矿晚期阶段的方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值,与海

相碳酸盐的组成比较接近,也暗示后期蚀变热液中有海洋水的参与。

西天山地区在石炭纪时期火山活动频繁<sup>[42-43]</sup>,具有从基性-中性-酸性的多期次性和旋回性特点。阿吾拉勒铁铜成矿带受控于火山机构明显<sup>[44]</sup>,由机构中心向两侧,铁矿化可能形成于不同的火山旋回<sup>[44]</sup>,其成因被认为是与火山-次火山气液交代<sup>[7]</sup>

或部分与铁矿浆<sup>[2,4-6]</sup>有关。铁木里克铁矿床也被认为受控于铁木里克古火山机构,矿区的火山岩主要分为爆发相、喷溢相、侵入相、爆发角砾岩相,属于典型的陆相中心式火山喷发类型<sup>[45]</sup>。结合地质学、矿物学以及稳定同位素地球化学的研究,本文认为早期成矿阶段的铁质可能来源于深部幔源岩浆,成矿方式为深部的岩浆-热液系统分离出的富铁岩浆热液沿构造裂隙成矿。晚期成矿阶段的铁质来自于安山岩及其凝灰岩,而钙质、碳质等组分则来源于海相碳酸盐。综合以上证据,本文认为铁木里克铁矿床可能是与火山活动紧密相关的岩浆-热液型铁矿。

## 6 结 论

(1)根据矿石组构和矿物共生特征,将铁木里克铁矿床划分为磁铁矿阶段、赤铁矿-磁铁矿-高温绿泥石阶段、石英-硫化物阶段、低温绿泥石-绿帘石-碳酸盐阶段4个成矿阶段。

(2)透明矿物的电子探针分析结果显示,蚀变作用主要发生在成矿后期的低温热液蚀变阶段;磁铁矿和赤铁矿的电子探针分析结果显示,铁木里克铁矿磁铁矿矿体的形成与岩浆-热液成矿系统密切相关。

(3)黄铁矿的硫同位素(0.1‰~2.9‰)显示成矿物质主要来自于深部幔源,磁铁矿的氧同位素(-2.7‰~0.5‰)以及方解石的碳氧同位素显示成矿流体主要为岩浆流体,并且在后期阶段有海洋水的加入。

(4)通过与国内其他成因类型的典型铁矿床的对比研究,结合矿床地质特征和磁铁矿成分特征,初步认为铁木里克铁矿床与火山热液活动有密切的成因联系,岩浆-热液系统对成矿做出了重要的贡献。

**致谢:**野外工作期间得到了新疆地矿局第六地质大队领导及铁木里克铁矿项目组成员的大力支持和帮助,电子探针分析实验得到中国地质科学院矿产资源研究所陈振宇老师和陈小丹老师等的指导,稳定同位素实验得到了核工业北京地质研究院刘牧老师以及中国地质科学院矿产资源研究所陶华老师的帮助,审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此一并表示衷心的感谢。

### 参考文献 (References):

[1] 汪邦耀,胡秀军,王江涛,等.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,2011,30(3):5-18.  
Wang Bangyao, Hu Xiujun, Wang Jiangtao, et al. Geological

characteristics and genesis of Chagangnuoer iron deposit in Western Tianshan, Xinjiang [J]. Mineral deposits, 2011, 30(3): 385-402(in Chinese with English abstract).

[2] 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特征、锆石U-Pb年龄及地质意义[J].岩石学报,2012,28(7):74-88.  
Jiang Zongsheng, Zhang Zuoheng, Hou Kejun, et al. Volcanic rocks from the Chagangnuoer and Zhibo iron deposits, western Tianshan, and their geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(7): 74-88(in Chinese with English abstract).

[3] 洪为,张作衡,赵军,等.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,2012,31(2):191-211.  
Hong Wei, Zhang Zuoheng, Zhao Jun, et al. Mineralogy of the Chagangnuoer iron deposit in Western Tianshan Mountains, Xinjiang, and its geological significance [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2012, 31(2): 191-211(in Chinese with English abstract).

[4] 王志华,张作衡,蒋宗胜,等.西天山智博铁矿区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.  
Wang Zhihua, Zhang Zuoheng, Jiang Zongsheng, et al. Magnetite composition of Zhibo iron deposit in Western Tianshan Mountains and its genetic significance [J]. Mineral Deposits, 2012, 31(5): 983-998(in Chinese with English abstract).

[5] 蒋宗胜,张作衡,王志华,等.新疆西天山智博铁矿区蚀变矿物学、矿物化学特征及矿床成因探讨[J].矿床地质,2012,31(5):1051-1066.  
Jiang Zongsheng, Zhang Zuoheng, Wang Zhihua, et al. Alteration mineralogy, mineral chemistry and genesis of Zhibo iron deposit in Western Tianshan Mountains, Xinjiang [J]. Mineral Deposits, 2012, 31(5): 1051-1066(in Chinese with English abstract).

[6] Jiang Zongsheng, Zhang Zuoheng, Wang Zhihua, et al. Geology, geochemistry, and geochronology of the Zhibo iron deposit in the Western Tianshan, NW China [J]. Ore Geology Reviews, 2014, 57: 406-424.

[7] Duan Shigang, Zhang Zuoheng, Jiang Zongsheng, et al. Geology, geochemistry, and geochronology of the Dunde iron-zinc ore deposit in western Tianshan, China [J]. Ore Geology Reviews, 2014, 57: 441-461.

[8] 郭新成,张建收,余元军,等.新疆和静县备战铁矿地质特征及找矿标志[J].新疆地质,2009,27(4):1-5.  
Guo Xincheng, Zhang Jianshou, Yu Yuanjun, et al. Geological characteristics and mining symbols of Beizhan iron deposit in Hejing, Xinjiang [J]. Xinjiang Geology, 2009, 27(4): 1-5(in Chinese with English abstract).

[9] Zhang Zuoheng, Hong Wei, Li Fengming, et al. Geological characteristics of iron ore deposit in the western Tianshan mountain, NW China [J]. Acta Geological Sinica, 2012, 86(3): 737-747.

[10] 刘学良,弓小平,韩琼,等.新疆吐可布台铁矿控矿因素分析[J].西部探矿工程,2013,6:123-125.

- Liu Xueliang, Gong Xiaoping, Han Qiong. Ore- controlling factors of Shikebutai iron deposit in Xinjiang [J]. exploration engineering, 2013, 6: 123-125(in Chinese).
- [11] 李新光, 汪帮耀, 程雅军, 等. 尼勒克尼新塔格铁矿床稀土微量元素地球化学特征及地质意义[J]. 新疆地质, 2014, 32(2): 208-213.  
Li Xinguang, Wang Bangyao, Cheng Yajun, et al. Geological characteristics and geological significance of Rare- Earth microelement in Nixintage iron deposit in Nileke County, Xinjiang [J]. Xinjiang Geology, 2014, 32(2): 208-213(in Chinese with English abstract).
- [12] Zhaochong Zhang, Tonghou, M. Santosh, et al. Spatio-temporal distribution and tectonic settings of the major iron deposits in China: An overview[J]. Ore Geology Reviews, 2014, (57): 247-263.
- [13] 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.  
Zhang Zuoheng, Hong Wei, Jiang Zongsheng, et al. Geological features, mineralization types metallogenic setting of late Paleozoic iron deposit in Western Tianshan Mountains of Xinjiang [J]. Mineral Deposits, 2012, 31(5): 941-964(in Chinese with English abstract).
- [14] 卢宗柳, 莫江平. 新疆阿吾拉勒富铁矿地质特征和矿床成因[J]. 地质与勘探, 2006, 42(5): 8-11.  
Lu Zongliu, Mo Jiangpin. Geological characterists and ore genesis of Awulale iron- rich deposit in Xinjiang [J]. Geology and Prospecting, 2006, 42(5): 8-11(in Chinese with English abstract).
- [15] 李凤鸣, 彭湘萍, 石福品, 等. 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, 2011, 29(1): 55-60.  
Li Fengming, Peng Xiangping, Shi Fupin, et al. Analysis on Fe-Mn mineralization regularity in Carboniferous volcanic sedimentary basin of western Tianshan [J]. Xinjiang Geology, 2011, 29(1): 55-60(in Chinese with English abstract).
- [16] 张良臣, 吴乃元. 天山地质构造及演化史[J]. 新疆地质, 1985, 3(3): 1-14.  
Zhang Liangchen, Wu Naiyuan. The geotectonic and its evolution of Tianshan [J]. Xinjiang Geology, 1985, 3(3): 1-14(in Chinese with English abstract).
- [17] 钱青, 高俊, 熊贤明, 等. 西天山邵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): 307-323.  
Qian Qing, Gao Jun, Xiong Xianming, et al. The geochemical, genesis and tectonic settings of the Carboniferous volcanic rocks in Shaosu, western Tianshan [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(5): 307-323(in Chinese with English abstract).
- [18] 李继磊, 钱青, 高俊, 等. 西天山邵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.  
Li Jilei, Qian Qing, Gao Jun, et al. Geochemistry, zircon U-Pb ages and tectonic settings of the Dahalajunshan volcanics and granitic intrusions from the Adengtao area in the southeast Zhaosu, western Tianshan mountains [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(10): 2913-2924(in Chinese with English abstract).
- [19] Allen M B, Windley B F, Zhang C. Plaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, central Asia [J]. Tectonophysics, 1992, 220:89-115.
- [20] 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.  
Gao Jun, Qian Qing, Long Lingli, et al. Accretionary orogenic process of western Tianshan, China [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(12): 1804-1816(in Chinese with English abstract).
- [21] 朱志新, 董连慧, 王克卓, 等. 西天山造山带构造单元划分与构造演化[J]. 地质通报, 2013, 32(2-3): 297-306.  
Zhu Zhixin, Dong Lianhui, Wang Kezhao, et al. Tectonic division and regional tectonic evolution of west Tianshan orogenic belt [J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(2-3): 297-306(in Chinese with English abstract).
- [22] 朱志新, 李锦铁, 董连慧, 等. 新疆西天山古生代侵入岩的构造特征及地质意义[J]. 地学前缘, 2011, 18(2): 170-179.  
Zhu Zhixin, Li Jinyi, Dong Lianhui, et al. Geological characteristics and tectonic significance of Paleozoic intrusive rocks in Western Tianshan of Xinjiang Province [J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(2): 170-179(in Chinese with English abstract).
- [23] Wang Bo, Shu L S, Cluzel D, et al. 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, 2007, 29(1): 148-159.
- [24] Leake B E, Woolley A R, Arps C, et al. Nomenclature of amphiboles; report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on new minerals and mineral names [J]. Mineralogical Magazine, 1997, 61 (405): 295-322.
- [25] Hey M H. A new review of the chlorite[J]. Mineral Magazine. 1954, 30: 277-292.
- [26] Xie X G, Byerly G R, Ferrel R E. Ilb trioctahedral chlorite from the Barberton greenstone belt: crystal structure and rock composition constraints with implications to geothermometry [J]. Contribution to Mineral Petrology, 1997, 126: 275-291.
- [27] 林师整. 磁铁矿矿物化学、成因及演化的探讨[J]. 矿物学报, 1982, 3: 166-174.  
Lin Shizheng. A contribution to the chemistry, origin and evolution of magnetite [J]. Acta Mineralogica sinica, 1982, 3: 166-174(in Chinese with English abstract).
- [28] 徐国风, 邵洁涟. 磁铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 地质与勘探, 1979, 3: 30-37.  
Xu Guofeng, Shao Jieliang. Typomorphic characteristics of magnetite and its practical significance [J]. Geology and

- Prospecting, 1979, 3:30-37(in Chinese).
- [29] 陈光远. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1987: 1-874.  
Chen Guangyuan. The Genesis and Exploration of Mineralogy [M]. Chongqing: Chongqing Publishing House 1987: 1-874.
- [30] Dupuis C, Beaudoin G. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types [J]. Mineralium Deposita, 2011, 46: 319-335.
- [31] 张志欣, 杨富全, 罗五仓, 等. 新疆阿尔泰乌吐布拉克铁矿床矽卡岩矿物特征及其地质意义[J]. 矿物岩石学杂志, 2011, 30(2): 276-280.  
Zhang Zhixin, Yang Fuquan, Luo Wucang, et al. Skarn mineral characteristics of the Wutubulake iron deposit in Altay, Xinjiang, and their geological significance [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2011, 30(2): 276-280(in Chinese with English abstract).
- [32] 洪为. 新疆西天山查岗诺尔铁矿地质特征与矿床成因[D]. 北京: 中国地质科学院, 2012.  
Hong Wei. Geological characteristics and ore genesis of the Chagangnuoer iron deposit in the western Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Science, 2012(in Chinese with English abstract).
- [33] 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, 17(1): 186-194.  
Hou Tong, Zhang Zhaochong, Du Yangsong. Deep ore magma-hydrothermal system of Zhonggu ore field in southern part of Ningwu Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(1): 186-194 (in Chinese with English abstract).
- [34] Taylor H P. Oxygen isotope studies of hydrothermal mineral deposits[C]/Barnes HL(ed.). Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. New York: John Wiley & Sons 1967: 109-142.
- [35] Jonsson E, Troll V.R, Högdahl K, et al. Magmatic origin of giant 'Kiruna-type' apatite-iron-oxide ores in Central Sweden [J]. Sci Rep, 2013, 3.
- [36] Hoefs J. Stable isotope geochemistry [M]. Berlin: Springer, 2009: 285.
- [37] 顾连兴. 块状硫化物矿床研究进展评论[J]. 地质评论, 1999, 45(3): 265-275.  
Gu Lianxing. Advances in research on massive sulfide deposits: A review [J]. Geological Review, 1999, 45(3): 265-275(in Chinese with English abstract).
- [38] 刘佳林, 毛景文, 段超, 等. 宁芜盆地姑山铁矿床地质特征及其成因研究[J]. 矿物学报, 2011:61-62.  
Liu Jialin, Mao Jingwen, Duan Chao, et al. Geological characteristics and genesis of Gushan iron deposit, Ningwu Basin [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011:61-62(in Chinese with English abstract).
- [39] 李文臣. 攀枝花钒钛磁铁矿床地质及其成因[J]. 地质与勘探, 10: 18-21.  
Li Wenchen. The geology and genesis of Panzhihua vanadium-titanium magnetite ore deposit [J]. Geology and Prospecting, 1992, 10: 18-21(in Chinese).
- [40] 段超, 李延河, 毛景文, 等. 宁芜火山盆地铁矿床侵入岩锆石微量元素特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2012, 12(6): 1874-1884.  
Duan Chao, Li Yanhe, Mao Jingwen, et al. Zircon trace element characteristics of intrusions in the Wushan iron deposit of Ningwu volcanic basin and their geological significance [J]. Geology in China, 2012, 12(6): 1874-1884(in Chinese with English abstract).
- [41] 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, 1982, (3): 239-251.  
Zhai Yusheng, Shi Zhunli, Lin Xinduo, et al. Genesis of "Daye Type" iron ore deposits in eastern Hubei, China[J]. Earth Science, 1982, (3): 239-251(in Chinese with English abstract).
- [42] 张作衡, 王志良, 左国朝, 等. 新疆西天山地质构造演化及铜金多金属矿床成矿环境[M]. 北京: 地质出版社 2008:1-251.  
Zhang Zuoheng, Wang Zhihua, Zuo Guochao, et al. Tectonic Evolution and Copper-gold Polymetallic Metallogenic Environment in Western Tianshan, Xinjiang [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 1-251(in Chinese).
- [43] 冯金星, 石福品, 汪邦耀, 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: 1-132.  
Feng Jinxing, Shi Fupin, Wang Bangyao, et al. The Metallogenic Belt of Volcanic-type Iron Ore Deposit in Awulale Western Tianshan [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010: 1-132 (in Chinese).
- [44] Zhang Zuoheng, Hong Wei, Jiang Zongsheng, et al. 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, 2012, 86(3): 737-747.
- [45] 张喜. 西天山智博和查岗诺尔铁矿成矿背景与成矿作用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013: 1-226.  
Zhang Xi. The metallogenic Tectonic Setting and Metallogenesis of the Zhibo and Chagangnuoer Iron Ore Deposits, Western Tianshan Mountains [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2013: 1-226(in Chinese with English abstract).
- [46] 李厚民, 王登红, 李立兴, 等. 中国铁矿成矿规律及重点矿集区资源潜力分析[J]. 中国地质, 2012, 6(3): 559-580.  
Li Houming, Wang Denghong, Li Lixing, et al. Metallogeny of iron deposits and resource potential of major iron minerogenetic units in China [J]. Geology in China, 2012, 6(3): 559-580(in Chinese with English abstract).

## Mineralogy and stable isotopic characteristics of the Tiemulike iron deposit in West Tianshan Mountains

WANG Da-chuan<sup>1,2</sup>, JIA Jin-dian<sup>3</sup>, DUAN Shi-gang<sup>2</sup>, ZHANG Zuo-heng<sup>2</sup>,  
JIANG Zong-sheng<sup>2</sup>, CHEN Jie<sup>1,2</sup>

(1. School of Earth Science and Resources, China University of Geoscience, 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. No. 6 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Hami 839000, Xinjiang, China)

**Abstract:** The Tiemulike iron deposit is one of the deposits with highest-grade magnetite in the Awulale metallogenic belt and is hosted in volcanic rocks of the Carboniferous Dahalajunshan Formation. Its wall rocks have experienced a little alteration, mainly chloritization and epidotization. According to the ore fabrics and microscopic observation, mineralization of the deposit can be divided into four ore-forming stages. Since very insufficient work has been done in this aspect, the genesis of the deposit fails to reach an agreement. Magnetite and hematite electron microprobe analyses show that the deposit was genetically closely related to the magmatic-hydrothermal system. Pyroxene and amphibole electron microprobe analyses show that alteration of pyroxene is very weak, with only slight actinolitization of hornblende. Sulfur isotope from pyrite (0.1‰~2.9‰) indicates that the metallogenic material might have been derived from deep mantle. Oxygen isotope from magnetite (-2.7‰~-0.5‰) shows that late epithermal ore-forming process played an important role in the reformation of the early magnetite. Combined with the geological characteristics of the metallogenic belt, this paper suggests that the Tiemulike iron deposit was mainly formed by the magmatic-hydrothermal mineralization system; after the formation of a large quantity of magnetite, the remaining small amount of fluid was mixed with ocean water, resulting in an epithermal alteration process and leading to the filling of hematite and in the magnetite ore.

**Key words:** West Tianshan Mountains; Tiemulike iron deposit; mineralogy; stable isotopes; genesis

---

**About the first author:** WANG Da-chuan, male, born in 1991, master candidate, majors in geological engineering; E-mail: wangdachuan0735@163.com.