

新疆西天山尼新塔格铁矿床地质特征与矿床成因

荆德龙¹, 张博¹, 汪帮耀^{1,2}, 夏明哲^{1,2}, 夏昭德^{1,2}, 姜常义^{1,2}, 李新光³

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西西安 710054; 2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西西安 710054; 3. 新疆地质矿产局第九地质大队, 新疆乌鲁木齐 830000)

摘要: 尼新塔格铁矿床所属的西天山阿吾拉勒成矿带赋存有多个中-大型铁矿, 近年来这些铁矿床的成因类型以及它们之间的联系已成为该地区的一个研究热点。为了探讨尼新塔格铁矿床的矿床成因并进一步揭示其成矿过程, 本文对该矿床进行了系统的矿物学、岩石学、岩相学及地球化学研究。工程勘探资料显示该矿床赋矿围岩主要为下石炭统大哈拉军山组玄武粗面安山岩、粗面安山岩及安山质火山碎屑岩。根据对围岩蚀变、矿石组构、矿物共生组合的观察, 将矿床的形成过程划分为矿浆期和热液期两个主要成矿期。稀土、微量元素地球化学特征显示尼新塔格铁矿区内的矿石与熔岩围岩具有同源性。岩相学及地球化学研究表明, 成矿物质主要来源于岛弧环境下形成的玄武质岩浆。综合以上特征, 认为尼新塔格铁矿床是由石炭纪岛弧环境下形成的玄武质岩浆分异演化的产物, 在成因类型上应属火山岩型岩浆-热液复合成因磁铁矿矿床。

关键词: 尼新塔格 地质特征 成矿期次 稀土和微量元素 矿床成因

中图分类号: P595; P618.31

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)05-0841-18

Geological characteristics and ore genesis of the Nixintage iron deposit in West Tianshan Mountains, Xinjiang

JING De-long¹, ZHANG Bo¹, WANG Bang-yao^{1,2}, XIA Ming-zhe^{1,2}, XIA Zhao-de^{1,2},
JIANG Chang-yi^{1,2} and LI Xin-guang³

(1. Earth Science & Resources College, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. No. 9 Geological Party, BGMERD of Xinjiang, Urumqi 830000, China)

Abstract: The Nixintage magnetic iron deposit is situated in the east Awulale metallogenic belt, western Tianshan Mountains, Xinjiang. Several large-sized and medium-sized iron deposits have been found in this belt, and their genetic types as well as the contact relationship between them have become problems of heated debate in this area. A series of systematic researches have been conducted to discuss the ore genesis. Stratigraphic study and drilling projects reveal that the orebodies are hosted in basaltic trachyandesite, trachyandesite and pyroclastic rocks of Lower Carboniferous Dahalajunshan Formation, which contain 3 main iron orebodies. They are all concealed orebodies and occur in bedded and stratoid forms. Ore structures mainly include disseminated type, brecciated type, massive type and striped type. The main ore mineral in the iron ore is magnetite, followed by hematite, with minor pyrite and limonite and occasional geikielite. The main altered minerals in the wall rocks include chlorite, epidote and carbonate. On the basis of the study of ore fabric and paragenetic association of minerals, the metallogenic stages of the Nixintage iron deposit can be divided into two periods: magmatic metallogenic period and hydrothermal period. The orebodies and their wall rocks have similar chondrite-normalized REE

收稿日期: 2014-02-27; 修订日期: 2014-08-12

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013G1271096); 中国地质调查局资助项目(资[2013]D1-002-062)

作者简介: 荆德龙(1988-), 男, 博士研究生, 从事矿物学、岩石学、矿床学方面的研究, E-mail: jing.delong@163.com

patterns and rich LREE. The orebodies and their wall rocks also have similar trace elements characteristics, relatively rich in Th as well as U and poor in Nb, Ta and Sr. REE and trace elements charactersitics show that they are homologous. The study of petrography demonstrates that orebodies and their wall rocks are products of a developed basaltic magma rather than the products of andesitic magma. The general negative anomalies of Nb, Ta in the orebodies as well as their wall rocks and the negative anomalies of Ti in the wall rocks show that the ore-forming parental magma was probably the basaltic magma formed in an island-arc environment. In conclusion, the Nixintage magnetic iron deposit resulted from differential evolution of basaltic magma formed in an island-arc environment during the Carboniferous period. This magnetic iron ore deposit belongs genetically to volcanic magmatic-hydrothermal compound type.

Key words: Nixintage; geological characteristics; metallogenic period; REE and trace elements; ore genesis

新疆西天山地区通常由北向南划分为北天山、中天山、南天山 3 个构造单元(黄汲清等, 1980), 阿吾拉勒成矿带位于北天山中部, 是近年来发现的一条极其重要的铁、铜、金多金属成矿带, 铁、铜、金矿资源较为丰富(毛景文等, 2006; 陈毓川等, 2008; 李文渊等, 2012; 张作衡等, 2012)。通过近年的铁矿勘查工作, 在该成矿带内相继发现了查岗诺尔、备战、智博、敦德等大型、超大型铁矿床, 以及松湖、雾岭、尼新塔格-阿克萨依等中型铁矿床(卢宗柳等, 2006; 赵一鸣, 2013), 累计探获铁矿资源量 11.7 亿吨(张作衡等, 2012), 并拥有巨大的铁矿资源勘查潜力。已有的研究发现, 这些铁矿床普遍赋存在玄武质-安山质熔岩及火山碎屑岩中(莫江平等, 1997; 王军年等, 2009; 单强等, 2009; 冯金星等, 2010; 董连慧等, 2011; 李凤鸣等, 2011; 汪帮耀等, 2011a, 2011b; 牛贺才等, 2012; 蒋宗胜等, 2012; 洪为等, 2012; 王春龙等, 2012; 荆德龙等, 2012)。虽然不同学者对各铁矿床的具体成因类型还存有争议, 但随着研究程度的深入, 火山作用对该成矿带内铁矿床形成所起到的重要作用逐渐被揭示, 火山岩型铁矿这一基本成因类型也逐渐被认可。

尼新塔格铁矿床是在 2007 年由新疆地矿局地质九大队发现, 至今该矿床仍处于勘查阶段, 研究程度较低。本文在大量野外调研和室内研究的基础上, 对尼新塔格铁矿床进行了系统的岩石学、矿物学以及微量和稀土元素地球化学研究, 以期对矿床的矿床成因进行探讨, 并进一步揭示成矿过程。

1 地质背景

新疆西天山位于中亚造山带的西南部。高俊等(2009)将西天山地区划分为北天山弧增生体、伊犁

地块北缘活动陆缘、伊犁地块、伊犁地块南缘活动陆缘、中天山复合弧地体和塔里木北部被动大陆边缘(图 1)。伊犁地块夹于天山主干断裂(中天山北缘断裂)和南部尼古拉耶夫-那拉提北坡断裂之间, 呈楔形向东尖灭。尼新塔格铁矿床位于伊犁地块东北缘、博罗科努山系主脊线上, 属石炭纪岛弧带。该区经历了复杂的构造演化历程, 早古生代进入多陆块(微板块)及多岛弧古亚洲洋演化阶段, 先后发生过向南、向北两次碰撞增生活动(左国朝等, 2008); 早石炭世末可能结束增生造山, 二叠纪西天山至整个中亚地区进入后碰撞演化阶段, 属于晚古生代增生造山带(高俊等, 2009; Gao *et al.*, 2009)。

石炭纪-二叠纪时期该区经历了从俯冲-碰撞造山向后碰撞伸展-拉张环境的构造转变(熊小林等, 2001; 朱永峰等, 2006; 龙灵利等, 2008; Gao *et al.*, 2009; 高俊等, 2009; 朱志新等, 2013), 形成了该区内广泛发育的石炭纪-二叠纪火山岩和火山碎屑岩地层。阿吾拉勒铁成矿带内的铁矿床普遍赋存于该阶段形成的火山熔岩和火山碎屑岩地层内。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质概况

尼新塔格铁矿床位于阿吾拉勒山中部、阔尔库岩体南侧的火山岩分布区域, 矿区内出露的地层主要有下石炭统大哈拉军山组(C_1d)、阿克沙克组(C_1a)和上石炭统伊什基里克组(C_2y)及第四系(如图 2、图 3)。

矿区范围内出露的侵入岩主要为早二叠世侵位的黑云母二长花岗岩, 出露面积较广, 分布于矿区的北部。

大哈拉军山组(C_1d)矿区仅出露大哈拉军山组的第 3 段(C_1d^3)地层, 整体上由一套浅海相中基性

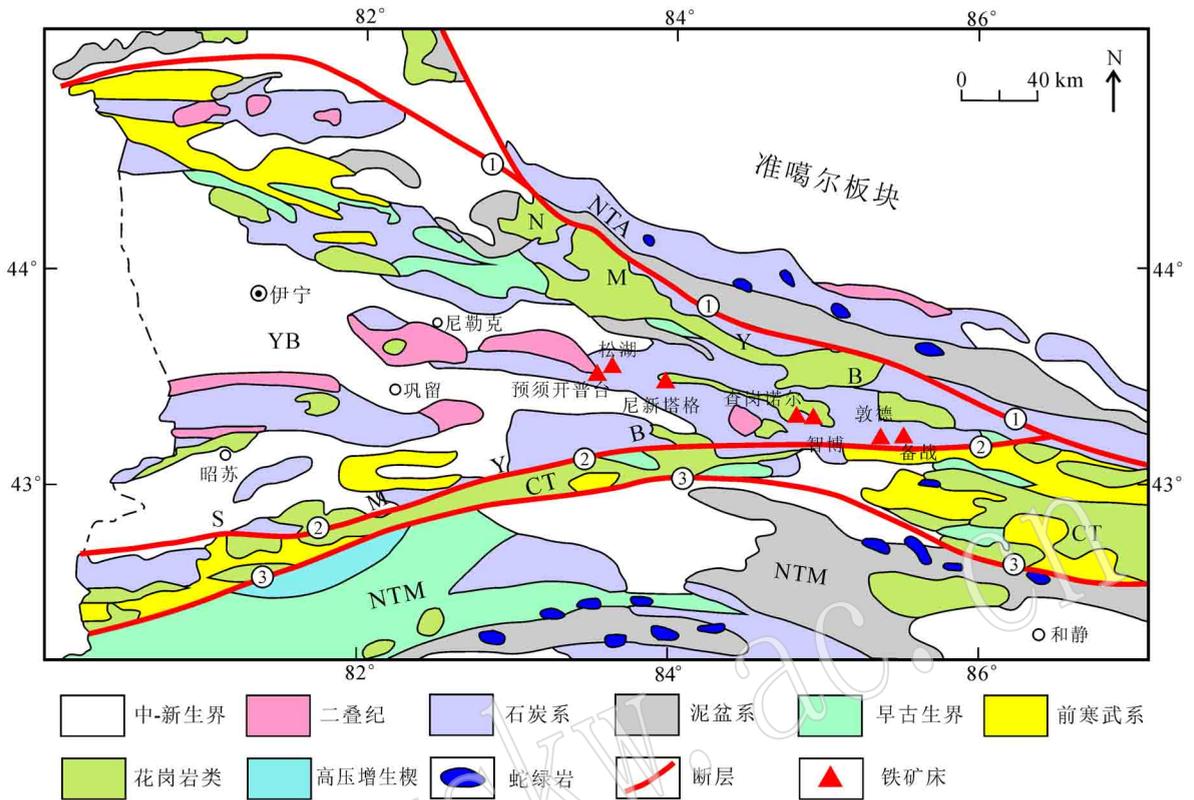


图 1 西天山区域地质简图(根据高俊等, 2009 修改)

Fig. 1 Simplified geological map of West Tianshan Mountains (modified after Gao Jun *et al.*, 2009)

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—中天山南缘断裂
 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—northern Tianshan suture; ②—Nikolaev Line-North Nalati suture; ③—southern Central Tianshan suture

火山岩、火山碎屑岩组合而成, 下部以玄武岩、玄武安山岩、安山岩为主, 次有少量霏细斑岩; 上部以凝灰岩和安山质角砾晶屑凝灰岩为主(如图 3)。

阿克沙克组(C_{1a}): 整体上由滨海相安山质碎屑岩夹陆源碎屑岩建造组成。岩性以安山质凝灰岩、安山质火山角砾岩为主, 少量安山岩、凝灰质成分砂砾岩。它与下伏的大哈拉军山组第 3 段(C_{1d}^3)地层呈断层接触。

伊什基里克组(C_{2y}): 矿区仅见有伊什基里克组上段(C_{2y}^2)的一部分, 整体上为一套海相火山岩、火山碎屑岩建造。岩性以安山岩、玄武岩、凝灰岩为主, 夹角砾凝灰岩及沉凝灰岩。与下伏的阿克沙克组(C_{1a})地层呈断层接触。

第四系(Q): 主要成因类型有更新统风积层和全新统残坡积层, 多厚度不大, 分布较为分散, 沿沟

谷、洼地及缓坡地带分布。

侵入岩体与火山岩地层侵入接触部位未见有矿体。矿区内脉岩不发育, 只在岩体附近及断裂破碎带有少量分布, 露头较差。矿区西段见有少量呈北西向展布的闪长岩脉。

矿区总体表现为一近东西向展布的单斜构造特征, 地层总体向北陡倾, 倾角 $55^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 。褶皱构造不明显, 局部受断层构造作用及岩浆侵入的影响而发生了的偏转或轻微褶曲。矿区内发育有北西向、近东西向、北东东向 3 组断裂构造, 以北西向为主, 次为近东西向断裂。北西向、近东西向断裂规模相对较大, 它们对区内岩层、岩体的展布有一定的控制作用; 北东东向断层为次一级断层, 规模相对较小, 多属近东西向断裂构造的次级断层, 表现为正断层的特征。

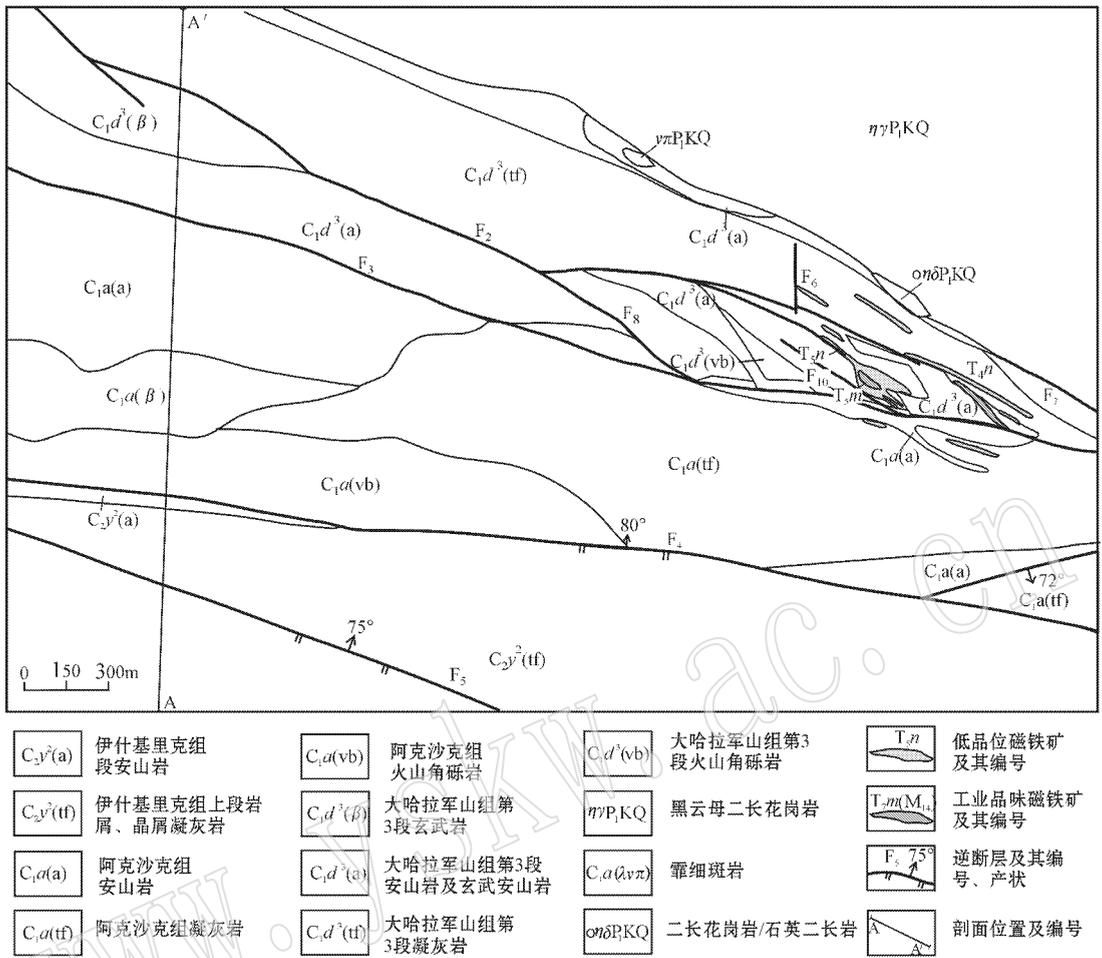


图 2 尼新塔格铁矿矿区地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of the Nixintage iron deposit

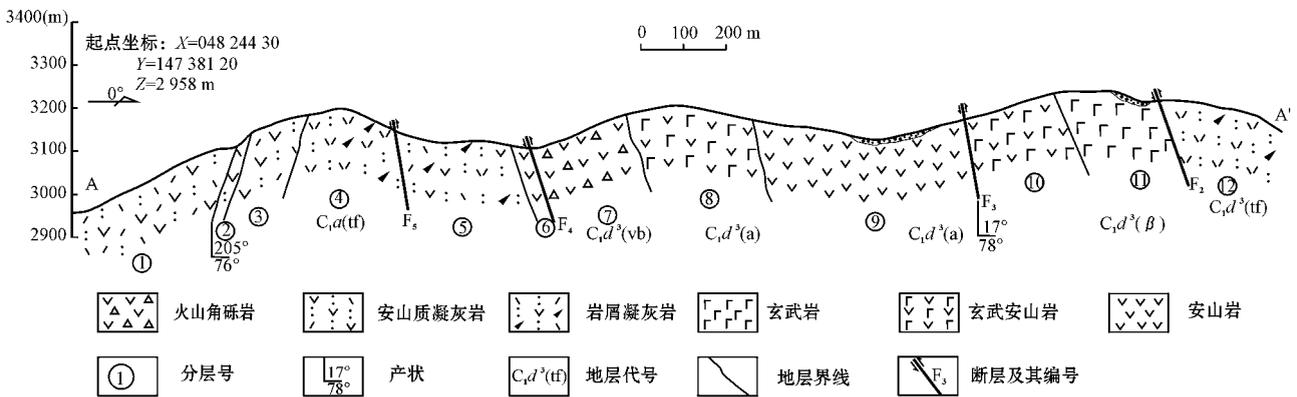


图 3 尼新塔格铁矿 A—A' 剖面图

Fig. 3 Geological section along A—A' line of the Nixintage iron deposit

2.2 矿体地质特征

矿区内根据槽探揭露情况在地表圈定磁铁矿体 10 个, 根据钻探工程在深部控制隐伏的磁铁矿体 31 个。主矿体有 3 条, 编号为 T11、T23 和 T24, 三者均

为隐伏矿体, 呈层状、似层状赋存于大哈拉军山组第 3 段 (C_1d^3) 的安山质凝灰岩、玄武粗面安山岩、粗面安山岩中。矿体倾向北东, 上陡下缓, 倾角 $60^\circ \sim 5^\circ$ (如图 4), 矿体与围岩无明显界线, 只是矿体边缘磁

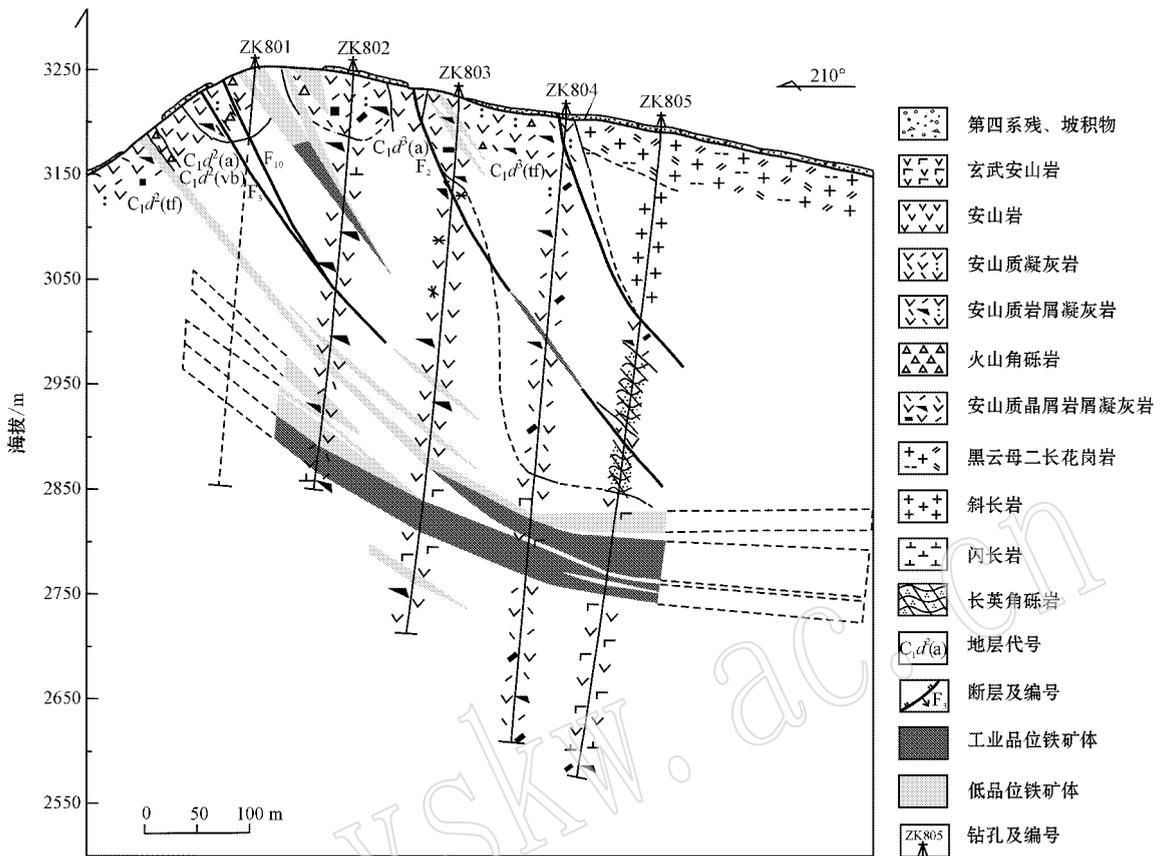


图4 尼新塔格铁矿8—8'勘探线简易剖面图(据新疆地矿局第九地质大队^①改绘)

Fig. 4 Simplified geological section along 8—8' exploration line of the Nixintae iron deposit (after No. 9 Geological Party, BGMERD of Xinjiang^①)

性明显变弱,全铁含量偏低。

2.3 含矿岩石特征

如前所述,矿体的赋矿围岩为大哈拉军山组第3段(C_1d^3)的安山质火山碎屑、玄武安山岩、安山岩,熔岩围岩具富碱特征,按其化学分类主要为玄武粗面安山岩、粗面安山岩。各类岩石特征描述如下:

粗面安山岩:斑状结构,块状构造。岩石主要由斜长石、钠长石和少量角闪石及磁铁矿组成,偶见辉石。斑晶以斜长石为主,少量的钠长石、角闪石和黑云母,偶见辉石。基质具交织结构,微晶斜长石之间为它形的碱性长石、微细粒状暗色矿物和粉尘状细粒磁铁矿。岩石中局部具气孔构造,偶见有角砾,成分为磁铁矿和玄武岩。

玄武粗面安山岩:斑状结构,块状构造。岩石主要由斜长石、钠长石、角闪石和少量隐晶质、磁铁矿组成。斑晶成分主要为自形、半自形的斜长石,少

量角闪石、黑云母和辉石。基质呈交织结构、间粒结构或间隐间粒结构,充填在斜长石及钠长石微晶之间的为暗色矿物集合体、玻璃质和磁铁矿。该类岩石基质中普遍见有磁铁矿化,磁铁矿含量最高可达20%以上。矿区内存在一系列玄武粗面安山岩—弱矿化玄武粗面安山岩—矿化玄武粗面安山岩—浸染状矿石,它们具有一种特征:磁铁矿可以任何比例存在于该类岩石的基质中(如图5)。

岩屑晶屑凝灰岩:紫红色、灰紫色、灰绿色,火山角砾凝灰岩结构,层状构造。岩石主要有岩屑、晶屑、细火山灰和磁铁矿组成,各组分在岩石中分布不均,不同层位、不同区域含量变化较大。该类岩石中岩屑成分以凝灰岩、(玄武)安山岩和磁铁矿为主。岩屑多呈棱角状,粒度大多数在 $0.2\text{ mm} \times 0.2\text{ mm} \sim 4\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 之间。晶屑成分以斜长石为主,石英次之,少量钠长石,粒度 $0.2 \sim 3\text{ mm}$ 。基质由隐晶质的

① 新疆地矿局第九地质大队, 2011. 新疆新源县尼新塔格铁矿详查报告(内部资料)。

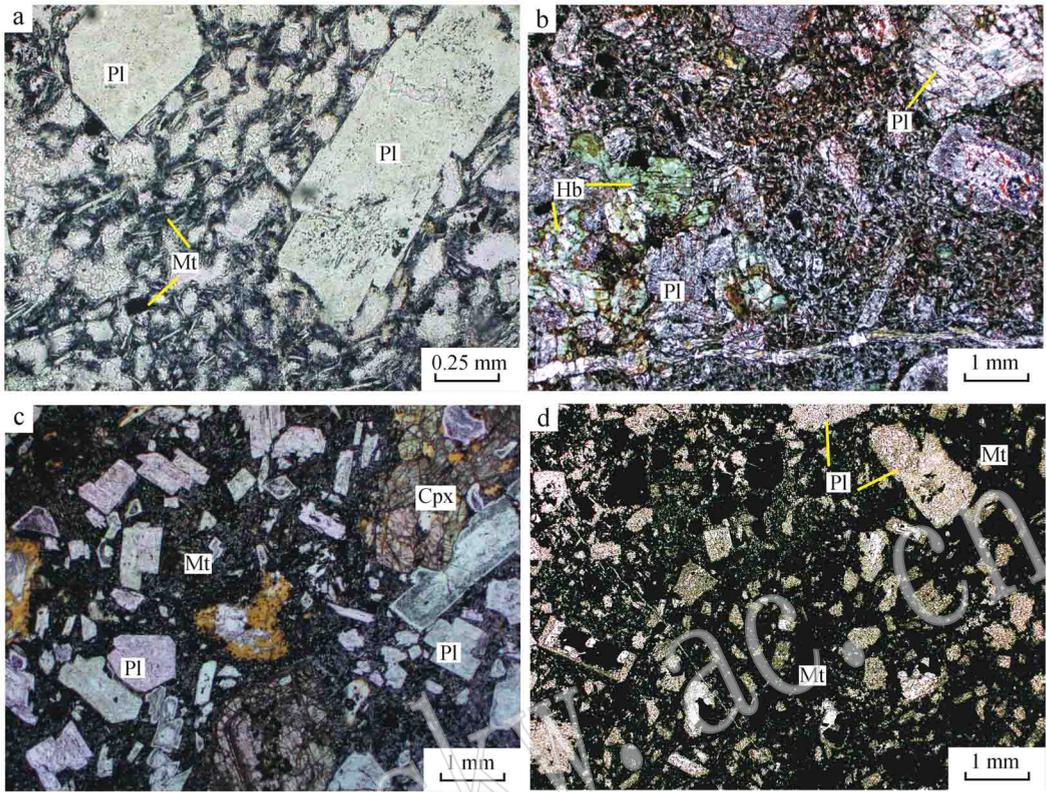


图 5 尼新塔格铁矿区玄武安山岩向浸染状磁铁矿递变系列显微照片

Fig. 5 Serial microphotographs of basaltic trachyandesite grading into disseminated magnetite in the Nixintag deposit

a—玄武安山岩; b—弱矿化玄武安山岩; c—浸染状矿石; d—浸染状矿石

a—basaltic trachyandesite; b—weakly mineralized basaltic trachyandesite; c—sparsely disseminated ore; d—disseminated ore

火山灰和粉尘状磁铁矿组成,局部重结晶。该类岩石中普遍存在不同程度的磁铁矿化,愈靠近矿体磁铁矿化愈强烈。岩石蚀变也不均匀,蚀变类型复杂,以碳酸盐化为主,绿泥石化次之,绢云母化普遍存在,但蚀变较弱。此外,见有少量绿帘石化、黝帘石化,局部偶见石榴石化和电气石化。后期有不同程度的褐铁矿化。

2.4 矿石特征

矿石矿物主要为磁铁矿,次为赤铁矿,伴生金属矿化主要为黄铁矿和褐铁矿,偶见有镁钛矿等。矿石内见有两种磁铁矿:一种为半自形-他形细粒磁铁矿,粒度多在 0.1 mm 以下,呈粉尘状、浸染状分布于火山熔岩基质及浸染状、块状矿石中(如图 5a、5c、7d),这一特征说明,该类磁铁矿具矿浆成因特点;另一种为自形-半自形中粗粒磁铁矿,粒度在 0.2~1 mm 以上,多呈网脉状、团块状充填于角砾状、条带状矿石的脉石碎屑、矿物之间,或呈星点状分布于火山熔岩

中,常见该类磁铁矿与绿泥石、阳起石、绿帘石及方解石等热液蚀变矿物伴生,并交代上述微细粒磁铁矿(如图 6a、6d、7b),故该类磁铁矿形成较晚,应是热液阶段产物。

原生脉石矿物以斜长石为主,次为钠长石、角闪石、黑云母和石英,偶见有辉石。次生脉石矿物主要有绿泥石、阳起石和方解石,次为绿帘石、绢云母等。

尼新塔格铁矿目前仍处于勘探阶段,从地表露头及部分钻孔岩芯中采取的矿石样品来看,矿石类型以浸染状矿石和角砾状矿石为主,其次为块状矿石和条带状矿石。各类矿石特征描述如下:

(1) 浸染状矿石: 该类矿石是矿区主要矿石类型。主要金属矿物为磁铁矿(25%~45%),其次为赤铁矿,少量黄铁矿、褐铁矿。磁铁矿以微、细粒磁铁矿为主,此外见有少量自形粗粒磁铁矿呈星点状分布或沿裂隙充填交代早先形成的微细粒磁铁矿(如图 6d、7b)。脉石矿物以斜长石为主,次为钠长石、角闪石,偶见有辉石、黑云母。该类矿石多赋存于火山熔岩内,具火山熔岩结构,微、细粒磁铁矿及

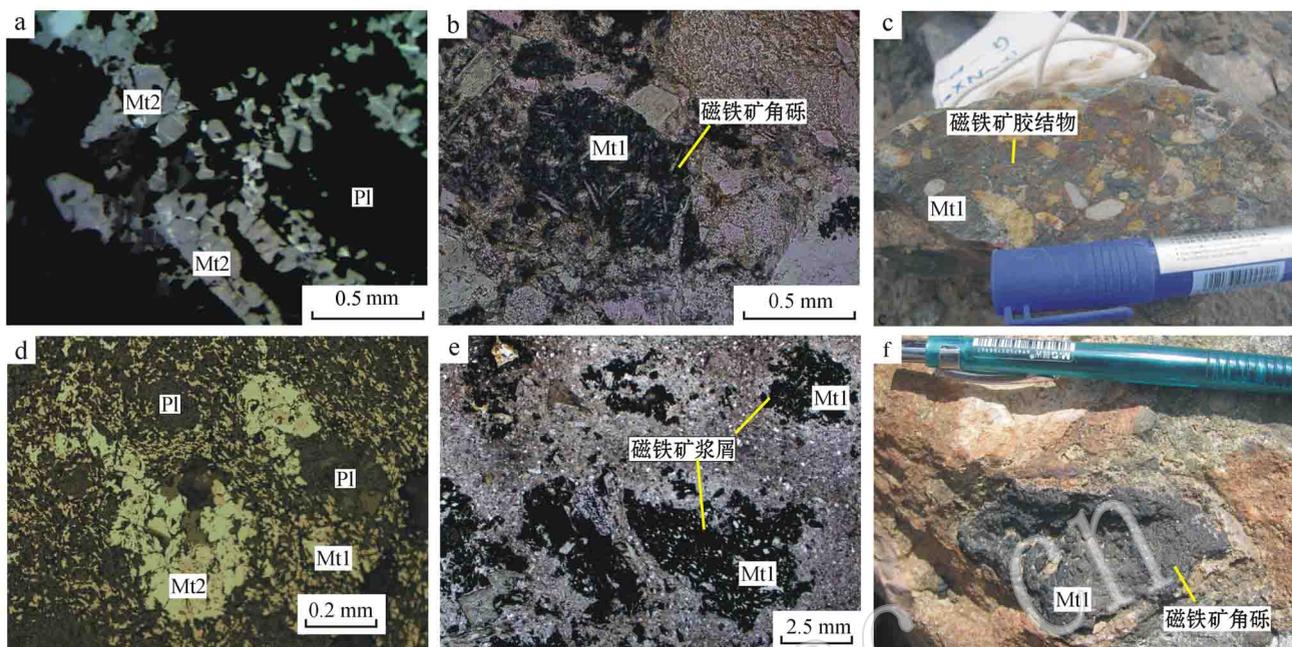


图6 尼新塔格铁矿床矿石的宏观及显微特征

Fig. 6 Microscopic and macroscopic characteristics of iron ore in the Nixintage iron deposit

a—角砾状矿石; b—磁铁矿角砾; c—角砾状磁铁矿; d—浸染状矿石中的两种磁铁矿; e—磁铁矿浆屑; f—磁铁矿角砾

a—brecciform ore; b—magnetite breccia; c—brecciform ore; d—disseminated ore; e—magnetite magma fragment; f—magnetite breccia

斜长石、钠长石微晶作为基质,而中粗粒斜长石及少量角闪石、偶见辉石作为斑晶分布其中(如图5c、7d、6d、7a、7b),显示该类矿石具岩浆成因特征。

(2) 块状矿石: 主要金属矿物为磁铁矿(>45%),其次为赤铁矿和少量的褐铁矿。脉石矿物以斜长石为主,次为钠长石、角闪石、黑云母,偶见有辉石。矿石中两种类型磁铁矿均可见:早期半自形-他形微、细粒磁铁矿一般作为熔岩基质存在,充填于硅酸盐矿物颗粒之间;后期的自形-半自形中粗粒磁铁矿主要呈细脉状充填于岩石裂隙及矿物间隙中或呈星点状分布,交代早先形成的硅酸盐矿物及他形微细粒磁铁矿,显示后期矿化作用对早期矿化叠加改造。大部分块状矿石以岩浆成因为主,由他形微-细粒磁铁矿组成。局部见有极少量的致密块状矿石只由粗粒磁铁矿及方解石组成,显示其为热液成因。

(3) 角砾状矿石: 主要矿石矿物为磁铁矿,次为赤铁矿,磁铁矿含量在25%~35%,赤铁矿含量多在5%~10%。火山角砾结构,角砾成分包含磁铁矿角砾和脉石角砾,此外还有少量的斜长石及石英晶屑。后期的粗粒磁铁矿呈网脉状、团块状交代上述角砾及晶屑的胶结物(如图6a)。部分磁铁矿角砾中见有中基性火山熔岩结构(如图6b)。值得注意的是,在

此次研究工作中我们发现火山碎屑岩及角砾状矿石中存在磁铁矿浆屑和气孔发育的磁铁矿角砾(如图6e、6f),此外见有少量磁铁矿作为胶结物,胶结火山碎屑物(图6c),它们均是磁铁矿矿浆喷溢出地表快速冷凝的产物。这也证明了矿床的形成过程中存在矿浆成矿阶段,矿床的形成与火山作用密切相关。

(4) 条带状矿石: 该类矿石原岩多为含砾沉凝灰岩或层凝灰岩,后经热变质和矿化叠加改造,但变余层纹构造及变余含砾碎屑结构均可识别(图7d、7e)。碎屑物具有粗分选,长轴方向优选定向,显示原岩具有二次搬运特征。磁铁矿有残留和新生两类,残留磁铁矿多呈角砾状分布,新生磁铁矿呈网脉状或团块状交代岩石(如图7d、7e)。部分条带状矿石中显示流动构造,由微细粒磁铁矿及玻璃质及火山碎屑物定向排列显示条带构造,其中气孔构造发育,且气孔多被拉长定向(图7f),显示其为矿浆在地表流动过程中冷凝而成。

2.5 围岩蚀变

尼新塔格铁矿区广泛发育围岩蚀变,多期次的构造、岩浆作用形成了该区多期次、多类型复杂的围岩蚀变。蚀变主要类型有绿泥石化、绢云母化、绿帘石化、碳酸盐化、钠长石化、黝帘石化等,其中以绿泥

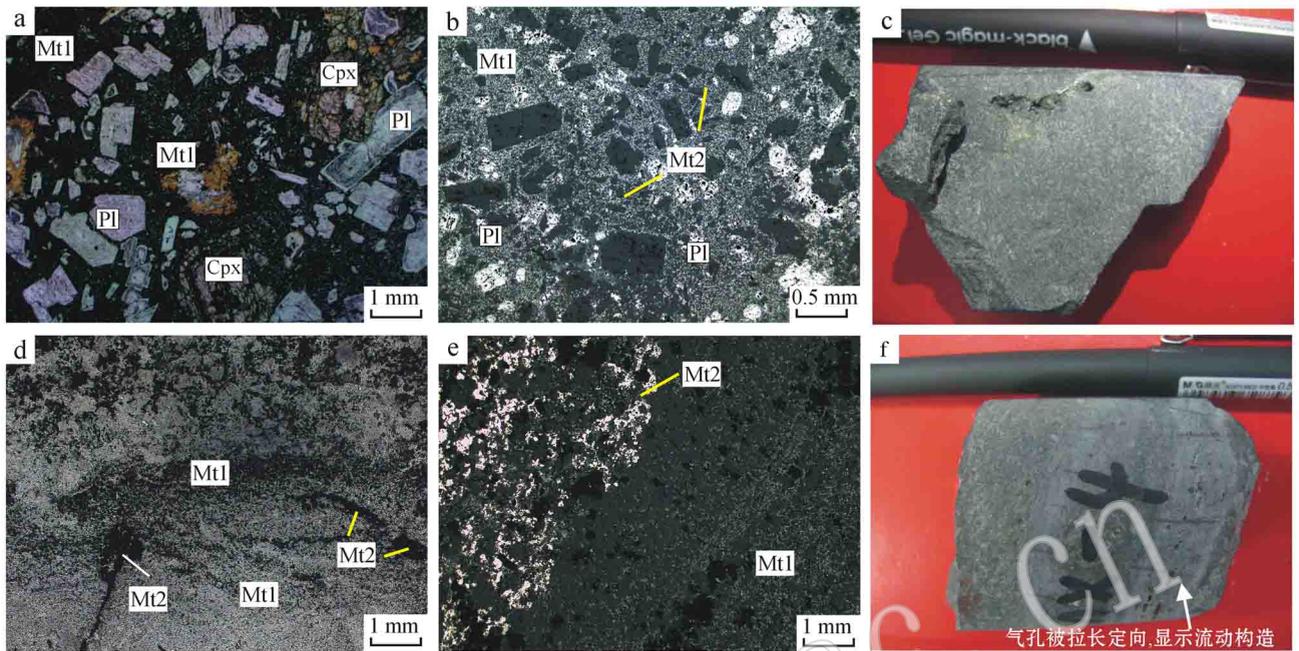


图 7 尼新塔格铁矿床矿石的宏观及显微特征

Fig. 7 Microscopic and macroscopic characteristics of iron ore in the Nixintage iron deposit

a, b, c—浸染状矿石; d, e, f—条带状矿石

a, b, c—disseminated ore; d, e, f—banded ore

石化为主, 次为钠长石化、阳起石化和碳酸盐化为主。除此之外, 在围岩中还见有绿帘石化、黝帘石化, 偶见有石榴子石、透辉石化。

结合室内、外的综合研究分析发现, 早期绿泥石多呈细小的团块状, 主要分布于早期岩石的角砾中, 受岩浆热的影响, 并遭受破坏和改造, 后期有铁质析出, 部分呈棕色或红褐色。热液期绿泥石多新鲜未遭受破坏、改造, 呈较大的团块状甚至细脉状分布。晚期的方解石脉可以穿切早期蚀变矿物, 与绢云母均为低温蚀变矿物。依此将矿区的围岩蚀变划分为以下 3 个期次:

(1) 早期绿泥石化: 该期蚀变作用与岩浆活动密切相关, 主要以角砾及岩屑的绿泥石化和少量阳起石化为代表。该期形成的绿泥石化多呈细小的团块对岩石中的暗色矿物交代。该期矿化蚀变产物普遍遭受后期的火山活动影响, 遭受不同程度的破坏和改造, 绿泥石部分出现蛭石化, 铁质析出, 使之呈棕色或褐色, 与后期形成新鲜绿泥石相区别。该期蚀变可能为火山作用早期岩浆中的挥发分及化学活性流体交代早先形成的岩石的产物。

(2) 热液期绿泥石-阳起石-绿帘石-钠长石化: 该期蚀变作用形成于火山热液早期的中低温热液阶

段, 火山熔岩中, 绿泥石-阳起石化分布广泛, 而钠长石化和绿帘石化则主要分布于基质中, 此外还产生少量黝帘石化。火山碎屑岩中孔隙发育, 岩浆活动形成的火山热液对岩石的交代作用也最强烈, 甚至可以形成绿泥石-阳起石细脉。该期蚀变中的绿泥石-阳起石化多呈新鲜的大团块状, 多未遭受破坏和改造, 与热液期粗粒磁铁矿化关系最为密切, 应为同期产物。

(3) 热液晚期绢云母-碳酸盐化: 以大量出现方解石脉为特征, 穿插和叠加在早期蚀变之上, 此外以团块状交代围岩, 其分布和蚀变强度受裂隙、孔隙等控制明显。热液温度降低后, 沿长石斑晶、晶屑的解理面交代生成绢云母。该期蚀变为晚期低温热液蚀变的产物。

2.6 成矿期次划分

根据对矿区围岩蚀变、矿石结构、矿物共生组合关系及其产出特征的综合研究, 可以将矿床的形成过程划分为两个主要成矿期, 即矿浆成矿期和热液成矿期。

(1) 矿浆成矿期: 该阶段为矿床形成的主成矿阶段, 形成了矿区内的浸染状和部分块状、条带状矿石, 此外还形成了大量火山碎屑岩中的磁铁矿浆屑

以及气孔发育的磁铁矿角砾。该阶段形成的磁铁矿颗粒细微,自形程度较差,常与微细的暗色矿物集合体组成火山熔岩的基质,自形长条状或板柱状斜长石微晶及斑晶分布其中,定向、半定向排列,呈流动构造(如图 5a、7d)。磁铁矿角砾及浆屑中见有玻璃质及结晶不好的斜长石(如图 5a、6b)。

(2)热液成矿期:该期成矿作用发生在矿浆成矿期之后,形成了矿区内大部分的角砾状、条带状矿石,以及少量的块状矿石。该阶段形成的磁铁矿颗粒较粗,多在 0.2~1 mm 以上,自形程度较好,多呈网脉状、团块状交代围岩,此外,成矿热液还对矿浆期形成的矿石进行了叠加、改造(图 6a、6d、7b、7d)。根据矿物共生组合关系,又可以将该成矿期划分成磁铁矿-黄铁矿-绿泥石-阳起石绿帘石-钠长石阶段和磁铁矿-赤铁矿-黄铁矿-碳酸盐阶段。后者所形成的磁铁矿颗粒更粗,自形程度也更好。

3 矿床地球化学

3.1 样品

本次研究工作系统采集了矿区内各类岩石、矿石样品,在对样品进行详细的手标本和光、薄片显微镜下观察后,挑选相对新鲜并具有代表性的样品进行岩石地球化学分析。此处用于研究分析的 14 件围岩样品采自矿区露头及钻孔中赋存矿体的新鲜火山熔岩层位,包括 9 件玄武粗面安山岩、1 件玄武安山岩、3 件粗面安山岩和 1 件安山岩。位于地层下部层位中的玄武岩由于目前未见有与矿体的直接接触或包含关系,在此不做讨论,赋矿的安山质火山碎屑岩由于其成分来源的复杂性,其地球化学数据不能够准确指示成岩、成矿作用特征,故在此也不做讨论。12 件矿石有 4 件采自部分矿体露头、8 件采自钻孔岩芯,包括 2 件块状矿石、4 件浸染状矿石、2 件条带状矿石、4 件角砾状矿石。

3.2 分析方法及结果

对样品进行清洗、粉碎、缩分,将其在玛瑙研钵中研磨至 200 目以下粉末备用。样品分析在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室完成。微量元素分析采用美国 X-7 型 ICP-MS 完成。仪器工作参数:Power:1200 W, Nebulizer gas:0.64 L/min, Auxiliary gas:0.80 L/min, Plasma gas:13 L/min。分析结果如表 1 所示。受篇幅所限,围岩样品的主量元素及微量元素丰度分析结果此处不附,另文发表。

3.2.1 稀土元素地球化学

依据尼新塔格铁矿区围岩及矿石的微量元素测试数据作球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图如图 8 所示。

从图上可看出,14 件围岩样品具有基本一致的稀土元素配分模式,其配分曲线大致相同,均为略微向右倾的轻稀土富集型。围岩样品的 $\delta Eu = 0.84 \sim 1.15$,具有微弱的负 Eu 异常或 Eu 异常不明显。轻稀土元素内部分馏程度以及重稀土元素内部分馏程度均弱,轻、重稀土元素之间的分馏程度强。

12 件矿石样品具有相似的稀土元素配分特征,即轻稀土元素内部分馏程度以及重稀土元素内部分馏程度均较弱($La/Sm)_N = 1.17 \sim 3.22$,平均 2.38, ($Gd/Yb)_N = 1.34 \sim 2.10$,平均 1.63],轻、重稀土元素之间的分馏程度强($La/Yb)_N = 3.05 \sim 9.9$,平均 5.37],具微弱的负 Eu 异常($\delta Eu = 0.66 \sim 0.96$)。各类矿石的稀土元素配分曲线大致平行,均为向右倾的轻稀土富集型。

对比尼新塔格铁区内矿石与围岩的的稀土元素配分特征,两者配分型式整体上相似,略有不同。整体上矿石的稀土元素含量略低于围岩,而稀土元素分馏程度高于围岩,稀土元素配分曲线更分散,右倾趋势更明显。由于稀土元素相对于富铁的矿浆更相容于硅酸盐熔浆,故矿石中稀土元素含量要低于围岩稀土元素含量。矿石中普遍具有弱的负 Eu 异常,说明铁矿浆及富矿热液成矿应该发生于岩浆演化的晚期,岩浆氧逸度降低。矿石与围岩具有相似的配分型式,说明尼新塔格铁区内矿石与火山熔岩围岩具有同源性,即矿区内围岩与矿石均由同源岩浆演化而来。

3.2.2 微量元素地球化学

依据尼新塔格铁矿区围岩及矿石的微量元素测试数据作原始地幔标准化微量元素配分曲线图如图 9 所示。

从图上可以看出,各类矿石的微量元素原始地幔标准化分布模式总体相似,显著富集 Th 和 U, La、Ce、Nd 元素也有小幅度的相对富集, Nb、Ta、Sr 元素的负异常明显,微量元素配分曲线相对起伏较大,呈现三峰两谷的特征。

围岩中也相对富集 Th、U,此外有不同程度的 Rb、Ba 富集, Nb、Ta 元素显著亏损, Ti 元素具微弱的负异常,此外 Sr 元素也具有不同程度的负异常。微量元素配分曲线整体上相对较为平滑。

表 1 尼新塔格铁矿石微量元素丰度表

 $w_B/10^{-6}$

Table 1 Trace elements and rare earth elements abundances of ores in the Nixintage deposit

岩性 样品编号	角砾状矿石				块状矿石		浸染状矿石				条带状矿石	
	H-NX-5	H-aK-4	H-nX-8	H-NX-6	H-NX-2	H-NX-3	H-NX-1	H-aK-1	H-aK-3	H-nX-9	H-NX-4	H-aK-2
Li	5.08	10.54	15.46	8.27	16.65	26.9	14.11	13.94	5.67	15.7	14.09	13.33
Be	0.25	0.58	0.93	0.3	0.33	0.72	0.29	0.71	0.75	0.8	0.46	0.63
Sc	0.78	10.19	13.49	7.91	13.54	12.29	6.61	18.74	8.55	9.11	10.96	18.7
Ga	34.54	21.59	24.22	20.16	15.48	36.13	19.87	22.23	22.32	27.33	23.26	22.11
Rb	30.21	5.84	4.11	15.7	102.4	17.41	23.81	6.56	318.2	8.69	15.6	4.01
Sr	43.8	35.25	32.32	30.76	67.03	48.95	26.56	51.35	47.41	49.34	52.05	54.18
Y	4.04	15.01	12.91	13.89	17.42	9.25	15.3	12.75	8.51	13.65	15.4	12.5
Zr	31.34	11.95	44.84	74.25	90.96	33.32	63.34	44.06	38.88	57.7	69.67	42.85
Nb	0.41	0.48	3.48	3.12	2.83	0.27	2.97	3.54	5.56	5.04	2.37	3.45
Cd	0.008	0.57	1.03	0.032	0.058	0.03	9.34	0.16	0.21	0.14	0.014	0.12
In	0.045	0.23	0.065	0.074	0.044	0.039	0.1	0.073	0.05	0.035	0.061	0.073
Cs	0.7	0.62	0.5	0.56	0.61	0.49	0.82	0.59	3.5	0.61	0.96	0.5
Ba	40.64	65.88	57.01	67.38	1460	36.93	71.72	34.78	196.9	29.74	59.3	32.14
La	2.68	12.05	8.58	18.87	9.4	8.17	9.57	14.03	11.7	16.89	24.16	14.16
Ce	12.99	28.25	22.32	45.09	25.41	20.57	28.18	31.34	30.15	40.34	55.88	31.52
Pr	1.29	3.84	3.37	4.32	2.74	2.19	3.19	4.29	4.33	5.61	5.58	4.31
Nd	5.83	14.33	13.68	17.72	12.01	9.47	13.72	16.18	15.88	21.05	22.26	16.33
Sm	1.43	2.75	3.06	3.85	3.38	2.32	3.54	3.11	2.91	3.83	4.71	3.15
Eu	0.35	0.76	0.79	0.93	0.96	0.65	0.76	0.9	0.88	0.93	1.13	0.87
Gd	1.25	3.10	3.17	3.62	3.68	2.31	3.43	3.12	2.6	3.71	4.31	3.13
Tb	0.18	0.49	0.52	0.49	0.59	0.32	0.52	0.46	0.39	0.54	0.57	0.45
Dy	1.08	2.97	3.01	2.87	3.75	1.92	3.21	2.51	2.05	3.01	3.25	2.48
Ho	0.22	0.68	0.67	0.59	0.77	0.39	0.7	0.56	0.44	0.67	0.65	0.56
Er	0.65	1.86	1.89	1.79	2.24	1.08	2.09	1.57	1.22	1.9	1.88	1.55
Tm	0.093	0.27	0.29	0.28	0.31	0.16	0.3	0.25	0.19	0.29	0.28	0.24
Yb	0.52	1.82	1.92	1.66	2.06	0.92	2.07	1.65	1.29	2.04	1.66	1.63
Lu	0.095	0.33	0.3	0.3	0.33	0.16	0.32	0.28	0.22	0.34	0.29	0.27
Hf	0.92	0.33	1.46	2.02	2.34	1.00	1.9	1.31	1.33	1.79	1.88	1.29
Ta	0.015	0.035	0.3	0.27	0.24	0.011	0.21	0.28	0.39	0.57	0.19	0.27
Pb	2.22	71.32	101.3	4.55	3.02	4.81	3.12	21.48	96.62	22.66	3.85	22.38
Bi	0.5	1.05	0.75	0.36	2.03	0.55	167.9	0.37	0.44	0.17	0.41	0.35
Th	1.27	2.62	4.85	4.96	2.82	1.42	2.41	5.32	6.74	7.49	3.38	5.25
U	5.43	2.28	2.83	3.33	3.55	2.86	3.32	2.46	4.73	3.51	3.15	2.43
ΣREE	28.68	73.51	63.54	102.38	67.65	50.65	71.61	80.25	74.25	101.16	126.6	80.66
ΣLREE	24.58	61.98	51.79	90.78	53.9	43.38	58.97	69.85	65.86	88.65	113.71	70.33
ΣHREE	4.1	11.53	11.75	11.6	13.75	7.26	12.64	10.4	8.39	12.51	12.89	10.32
LREE/HREE	5.99	5.38	4.41	7.83	3.92	5.97	4.67	6.71	7.85	7.09	8.82	6.81
(La/Yb) _N	3.51	4.51	3.05	7.74	3.11	6.04	3.14	5.79	6.16	5.63	9.9	5.9
(La/Sm) _N	1.17	2.74	1.76	3.07	1.74	2.2	1.69	2.83	2.52	2.76	3.22	2.82
(Gd/Yb) _N	1.95	1.38	1.34	1.77	1.45	2.03	1.34	1.53	1.63	1.47	2.1	1.55
δEu	0.77	0.79	0.76	0.75	0.83	0.85	0.66	0.87	0.96	0.74	0.75	0.83
δCe	1.68	1	1.01	1.17	1.2	1.16	1.23	0.97	1.03	1	1.13	0.97

注: $\delta Eu = (2Eu/Eu_N) / (Sm/Sm_N + Gd/Gd_N)$ $(La/Yb)_N = (La/La_N) / (Yb/Yb_N)$ $(La/Sm)_N$ $(Gd/Yb)_N$ 计算方法类似。

对比本区各类岩石、矿石的微量元素特征可以发现, 各类矿石具有大致相似的微量元素配分模式, 并且矿石与矿区围岩微量元素配分模式相似, 均相对富集 Th 和 U, 亏损 Nb、Ta、Sr, 这进一步印证了矿石与围岩具有同源性。矿石具有比围岩更显著的 Sr

亏损可能是由于矿浆形成之前岩浆发生了斜长石的分离结晶, 这也说明铁矿浆形成于岩浆演化的晚期阶段。微量元素原始地幔标准化图上, 围岩 Rb、Ba、Th、U 等元素的变化与大多数矿石不一致, 可能是由于后期富铁岩浆热液对矿石叠加改造导致矿石中这

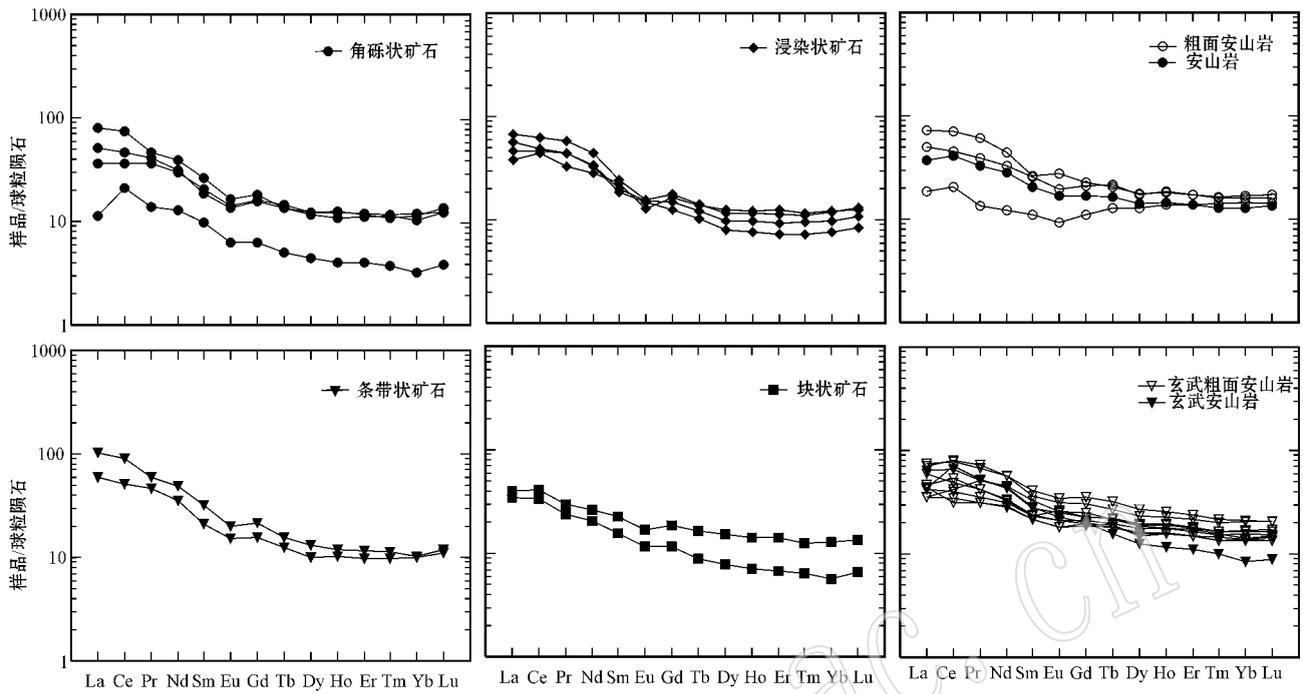


图 8 尼新塔格铁矿矿石和岩石稀土元素配分曲线图(标准值据 McDonough and Sun , 1995)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of rocks and ores in the Nixintage deposit (normalizing values after McDonough and Sun , 1995)

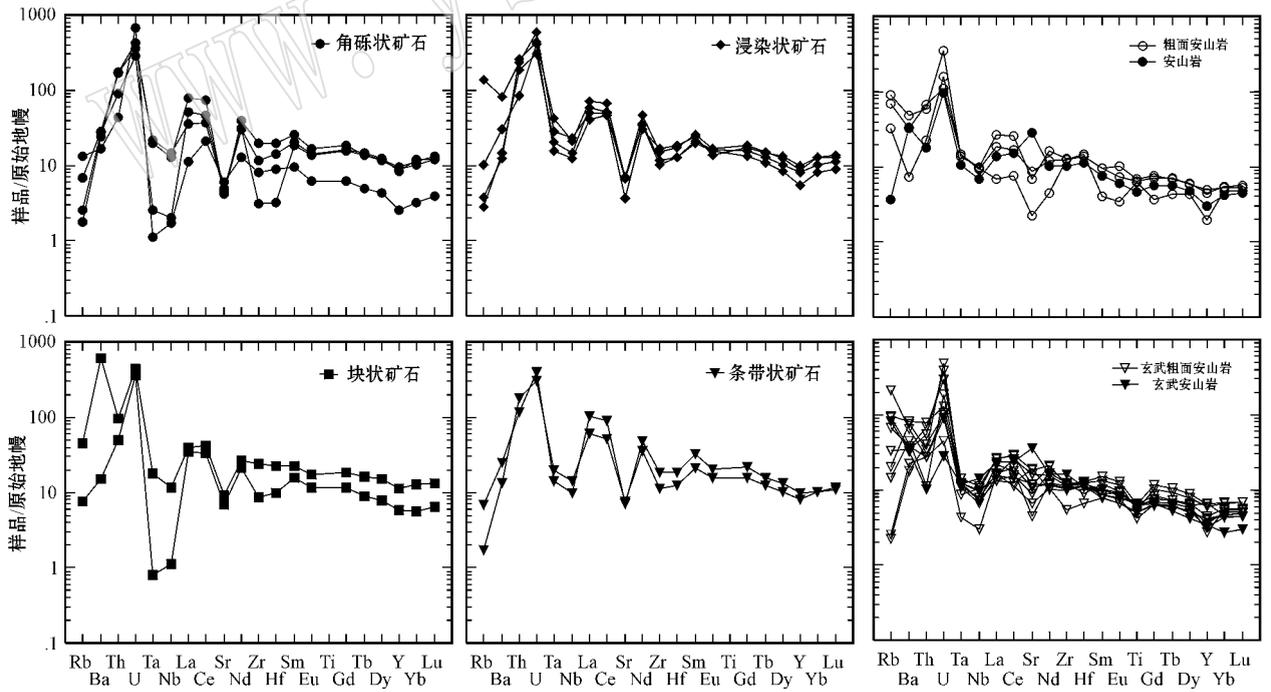


图 9 尼新塔格铁矿矿石和岩石的微量元素配分曲线图(标准值据 McDonough and Sun , 1995)

Fig. 9 Primitive mantle-normalized trace elements spider diagram of rocks and ores in the Nixintage deposit (normalizing values after McDonough and Sun , 1995)

些元素受到热扰动所致。而浸染状和块状矿石中各有一件样品的 Rb、Ba、Th、U 元素变化与围岩相似，其他矿石类型则无此现象，这也进一步印证了这两种矿石的岩浆成因。

4 讨论

4.1 成矿年代学及动力学背景

大哈拉军山组是西天山广泛出露的一套浅海中基性火山岩、火山碎屑岩组合。近年来对该套火山-沉积岩系的岩石学、年代学和岩石地球化学研究逐渐增多，对其沉积构造环境的认识虽依旧存在争议，但越来越多的研究表明，该套岩石可能形成于岛弧环境(姜常义等，1993，1995；顾连兴等，2000；朱永峰等，2006；钱青等，2006；龙灵利等，2008；李永军等，2009；Zhu *et al.*，2009；李继磊等，2010；汪帮耀等，2011a)。笔者对尼新塔格铁矿区石炭纪火山岩进行研究后发现，该套火山岩具富碱特征(尤其以富钠为特征， Na_2O 平均 4.92%， K_2O 平均 2.26%)，地球化学分类上属于碱性系列(如图 10)。在 Hf-Th-Ta 及 Th/Yb-Nb/Yb 构造环境判别图解(图 11)中，大多数围岩样品点都落入了 D 火山弧玄武岩区及大陆岛弧玄武岩区，在再加上 LREE 富集的右倾型稀土元素配分曲线与矿石与围岩中普遍的 Nb、Ta 亏损以及围岩中出现弱的

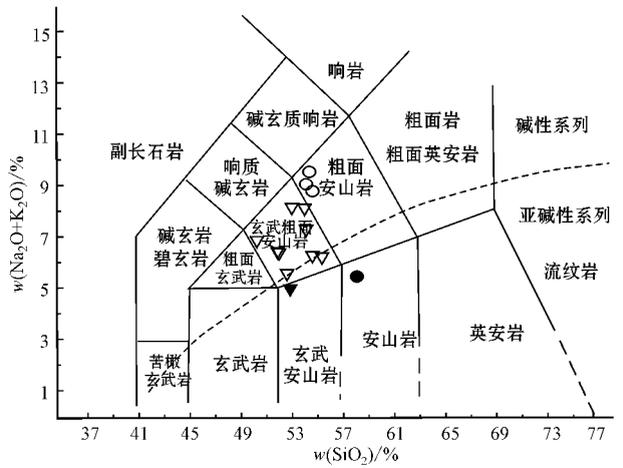


图 10 尼新塔格铁矿区围岩 TAS 图解

Fig. 10 Total alkali silica (TAS) diagram of volcanic rocks from the Nixintage iron deposit

Ti 负异常特征都表明，这些火山岩应形成于大陆型岛弧环境或活动大陆边缘环境 (Pearce, 1979, 1982, 1995；李昌年，1992；邓晋福等，2004)。

笔者尚未获得矿区安山岩形成年龄，但在距尼新塔格矿区约 10 km 的松湖铁矿区东侧(如图 12)安山岩中获得的该套岩石年龄为 343.2 ± 2 Ma (MSWD=1.8)，属早石炭世维宪期。茹艳娇(2012)曾对西天山大哈拉军山组火山岩做过系统的研究，通过统计分析得出西天山大哈拉军山组火山岩形成时代为 369~333 Ma，主体为早石炭世杜内期，早期可

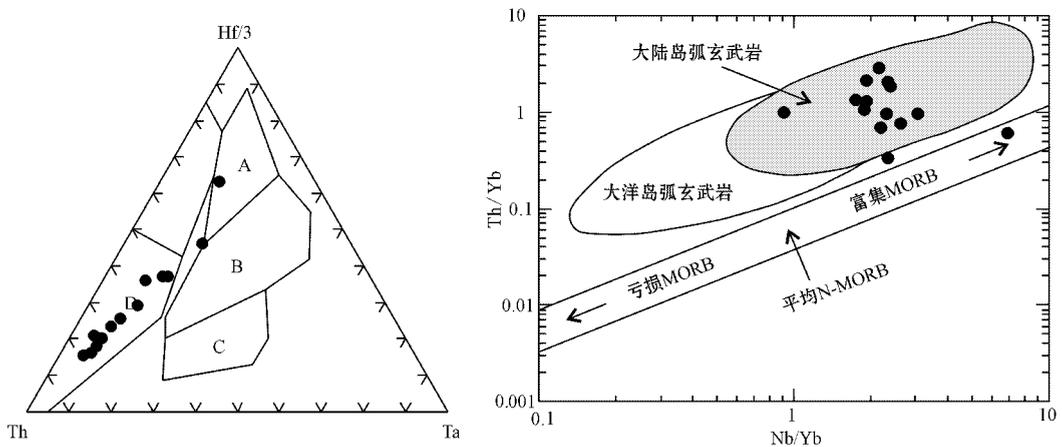


图 11 尼新塔格铁矿区火山岩构造环境判别图

Fig. 11 Discrimination diagrams for tectonic settings of volcanic rocks in the Nixintage iron deposit

A—N型 MORB；B—E型 MORB 和板内拉斑玄武岩；C—碱性板内玄武岩；D—火山弧玄武岩

A—N-type MORB；B—E-type MORB and intracontinental tholeiites；C—intracontinental alkaline basalts；D—volcanic arc basalts

能跨于晚泥盆世晚期,晚期可达早石炭世维宪期。火山作用从伊犁地块南部向伊犁地块内部逐渐变年轻,从伊犁地块西部向东部逐渐变年轻(如图 12)。该年龄无论从地层学及区域地层年代学特征上均可以大致代表本区火山岩的形成时代。综上可以认

为,从早石炭世初期开始,北天山洋向南伊犁地块之下俯冲,研究区所处的伊犁地块北缘即为活动大陆边缘,这期间伴随着大量的岩浆活动并形成了上述大哈拉军山组火山岩及其中赋存的铁矿床。

4.2 成矿物质来源

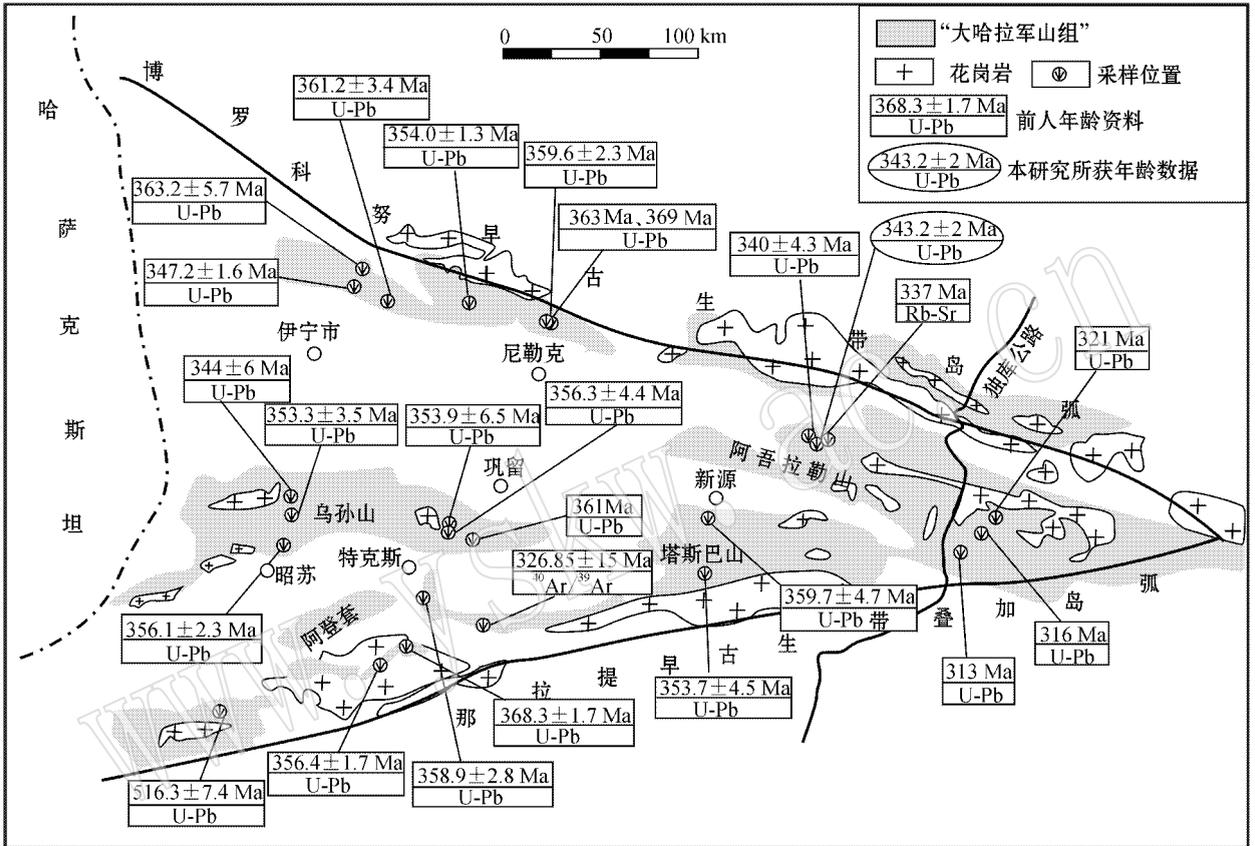


图 12 西天山“大哈拉军山组”火山岩形成年龄分布图(据茹艳娇, 2012 修改)

Fig. 12 Formation age distribution of the volcanic rocks of Dahalajunshan Formation in West Tianshan Mountains (after Ru Yanjiao, 2012)

矿物学、岩石学证据表明,该矿区矿石中磁铁矿为矿浆结晶或火山热液交代围岩的产物。大量的光片、薄片研究发现,矿区内存在一系列玄武粗面安山岩-弱矿化玄武粗面安山岩-矿化玄武粗面安山岩-浸染状矿石,它们具有一种特征:磁铁矿可以任何比例存在于该类岩石的基质中(如图 5),而矿区内其他岩石中没有这种现象。加之相似的稀土、微量元素地球化学特征显示,各类磁铁矿矿石与围岩具有同源性,由此认为,矿浆期磁铁矿的形成与富钠的碱性玄武安山质岩浆关系密切。

目前自然界中还未识别出独立的玄武粗面安山质岩浆源区,玄武粗面安山岩多为富碱的玄武岩

浆或安山质岩浆演化的产物。考虑到本区玄武粗面安山岩的数量远远多于安山岩的数量,所以玄武粗面安山质岩浆不可能由安山质岩浆分异形成。大哈拉军山组第 3 段地层下部层位出露有玄武岩,即在玄武粗面安山质岩浆阶段之前有玄武质岩浆活动。因此,矿区内的玄武粗面安山岩、粗面安山岩及矿石应是由同源的玄武岩岩浆演化而来。矿石与围岩中普遍出现 Nb 和 Ta 的显著亏损,而 Nb、Ta 亏损是湿地幔楔部分熔融的陆缘弧玄武岩的鉴别性特征(McCulloch and Gamblo, 1991),上述特征指示本区围岩及矿石在成因上可能与俯冲板片脱水引起的湿地幔楔部分熔融有密切联系。

矿体作为矿区地质体的一部分,其形成过程即是成岩过程的一部分。李新光等(2010)对尼新塔格铁矿床围岩及矿石中的流体做了氢-氧同位素研究,获得该区矿石及围岩中流体氢同位素(δD_{SMOW})为 $-86.3\text{‰} \sim -68.7\text{‰}$,平均 -77.7‰ ,具原生岩浆水特征,氧同位素($\delta^{18}O_{SMOW}$)为 $-3.39\text{‰} \sim 3.17\text{‰}$,平均 0.42‰ ,显示岩浆水中有其他流体的混合。氢-氧同位素特征显示成矿热液主要来自岩浆演化末期形的富铁火山热液,后期有大气降水等的混合。

综上所述,该矿床中的铁质主要来源于岛弧环境下产生的玄武质岩浆。

4.3 矿床成因

尼新塔格铁矿直接赋矿围岩为一套中基性火山岩、火山碎屑岩,铁矿体与围岩多为整合或渐变过渡关系,表明矿体是作为火山岩地层的一部分,为同一火山活动的产物。

国内外大量实验和矿床实例研究分析表明,矿浆成因的磁铁矿具有典型的树枝状或板条状结构(dendritic or platy textural)以及流动状构造等,其中自形板条状磁铁矿多见于块状构造矿石中,而半自形-他形细粒状磁铁矿多见于流动状构造中(Frietsch, 1978; Nyström, 1984; Lyons, 1988; Nyström and Henriquez, 1994; Naslund *et al.*, 2002; Clark and Kontak, 2004; Chen *et al.*, 2010)。本矿区内尚未发现典型的板条状或树枝状结构磁铁矿,但是在浸染状矿石中常见有半自形-他形的微细粒磁铁矿与微晶斜长石等呈定向、半定向排列显示流动状构造,部分条带状矿石中见有气孔发育的磁铁矿层,并且气孔被拉长定向而显示流动构造,这一特征说明,这些矿石明显具有火山矿浆成因特征(宋学信等, 1981)。在角砾状矿石及火山碎屑岩中出现的磁铁矿浆屑以及富气孔的磁铁矿角砾(可能是火山弹)则是由矿浆快速喷出,在空中快速冷凝的产物。这些特征都无疑证明,尼新塔格铁矿床形成过程中存在铁矿浆的喷发成矿过程。

角砾状矿石及条带状矿石中磁铁矿多为粗粒、自形-半自形,呈网脉状、团块状交代岩石,与绿泥石-绿帘石-阳起石-方解石等矿物伴生,显示后期有热液成矿作用的叠加。而氢氧同位素显示,成矿热液主要来自岩浆演化末期形成的火山热液。由此可见,矿床的形成与火山作用密不可分。

矿石与围岩的稀土、微量元素特征指示它们是由同源岩浆演化而来。岩石学与岩相学研究表明,

尼新塔格铁矿床的成矿母岩浆为玄武质岩浆分异演化产生的富钠的碱性玄武安山质岩浆。富碱(尤其是富钠)的中基性火山岩有利于火山岩型铁矿的形成(徐志刚, 1986; Nyström *et al.*, 1994; 余金杰等, 2002)。对矿区岩石地球化学研究发现,该区安山岩及玄武安山岩具有典型的富碱特征,尤其富钠,说明成矿母岩浆富碱、富钠,具有良好的成矿条件。

如前所述,新塔格铁矿所处的伊犁地块东北缘,属石炭纪岛弧带。强烈的碰撞造山过程中,幔源岩浆上涌,经历漫长的运移及多次喷发,玄武质岩浆发生分异演化,残余岩浆基性程度逐渐降低,铁质发生富集。岩浆中富碱时, Na^+ 与 K^+ 与硅酸盐络阴离子结合,而铁质则优先与 O^{2-} 结合形成氧化物多面体液相,在有利的动力和物理化学条件下,岩浆中铁质与硅酸盐熔体熔离,聚集形成铁矿浆(张光耀, 1985)。矿浆经喷出作用,形成了矿区内第一期磁铁矿。该期磁铁矿呈半自形-他形的细粒结构,形成的矿石构造类型主要为浸染状和块状矿石,此外有少量矿浆快速喷出,在空中边下落地冷凝,形成磁铁矿浆屑以及气孔发育的磁铁矿角砾。火山作用末期,岩浆活动减弱,而由浆演化末期形成的富铁火山热液对之前形成的岩石、矿石进行交代作用,铁质析出,形成热液期粗粒磁铁矿。由于火山碎屑岩中空隙发育,为成矿热液的运移和铁质的析出成矿提供了良好的条件,故该期矿石类型以角砾状矿石和条带状矿石为主,少量块状矿石。

基于以上特征,认为该矿床在成因类型上应属于岩浆-热液复合成因的火山岩型磁铁矿矿床。

5 结论

(1) 尼新塔格铁矿床的赋存于大哈拉军山组第3段(C_1d^3)的安山质凝灰岩、玄武粗面安山岩、粗面安山岩中,磁铁矿矿石与熔岩围岩具有相似的稀土元素、微量元素地球化学特征,表明它们由同源岩浆演化而来。

(2) 铁矿的形成经历了矿浆期和火山热液期两个阶段,分别形成了矿区内的浸染状、块状矿石和角砾状、条带状矿石,火山热液对早期矿石进行了叠加改造。

(3) 矿浆期磁铁矿成矿母岩浆为富钠的碱性玄武安山质岩浆,氢氧同位素显示晚期热液成矿阶段成矿热液主要来自岩浆演化形成的火山热液,矿床

中的铁质主要来源于岛弧环境下产生的玄武质岩浆。

(4) 综合矿床地质及地球化学特征,认为尼新塔格铁矿床为火山岩型岩浆-热液复合成因磁铁矿矿床。

致谢 野外工作得到了新疆地矿局第九地质大队工作人员的大力支持和帮助,在光、薄片研究过程中,长安大学于凤池老师和白开寅老师给予了很大的帮助,样品测试工作由长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室王柱命老师及何克老师完成,在此一并感谢!

References

- Chen H, Clark A H and Kyser T K. 2010. The Marcona magnetite deposit, Ica, south-central Peru: a product of hydrous, iron oxide-rich melts? [J]. *Economic Geology*, 105: 1441~1456.
- Chen Yuchuan, Liu Dequan, Tang Yanling, *et al.* 2008. Mineral Resources and Metallogenic System of Tianshan Mountains in China [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Clark A H and Kontak D J. 2004. Fe-Ti-P oxide melts generated through magma mixing in the Antauta subvolcanic center, Peru: Implications for the origin of nelsonite and iron oxide-dominated hydrothermal deposits [J]. *Economic Geology*, 99: 377~395.
- Deng Jinfu, Luo Zhaohua, Su Shangguo, *et al.* 2004. Petrogenesis, Structural Settings and Mineralizations [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Dong Lianhui, Feng Jing, Zhuang Daoze, *et al.* 2011. Discussion of metallogenic models, mineralization characteristic and main type of rich iron ore of Xinjiang [J]. *Xinjiang Geology*, 29(4): 416~422 (in Chinese with English abstract).
- Feng Jinxing, Shi Fupin, Wang Bangyao, *et al.* 2010. The Volcanic Iron Deposits in Awulale Metallogenic Belt, Western Tianshan [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Frietsch R. 1978. On the magmatic origin of the iron ores of the Kiruna type [J]. *Economic Geology*, 73: 478~485.
- Gao J, Long L L, Klemd R, *et al.* 2009. Tectonic evolution of the South Tianshan orogen and adjacent regions NW China: geochemical and age constraints of granitoid rocks [J]. *International Journal of Earth Science*, 98(06): 1221~1238.
- Gao Jun, Qian Qing, Long Lingli, *et al.* 2009. Accretionary orogenic process of Western Tianshan, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1804~1816 (in Chinese with English abstract).
- Gu Lianxing, Hu Shouxi, Yu Chunshui, *et al.* 2000. Carboniferous volcanites in the Bogda orogenic belt of Eastern Tianshan: their tectonic implication [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3): 305~316 (in Chinese with English abstract).
- Hong Wei, Zhang Zuoheng, Zhao Jun, *et al.* 2012a. Mineralogy of the Chagangnuoer iron deposit in Western Tianshan Mountains, Xinjiang, and its geological significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(2): 191~211 (in Chinese with English abstract).
- Huang Jiqing, Ren Jishun, Jiang Chunfa, *et al.* 1980. The Tectonic and its Evolution in China [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Jiang Changyi, Wu Wenkui, Xie Guangcheng, *et al.* 1993. Characteristics of Carboniferous volcanic rocks and the trench-arc basin system in the northern part of West Tianshan Mountains [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 12(3): 224~231 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Changyi, Wu Wenkui, Zhang Xueren, *et al.* 1995. The change from island arc to rift valley: Evidence from volcanic rocks in Awulale Area [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 14(4): 289~300 (in Chinese with English abstract).
- Jing Delong, Ren Yi, Wang Bangyao, *et al.* 2012. Geological characteristics and metallogenic periods of Songhu iron deposit in Xinjiang [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 7(4): 10~15 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Zongsheng, Zhang Zuoheng, Wang Zhihua, *et al.* 2012. Alteration mineralogy, mineral chemistry and genesis of Zhibo iron deposit in western Tianshan Mountains, Xinjiang [J]. *Mineral Deposits*, 31(5): 1051~1066 (in Chinese with English abstract).
- Li Changnian. 1992. Trace Elements Geochemistry and Petrology of the Igneous Rocks [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese).
- Li Jilei, Qian Qing, Gao Jun, *et al.* 2010. 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*, 26(10): 2913~2924 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenyuan, Niu Yaoling, Zhang Zhaowei, *et al.* 2012. Geodynamic setting and further exploration of magmatism-related mineralization concentrated in the Late Paleozoic in the northern Xinjiang Autonomous Region [J]. *Earth Science Frontiers*, 19(4): 41~50 (in Chinese with English abstract).
- Li Xinguang, Cheng Suixin, Wang Zhaohui, *et al.* 2010. Discussion on the geological characters and genesis of the Akesayi iron deposit,

- Xinyuan, Xinjiang [J]. *Fortune World*, 14 : 203 ~ 204 (in Chinese).
- Li Yongjun, Li Zhucang, Zhou Jibing, *et al.* 2009. Division of the Carboniferous lithostratigraphic units in Awulale area, western Tianshan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1 332 ~ 1 340 (in Chinese with English abstract).
- Long Lingli, Gao Jun, Qian Qing, *et al.* 2008. Geochemical characteristics and tectonic settings of Carboniferous volcanic rocks from Yili region, western Tianshan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 699 ~ 710 (in Chinese with English abstract).
- Lu Zongliu and Mo Jiangping. 2006. Geological characters and ore genesis of Awulale iron-rich deposit in Xinjiang [J]. *Geology and Prospecting*, 42(5): 8 ~ 11 (in Chinese with English abstract).
- Lyons J I. 1988. Volcanogenic iron oxide deposits, Cerro de Mercado and vicinity, Durango, Mexico [J]. *Economic Geology*, 83 : 1 886 ~ 1 906.
- Mao Jingwen, Hu Ruizhong, Chen Yuchuan, *et al.* 2006. Large Scale Mineralization and Ore Accumulating District [M]. Beijing : Geological Publishing House (in Chinese).
- McCulloch M T and Gamble J A. 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 102 : 358 ~ 374.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the earth [J]. *Chemical Geology*, 120 : 223 ~ 253.
- Mo Jiangping, Huang Mingyang, Qin Longfang, *et al.* 1997. The origin of Kaiputai iron-copper deposit in Yuxu, Xinjiang, China [J]. *Geology and Prospecting*, 33(04): 7 ~ 12 (in Chinese with English abstract).
- Naslund H R, Henriquez F, Nyström J O, *et al.* 2002. Magmatic iron ores and associated mineralization : Examples from the Chilean High Andes and Coastal Cordillera [A]. Porter T M. *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits : A Global Perspective : Adelaide, South Australia* [C]. PGC Publishing, Porter Geoconsultancy Pty. Ltd. , 2 : 207 ~ 228.
- Niu Hecai, Luo Yong, Li Ningbo, *et al.* 2012. Study on the Cu-mineralization of the Chaganuoer Fe-deposit in the Awulale area, Xinjiang [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 48 (3): 256 ~ 265 (in Chinese with English abstract).
- Nyström H R. 1984. Supersaturation and crystal growth in the roof-zone of the Skaergaard magma chamber [J]. *Contrib Mineral Petrol.*, 86 : 89 ~ 93.
- Nyström J O and Henriquez F. 1994. Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden : Ore textures and magnetite geochemistry [J]. *Economic Geology*, 89 : 820 ~ 839.
- Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [A]. Thorpe R S. *Orogenic Andesites and Related Rocks* [C]. Chichester : John Wiley and Sons, 525 ~ 548.
- Pearce J A and Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69(1): 33 ~ 47.
- Pearce J A and Peate D W. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magma [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23 : 251 ~ 285.
- Qian Qing, Gao Jun, Xiong Xianming, *et al.* 2006. Petrogenesis and tectonic settings of Carboniferous volcanic rocks from north Zhao-su, western Tianshan Mountains : constraints from petrology and geochemistry [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1 307 ~ 1 323 (in Chinese with English abstract).
- Ru Yanjiao. 2012. The stratigraphic sequence, petrogenesis and tectonic setting of the volcanic rocks of the Dahalajunshan Formation, Western Tianshan Mountain, China [D]. Chang'an University (in Chinese with English abstract).
- Shan Qiang, Zhang Bing, Luo Yong, *et al.* 2009. Characteristics and trace element geochemistry of pyrite from the Songhu iron deposit, Nilek County, Xinjiang, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (6): 1 456 ~ 1 464 (in Chinese with English abstract).
- Song Xuexin, Chen Yuchuan, Sheng Jifu, *et al.* 1981. On iron deposits formed volcanic-hypabyssal ore magma [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1 : 41 ~ 54 (in Chinese with English abstract).
- Wang Bangyao, Hu Xiujun, Wang Jiangtao, *et al.* 2011a. Geological characteristics and genesis of Chagannur iron deposit in Western Tianshan, Xinjiang [J]. *Mineral Deposits*, 30(3): 385 ~ 402 (in Chinese with English abstract).
- Wang Bangyao and Jiang Changyi. 2011b. Petrogenesis and geochemical characteristics of Carboniferous volcanic rocks of Chagannur iron deposit area in western Tianshan, Xinjiang [J]. *Geological Science and Technology Information*, 30(6): 18 ~ 27 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chunlong, Wang Yitian, Dong Lianhui, *et al.* 2012. Geochemical characteristics of rare earth and trace elements compositions of Songhu iron deposit in western Tianshan of Xinjiang and their significance [J]. *Mineral Deposits*, 31(5): 1 038 ~ 1 050 (in Chinese with English abstract).
- Wang Junnian, Bai Xinlan, Li Yanlong, *et al.* 2009. Geological Characteristics of Songhu Iron Deposit in Nilka County, Xinjiang [J]. *Resources Environment & Engineering*, 23(2): 104 ~ 107 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Xiaolin, Zhao Zhenhua, Bai Zhenghua, *et al.* 2001. Origin of

- Awulale adakitic sodlium-rich rocks in western Tianshan: Constraints for Nd and Sr isotopic compositions [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 514~522 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhigang. 1986. Ore-forming background and characteristics of magmas of the Mesozoic volcanic iron deposits in east China [J]. *Mineral Deposits*, 5(1): 13~25 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jinjie and Mao Jingwen. 2002. Geology and ore-forming environment of Kiruna-type iron deposits [J]. *Mineral Deposits*, 21: 83~86 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guangyao. 1985. Discussion on the principle of alkalis metasomatism in the main endogenic iron deposits of China [J]. *Geochemica*, (1): 58~66 (in Chinese).
- Zhang Zuoheng, Hong Wei, Jiang Zongsheng, et al. 2012. Geological features, mineralization types and metallogenic setting of Late Palaeozoic iron deposits in western Tianshan Mountains of Xinjiang [J]. *Mineral Deposits*, 31(5): 941~964 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiming. 2013. Magnetite types and geological characteristics of iron-rich ore deposit in China [J]. *Mineral Deposits*, 32(4): 685~704 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongfeng, Guo Xuan, Song Biao, et al. 2009. Petrology, Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry and zircon chronology of the Late Palaeozoic volcanic rocks in the southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China [J]. *Journal of the Geological Society*, 166: 1085~1099.
- Zhu Yongfeng, Zhou Jing and Guo Xuan. 2006. Petrology and Sr-Nd isotopic geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in the western Tianshan Mountains, NW China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1341~1350 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Zhixin, Dong Lianhui, Wang Kezhao, et al. 2013. Tectonic division and regional tectonic evolution of West Tianshan orogenic belt [J]. *Geological Bulletin of China*, 32(2~3): 297~306 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Guochao, Zhang Zuoheng, Wang Zhiliang, et al. 2008. Tectonic division, stratigraphical system and the evolution of Western Tianshan Mountains, Xinjiang [J]. *Geological Review*, 54(6): 731~750 (in Chinese with English abstract).
- 董连慧,冯京,庄道泽,等. 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.
- 冯金星,石福品,汪帮耀,等. 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.
- 高俊,钱青,龙灵利,等. 2009. 西天山的增生造山过程 [J]. *地质通报*, 28(12): 1804~1816.
- 顾连兴,胡受奚,于春水,等. 2000. 东天山博格达造山带石炭纪火山岩及其形成地质环境 [J]. *岩石学报*, 16(3): 305~316.
- 洪为,张作衡,赵军,等. 2012. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床矿床学特征及其地质意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 31(2): 191~211.
- 黄汲清,任纪舜,姜春发,等. 1980. 中国大地构造及其演化 [M]. 北京:科学出版社.
- 姜常义,吴文奎,谢广成,等. 1993. 西天山北部石炭纪火山岩特征与沟弧盆体系 [J]. *岩石矿物学杂志*, 12(3): 224~231.
- 姜常义,吴文奎,张学仁,等. 1995. 从岛弧向裂谷的变迁——来自阿吾拉勒地区火山岩的证据 [J]. *岩石矿物学杂志*, 14(4): 289~300.
- 蒋宗胜,张作衡,王志华,等. 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.
- 荆德龙,任毅,汪帮耀,等. 2012. 新疆松湖铁矿地质特征与成矿期次划分 [J]. *亚热带资源与环境*, 7(4): 10~15.
- 李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学 [M]. 武汉:中国地质大学出版社.
- 李凤鸣,彭湘萍,石福品,等. 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,钱青,高俊,等. 2010. 西天山昭苏东南部阿登套地区大哈拉军山组火山岩及花岗岩侵入体的地球化学特征、时代和构造环境 [J]. *岩石学报*, 26(10): 2913~2924.
- 李文渊,牛耀岭,张照伟,等. 2012. 新疆北部晚古生代大规模岩浆成矿的地球动力学背景和战略找矿远景 [J]. *地学前缘*, 19(4): 41~50.
- 李新光,程遂欣,王昭晖,等. 2010. 新疆新源县阿克萨依铁矿床地质特征及成因初探 [J]. *中国科技财富*, 14: 203~204.
- 李永军,李注仓,周继兵,等. 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.
- 龙灵利,高俊,钱青,等. 2008. 西天山伊犁地区石炭纪火山岩地球化学特征及构造环境 [J]. *岩石学报*, 24(4): 699~710.
- 卢宗柳,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.
- 毛景文,胡瑞忠,陈毓川,等. 2006. 大规模成矿作用与大型矿集区 [M]. 北京:地质出版社.
- 莫江平,黄明扬,覃龙芳,等. 1997. 新疆须开普台铁铜矿床成因

附中文参考文献

- 陈毓川,刘德权,唐延龄,等. 2008. 中国天山矿产及成矿体系 [M]. 北京:地质出版社.
- 邓晋福,罗照华,苏尚国,等. 2004. 岩石成因、构造环境与成矿作用 [M]. 北京:地质出版社.

- 探讨[J]. 地质与勘探, 33(4):7~12.
- 牛贺才, 罗 勇, 李宁波, 等. 2012. 新疆阿吾拉勒地区查岗诺尔铁矿床铜矿化的成因探讨[J]. 南京大学学报(自然科学版), 48(3):256~265.
- 钱 青, 高 俊, 熊贤明, 等. 2006. 西天山昭苏北部石炭纪火山岩的岩石地球化学特征、成因及形成环境[J]. 岩石学报, 22(5):1307~1323.
- 茹艳娇. 2012. 西天山大哈拉军山组火山岩地层序列、岩石成因与构造环境[D]. 长安大学.
- 单 强, 张 兵, 罗 勇, 等. 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.
- 宋学信, 陈毓川, 盛继福, 等. 1981. 论火山-浅成矿浆铁矿床[J]. 地质学报, 1:41~54.
- 汪帮耀, 胡秀军, 王江涛, 等. 2011a. 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.
- 汪帮耀, 姜常义. 2011b. 西天山查岗诺尔铁矿区石炭纪火山岩地球化学特征及岩石成因[J]. 地质科技情报, 30(6):18~27.
- 王春龙, 王义天, 董连慧, 等. 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.
- 王军年, 白新兰, 李岩龙, 等. 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.
- 熊小林, 赵振华, 白正华, 等. 2001. 西天山阿吾拉勒埃达克质岩石成因 Nd 和 Sr 同位素组成的限制[J]. 岩石学报, 17(4):514~522.
- 徐志刚. 1986. 中国东部中生代陆相火山岩型铁矿成矿背景和火山岩浆性质[J]. 矿床地质, 5(1):13~25.
- 余金杰, 毛景文. 2002. Kiruna 型铁矿床基本地质特征和成矿环境[J]. 矿床地质, 21:83~86.
- 张光耀. 1985. 我国主要内生铁矿交代机理探讨[J]. 地球化学, (1):58~66.
- 张作衡, 洪 为, 蒋宗胜, 等. 2012. 新疆西天山晚古生代铁矿床的地质特征、矿化类型及形成环境[J]. 矿床地质, 31(5):941~964.
- 朱永峰, 周 晶, 郭 璇. 2006. 西天山石炭纪火山岩岩石学及 Sr-Nd 同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 22(5):1341~1350.
- 朱志新, 董连慧, 王克卓, 等. 2013. 西天山造山带构造单元划分与构造演化[J]. 地质通报, 33(2~3):297~306.
- 左国朝, 张作衡, 王志良, 等. 2008. 新疆西天山地区构造单元划分、地层系统及其构造演化[J]. 地质论评, 54(6):731~750.