

张振亮, 冯选洁, 高永伟, 等. 新疆西天山晚古生代主要磁铁矿床(点)成因类型与成矿过程探讨[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 737-758.
Zhang Zhenliang, Feng Xuanjie, Gao Yongwei, et al. A tentative discussion on the genetic type and ore-forming process of main late Paleozoic magnetite deposits in West Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. Geology in China, 2015, 42(3): 737-758(in Chinese with English abstract).

新疆西天山晚古生代主要磁铁矿床(点)成因类型 与成矿过程探讨

张振亮^{1,2} 冯选洁¹ 高永伟¹ 王志华^{1,2} 董福辰¹ 谭文娟¹

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 新疆西天山晚古生代磁铁矿带是中国重要的铁矿带, 其成矿地质背景与成因类型一直以来存在很大的争论。本文在已有研究成果的基础上, 结合大量野外调查资料和室内研究工作, 对西天山主要磁铁矿床的成因类型、成矿背景、成矿规律进行了详细研究。研究表明, 主要磁铁矿床矿石矿物 Sr、Nd、Pb 同位素基本落入洋陆俯冲碰撞下的岛弧环境; 矿石形成年龄介于火山岩与中酸性侵入岩之间, 接近于火山岩年龄, 矿石与火山岩具有密切的成因联系。矿床总体归为海相火山岩型铁矿, 可划分出 3 个亚类: 火山喷溢型、火山-次火山热液型、火山喷溢-热液叠加型, 不同亚类矿床具有不同的矿体、矿石特征。铁矿石的形成与俯冲带流体的交代作用有着密切的关系, 早期为富铁岩浆交代后分异结晶作用的产物, 后期则为火山热液沿断裂、裂隙交代、卸载的产物。

关键词: 西天山; 晚古生代; 磁铁矿床; 成因类型; 成矿过程

中图分类号: P618.31 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)03-0737-22

A tentative discussion on the genetic type and ore-forming process of main late Paleozoic magnetite deposits in West Tianshan Mountains, Xinjiang

ZHANG Zhen-liang^{1,2}, FENG Xuan-jie¹, GAO Yong-wei¹,
WANG Zhi-hua^{1,2}, DONG Fu-chen¹, TAN Wen-juan¹

(1. Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MLR, Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The late Paleozoic magnetite ore belt is an important iron metallogenic belt in West Tianshan Mountains, Xinjiang. For a long time, there has been controversy concerning the metallogenic setting and genetic type. Based on previous researches in combination with lots of field investigations and indoor studies conducted by the authors in the past three years, this paper deals tentatively with the geological characteristics, distribution patterns and metallogenic types of iron deposits in West Tianshan Mountains, Xinjiang. The Sr-Nd-Pb isotopic compositions of ore minerals show that the metallogenic setting was the island arc

收稿日期: 2015-02-05; 改回日期: 2015-03-19

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项课题(201211073-02)与中国地质调查局地质矿产调查评价项目(12120113042900)联合资助。

作者简介: 张振亮, 男, 1974 年生, 高级工程师, 研究方向为矿床地球化学; E-mail: liangzhen_74@163.com。

under the subduction-collision of ocean and land. The metallogenic age of iron ores was younger than that of volcanic rocks but older than that of intermediate-acid intrusive rocks in the same ore district. The iron material might have come from the volcanic rocks, where their partition models were very similar in trace elements and REE. These iron deposits all belong to marine volcanic type, which can be further divided into three subtypes: volcanic effusion type, volcanic-subvolcanic hydrothermal type, superimposition type of volcanic effusion and volcanic hydrothermal solution. The geological features of different subtype deposits are not different. The iron ores were related to the metasomatism of fluid along the zone of subduction. Early iron ores were probably derived from the fractional crystallization of Fe-rich magma after replacement, and the late ores might have resulted from the metasomatism and precipitation of volcanic hydrothermal solution along faults and fractures.

Key words: West Tianshan Mountains; Late Paleozoic; magnetite deposit; genetic type; metallogenic process

About the first author: ZHANG Zhen-liang, male, born in 1974, senior engineer, engages in research on ore deposit geochemistry; E-mail: liangzhen_74@163.com.

西天山成矿带是新疆重要的大型铁矿开发基地,也是中国十大重要金属矿产资源接替基地之一,迄今为止已相继发现了查岗诺尔、备战、智博、敦德、松湖、阔拉萨依、雾岭、尼新塔格-阿克萨依、塔尔塔格等数个晚古生代磁铁矿床,累计探获铁矿石资源量超过1700 Mt,引起了国内外地学工作者的广泛注意。

前人对区域大哈拉军山组火山岩、典型磁铁矿床做了大量的工作,提出了多个不同的认识,如矿床成因类型,先后提出过海相火山岩型^[1-5]、火山沉积型^[6]、矽卡岩型^[7-12]观点;成矿构造背景方面则先后出现了大陆裂谷-地幔柱说^[13-17]、活动大陆边缘和岛弧说^[18-26]、大陆减薄拉张说^[27]等认识。但整体来看,这些磁铁矿床(点)研究还较为滞后,特别是近年来新发现的铁矿床,研究程度普遍很低(仅有个别矿床研究较为深入),对矿床特征还缺乏系统、精细的研究,区域铁矿床的综合性研究也较为缺乏,导致其成矿环境和成矿规律认识不清,成矿机理、成矿过程还相当模糊。

因此,本文在已有研究成果的基础上,结合课题组的大量野外调查资料和室内研究工作,尝试通过西天山主要磁铁矿床的成因类型、成矿背景、成矿规律研究,探讨西天山晚古生代主要磁铁矿床(点)的成矿过程,为进一步找矿提供思路。

1 区域地质背景

西天山位于新疆天山西段北部,处于中亚增生型造山带的西南缘,总体上呈向北和向南逆掩推覆的扇状三角形。大地构造位置为哈萨克斯坦-伊犁板块与准噶尔板块、塔里木板块之结合部位(图

1)。该地区经历了复杂的构造演化过程,包括古-中元古代泛大陆的增生与裂解、新元古代Rodinia超大陆的形成与裂解^[28-30],并在地块结合部位广泛出露古元古代或中元古代变质结晶基底^[24,31-32];早古生代进入多陆块、多岛洋演化阶段^[28,33],先后发生过向南、向北2次碰撞增生活动^[34];早石炭世末结束增生造山^[33,35],进入后碰撞演化阶段。

区域内地层分布较为广泛,从前寒武系到第四系均有出露。前寒武系(主要为古元古界温泉群、蓟县系等)分布于赛里木湖周缘(构造上隶属赛里木地块)、塔里木地块与伊犁微地块的结合部位(构造上隶属中天山地体),岩性主要为深变质岩系(二云斜长片麻岩、斜长角闪片岩、二云母片岩、角闪岩、大理岩和石英岩等)-浅海相碳酸盐岩(大理岩化灰岩、白云质硅质灰岩、灰岩、板岩等)^[36]。下古生界(寒武系、奥陶系、志留系)分布范围较前寒武系有所扩大,主要分布于博罗科努山南缘、塔里木地块与伊犁微地块的结合部位,岩性由深海相灰岩、磷块岩、泥岩逐渐转变为半深海-浅海相碳酸盐岩、砂岩、泥岩,顶部夹中基性火山岩(熔岩+火山碎屑岩)^[37];上古生界(泥盆系、石炭系、二叠系)分布最为广泛,在区域各大山系中广泛出露,岩性由浅海相碳酸盐岩+碎屑岩+中基性火山岩转变为二叠系陆相双峰式火山岩(基性+酸性)^[38];中生界则分布于各大山前盆地中,其中侏罗系为陆相碎屑含煤建造,是西天山主要的含煤地层;新生界为冲坡积砾石和砂土。

区内侵入岩较为发育,从岩基、岩株到岩墙均有出露,呈近EW向、NW-SE向带状分布,以中酸性岩体最为发育,侵入时代为加里东晚期和海西期。加里东晚期侵入岩以岩株状基性-超基性岩、中酸

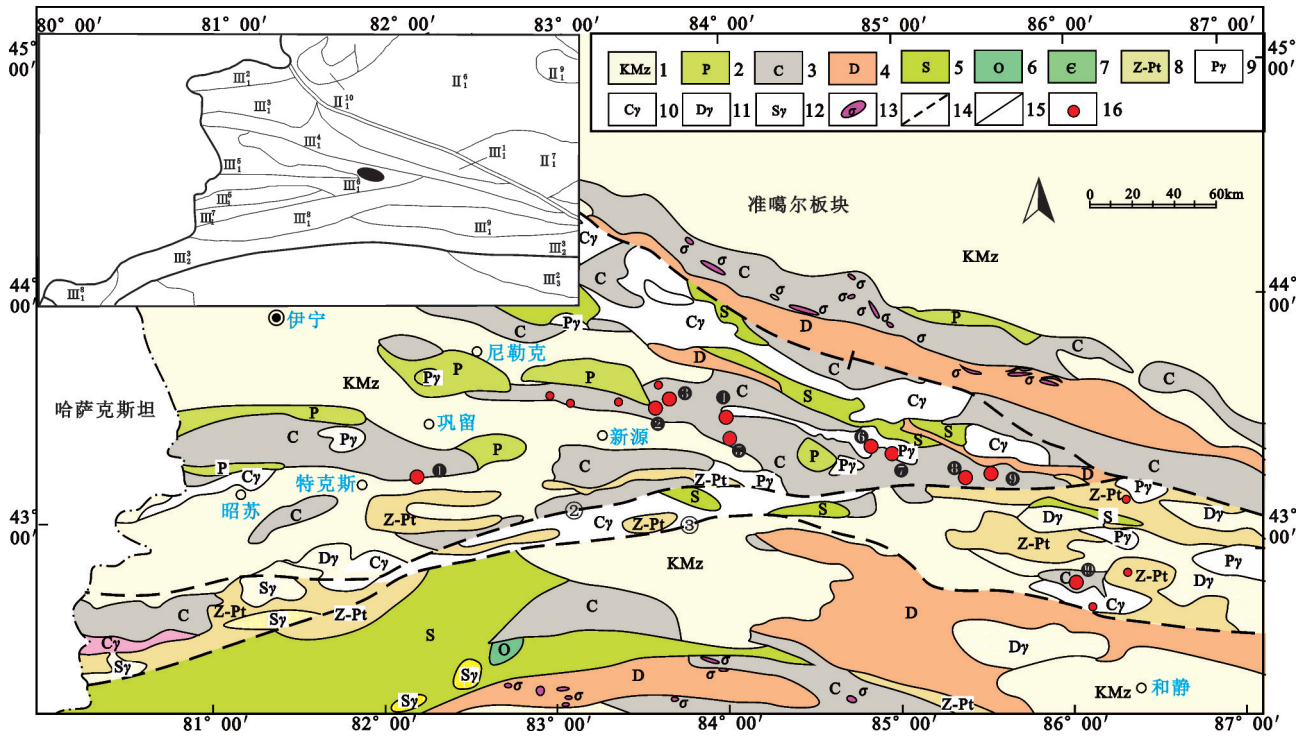


图1 西天山地区主要铁矿及大地构造图(据文献[45])

Ⅲ—塔里木板块; Ⅲ₁—伊犁微板块; Ⅲ₁¹—依连哈比尔尕晚古生代沟弧带; Ⅲ₁²—阿拉套陆源盆地; Ⅲ₁³—博乐中间地块; Ⅲ₁⁴—博罗科努早古生代岛弧—弧后带; Ⅲ₁⁵—伊犁中间板块; Ⅲ₁⁶—阿吾阿勒—伊什基里克晚古生代裂谷带; Ⅲ₁⁷—那拉提早古生代岛弧带; Ⅲ₁⁸—哈尔克—巴仑台早古生代沟弧带; Ⅲ₁⁹—萨阿尔明—库米什古生代沟弧带; Ⅲ₂³—南天山晚古生代陆源盆地;

1—中—新生界; 2—二叠系; 3—石炭系; 4—泥盆系; 5—志留系; 6—奥陶系; 7—寒武系; 8—前寒武系; 9—二叠纪花岗岩; 10—石炭纪花岗岩; 11—泥盆纪花岗岩; 12—志留纪花岗岩; 13—镁铁质—超镁铁质岩; 14—主要断裂; 15—地质界线; 16—铁矿;

矿床(点)名称: ①—阔拉萨依铁矿; ②—式可布台铁矿; ③—松湖铁矿; ④—尼新塔格—阿克萨依铁矿; ⑤—塔尔塔格铁矿; ⑥—查岗诺尔铁矿; ⑦—智博铁矿; ⑧—敦德铁矿; ⑨—备战铁矿; ⑩—莫托萨拉铁锰矿

Fig. 1 Geological map showing regional geology and distribution of iron deposits in West Tianshan Mountains (modified after reference [45])

Ⅲ—Tarim plate; Ⅲ₁—Yili microplate; Ⅲ₁¹—Yilianhabierga late Paleozoic trench arc belt; Ⅲ₁²—Alatao terrigenous basin; Ⅲ₁³—Bole median mass; Ⅲ₁⁴—Boluokenu lower Paleozoic island arc-back arc belt; Ⅲ₁⁵—Yili median mass; Ⅲ₁⁶—Awulale—Yishijilike late Paleozoic rift zone; Ⅲ₁⁷—Nalati lower island arc belt; Ⅲ₁⁸—Haerke—Baluntai lower trench arc belt; Ⅲ₁⁹—Saaerming—Kumishi Paleozoic trench arc belt; Ⅲ₂³—Southern Tianshan late Paleozoic terrigenous basin;

1—Mesozoic-Cenozoic; 2—Permian; 3—Carboniferous; 4—Devonian; 5—Silurian; 6—Ordovician; 7—Cambrian; 8—Precambrian; 9—Permian; 10—Carboniferous; 11—Devonian; 12—Silurian; 13—Mafic-ultramafic rock; 14—Main fault; 15—Geological boundary; 16—Iron ore deposit;

Name of ore deposit or ore spot: ①—Kuolasayi iron ore deposit; ②—Shikebutai iron ore deposit; ③—Songhu iron ore deposit; ④—Nixintage-Akesayi iron ore deposit; ⑤—Taertage iron ore deposit; ⑥—Chagangnuoer iron ore deposit; ⑦—Zhibo iron ore deposit; ⑧—Dunde iron ore deposit; ⑨—Beizhan iron ore deposit; ⑩—Motuoshala Fe—Mn ore deposit

性岩为主, 分布在昭苏、特克斯县、温泉县南部, 基性—超基性岩以辉长岩、辉绿岩、橄辉岩为主, 成岩年龄 434 Ma^[39]; 酸性岩以花岗闪长岩、花岗岩、闪长岩为主, 成岩年龄为 436 Ma^[40-41]。海西早期侵入岩以岩株状花岗岩为主, 岩性主要为二长花岗岩、钾长花岗岩、闪长岩等, 分布在博罗科努西段主脊(东西向展布)、那拉提山主脊和巴仑台一带; 海西中晚期侵入岩以岩株、岩脉、岩墙状广泛分布于博罗科

努山、阿吾拉勒山、依连哈比尔尕山和那拉提山一带, 岩性较为复杂, 以二长花岗岩、钾长花岗岩、辉绿岩和蛇绿混杂岩为主。

区域上火山活动较频繁, 喷发时代主要为海西期(泥盆纪、石炭纪、二叠纪), 少量为加里东晚期(志留纪), 火山活动呈近东西向带状分布。志留纪火山岩主要分布在博罗科努山一带和哈尔克山—那拉提一带, 前者主要为流纹质凝灰岩—角闪英安斑

岩、安山质细火山角砾岩—含角砾沉凝灰岩、英安质晶屑凝灰岩3个韵律组合;后者主要为流纹质斑岩、石英斑岩透视镜体等^[37,40]。泥盆纪火山岩主要分布于博罗科努山和哈尔克山一带,前者主要为钠长石化玄武岩,属海底裂隙喷发^[42],后者主要为玄武岩—安山岩—流纹岩组合。石炭系火山岩最为广泛,广泛分布于博罗科努山、阿吾拉勒山、乌孙山、那拉提山、依连哈比尔尕山和伊犁盆地^[43-44],早石炭世火山岩以中性岩类为主,基性、酸性岩类较少,为海相裂隙—中心喷发;晚石炭世火山岩主要为玄武岩—安山岩—英安岩组合,为浅海相裂隙式喷发。二叠纪火山岩主要分布于阿吾拉勒、那拉提山、乌孙山和伊犁盆地等地,早二叠世火山岩为酸性熔岩、英安岩夹安山岩等,为陆相喷发;晚二叠世火山岩底部为凝灰岩、下部为流纹岩、中部拉斑玄武岩、上部为安山质沉凝灰岩、安山质集块岩等,属陆相中心式喷发。

区内主要的断裂构造有尼勒克断裂、那拉提断裂、伊什基里克断裂、博罗科努断裂等,并发育了大量的褶皱和断层^[35]。另外,长期的火山作用形成了多个复杂的火山环形构造,控制了晚古生代火山作用和海相火山岩型铁矿的形成。

2 区域磁铁矿床(点)特征及类型

2.1 区域磁铁矿床特征

天山成矿带是中亚成矿域的重要组成部分^[46-47],蕴藏的矿产资源丰富,具有地质条件多样、矿化类型多、矿种较齐全、产地多、成矿时代多、成矿带分布广的鲜明特征^[45]。其中铁矿为其特色矿种之一,以资源丰富、矿床类型多而闻名^[48-49]。按主要矿石矿物划分,这些铁矿床(点)可分为磁铁、赤铁、铁锰矿床(点)。磁铁矿床是主要铁矿类型,以矿床(点)多、储量大为特点,西天山近年来铁矿重大找矿突破多与此类矿床有关^[50],如查岗诺尔、智博^[51]、敦德^[52]、备战、雾岭^[53]、塔尔塔格、阿克萨依^[54]等。

磁铁矿床(点)赋矿层位有2个:一为下石炭统大哈拉军山组(C_1d),二为中上石炭统艾肯达坂组(C_{1-2ak}),赋矿岩性均为安山质熔岩、火山碎屑岩。所有的磁铁矿床均与航磁异常或磁法异常对应较好,异常具有明显分带性和强度高的特点。火山活动与成矿关系密切,磁铁矿床在遥感影像图中均位

于火山环形构造中。目前已在多个矿区发现火山通道口,如阔拉萨依、敦德、尼新塔格、查岗诺尔、智博,铁矿体即位于火山口附近或火山通道的环状断裂、裂隙中。矿区普遍发育绿帘石化、钾化和透辉石化,部分矿区绿帘石化与铁矿化关系密切,绿帘石脉中常见浸染状、脉状磁铁矿伴随,如塔尔塔格。主要矿石矿物均为磁铁矿,少量赤铁矿、黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿等。但就矿石品位而言,下石炭统大哈拉军山组中磁铁矿床远高于艾肯达坂组。

矿区普遍发育与火山活动有关的环状构造,几乎所有的铁矿床均位于环形构造中。查岗诺尔铁矿和智博铁矿受同一个面积为314 km²的复式破火山口控制。卫星影像图清晰地显示了该破火山口至少经历了4次喷溢—塌陷过程,查岗诺尔铁矿位于复式破火山口的西北缘,智博处于复式破火山口的中间。查岗诺尔矿区2矿带凝灰岩(不含矿)330、303 Ma的锆石年龄证实了该火山口喷发—沉积旋回的多期性(见下文)。目前已在查岗诺尔1号矿带东南部发现破火山口,与1矿带直线距离约1.2 km,发育至少2个火山通道口和多个喷发—沉积韵律。结合矿体中熔渣状、角砾状、波纹状矿石的大面积存在,暗示矿区铁矿体形成与火山机构有关。敦德、尼新塔格、阔拉萨依矿区本身就是一个火山口,矿区内均已发现有至少1个火山通道(另文撰述)。铁矿体位于火山通道内,受火山通道及与通道相关的火山断裂控制,脉状(方解石—磁铁矿脉)、角砾状矿体普遍发育。另外,备战、松湖、阿克萨依、塔尔塔格等均位于火山机构中,受火山机构的控制。

矿区火山岩相当发育。大部分磁铁矿区火山岩为下石炭统大哈拉军山组中基性火山岩,岩性主要为安山岩、英安岩、钠长斑岩和凝灰岩、火山角砾岩及少量玄武岩和流纹岩。铁矿体主要赋存于火山凝灰岩中。其中,部分矿体与凝灰岩接触界线清晰,无明显蚀变与过渡现象,呈层状、似层状,时间上明显晚于同期火山岩(熔岩、碎屑岩)(图2);部分矿体与凝灰岩呈侵入接触关系,呈脉状、浸染状,产状普遍较陡,明显受火山机构内断裂、裂隙所控制,时间上晚于火山岩,为(次)火山热液活动产物。少数矿区火山岩为中上石炭统大艾肯达坂组中基性火山岩,岩性主要为粗面安山岩、流纹岩、霏细岩和凝灰岩、火山角砾岩及少量玄武岩。铁矿体主要赋

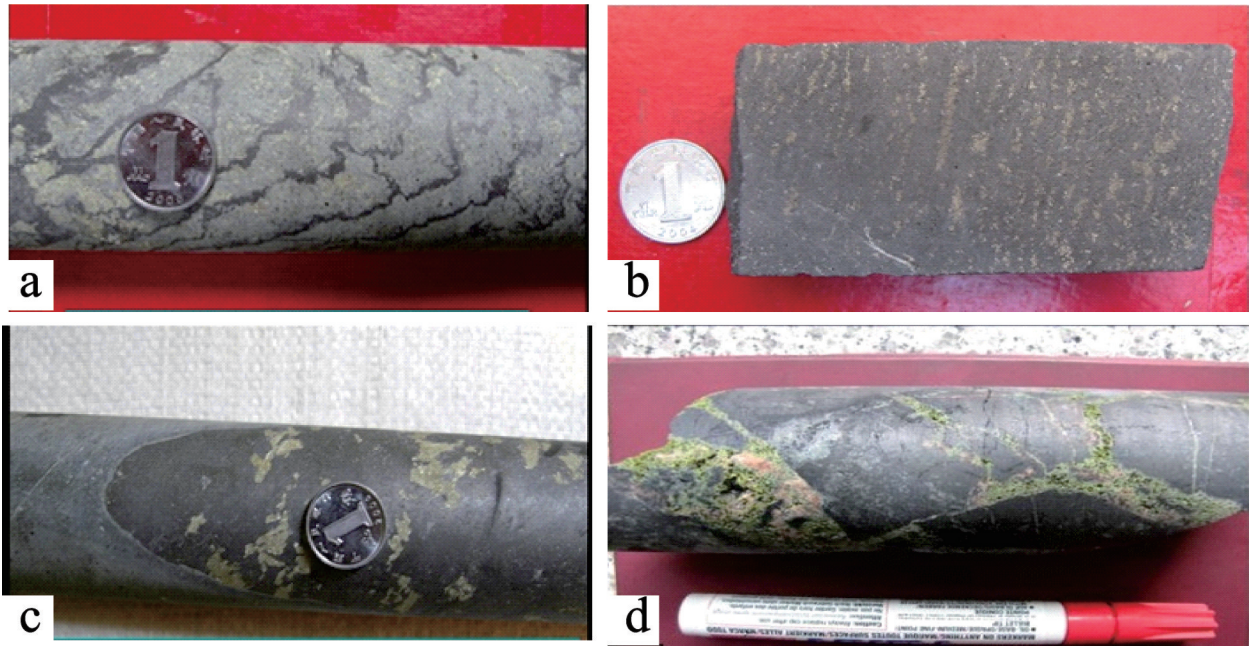


图2 智博铁矿床矿石构造

a—磁铁矿脉与安山岩组成的流动构造; b—黄铁矿呈层纹状分布于磁铁矿石中; c—磁铁矿石与安山岩接触带无蚀变现象;
d—绿帘石化钾长石化呈脉状分布于安山岩和铁矿石中

Fig.2 Some ore structures in the Zhibo Fe deposit

a—Flow structure formed by magnetite veins and andesite; b—Layered pyrite in magnetite ore; c—No alteration in the contact zone between the magnetite orebody and andesite; d—Epidotized and K-feldspathized veins in magnetite orebody and andesite

存于断裂附近安山玢岩中,少量位于断裂附近闪长岩中,呈脉状、浸染状,明显受断裂控制,时间上晚于安山玢岩与闪长岩,与断裂破碎带接近。

矿区侵入岩相当发育。花岗岩在西天山各磁铁矿区普遍发育,如查岗诺尔、智博、敦德、备战、松湖、阔拉萨依等,面积大小不一。花岗岩与火山岩、铁矿体均为侵入接触关系,时间上明显晚于火山岩和铁矿体;但岩体中普遍发育铜、铅锌矿化,并见明显的硅化、绿泥石化、绢云母化和萤石化,铜、铅锌矿化体呈断续的脉状分布,规模小而难以计算储量,如查岗诺尔、敦德、阔拉萨依矿区。辉绿岩、闪长岩、辉长岩等中基性侵入岩呈脉状侵入于矿区火山岩中,年龄与火山岩相近或晚于火山岩,多数矿区中基性侵入岩与铁矿无直接成因联系,但波斯勒克铁矿除外。波斯勒克辉长岩为哈拉达拉岩体的一部分,通过岩浆分异作用形成钒钛磁铁矿体,但在形成时间(306~308 Ma)^[55-57]上也稍晚于矿区火山岩(313 Ma)^[23]。

2.2 典型矿床

2.2.1 智博铁矿

智博铁矿出露地层主要为下石炭统大哈拉军山组和第四系。地层总体呈单斜产出,倾向 NE30°~60°,倾角 65°左右。受火山机构的制约,各种构造形迹较为复杂。矿区普遍发生多次火山喷发作用,如智博铁矿 ZK4003 中见火山角砾岩(或火山集块岩)、火山熔岩(安山岩、英安岩)、凝灰岩互层多个,表明了火山作用的多期性。矿区中酸性岩体较为发育,西南部见花岗闪长岩,呈 NE 向的条带状侵入;北部和西部见石英闪长岩,与矿区中部的火山岩呈侵入接触关系。矿体主要赋矿岩性为大哈拉军山组第三岩性段安山质晶屑火山灰凝灰岩夹玄武质安山岩,上部可见碧玉岩层;次要赋矿地层为大哈拉军山组第二岩性段安山质晶屑火山灰凝灰岩。大多数矿体产状较为平缓,呈层状(似层状)、透镜状,品位较高,为 35%~60%,平均品位 38%^[1];矿体具有波纹状流动构造,与围岩界线清晰,无过渡,

接触部位无蚀变现象发现。少量矿体受后期火山作用影响,产状较陡,呈不规则脉状(矿石构造为角砾状,为后期火山作用破坏了原有矿体后熔浆胶结矿石碎块而成),品位较低,矿体全铁(TFe)平均品位约23%。从产状来看,矿体与围岩地层呈不整合的侵入关系。

矿石主要为致密块状、角砾状构造,细-微粒自形-半自形晶结构。主要矿石矿物为磁铁矿,次为赤铁矿、黄铁矿,偶见黄铜矿;脉石矿物主要为辉石、绿帘石、钾长石、阳起石等。受后期热液叠加的影响,中矿段和东矿段磁铁矿体中普遍见细脉状、浸染状黄铁矿、磁黄铁矿(图2)。围岩蚀变主要为绿帘石化、透辉石化和钾化(偶见电气石化),在矿体周围呈线性分布,这与传统矽卡岩化的面状分布明显不同。

2.2.2 塔尔塔格铁矿

塔尔塔格铁矿出露地层主要为中上石炭统艾肯达坂组。地层总体呈单斜产出,倾向NE50°~65°,倾角40°左右。受火山机构的制约,构造形迹较为复杂。矿区普遍发生多次火山喷发作用,东南角见火山角砾岩(或火山集块岩)、火山熔岩(安山岩、英安岩)互层多个,表明发育了多期火山作用。矿区中性岩脉发育,西北部见石英闪长岩脉,呈NW向的条带状侵入。

铁矿区有铁矿带3条,呈近东西向排列:1矿带长约2 km,宽约60 m,圈出铁矿体4条;2矿带长约1 km,宽约35 m,圈出矿体3条;3矿带长2.5 km,宽约50 m,圈出矿体4条。矿体主要赋矿岩性为艾肯达坂组青灰色、灰白色粗面安山岩,次要赋矿岩性为黄绿色石英闪长岩。矿体产状较为平缓,呈脉状,品位较低,为20%~25%,平均品位23.5%(图3)。矿带主要受近东西向的断裂破碎带控制,矿体中或附近均有破碎带、断层出现,矿体位于破碎带中或裂隙中。目前,已探获铁矿石资源量70 Mt。

矿石构造可分为3种类型:在青白色粗面安山岩中呈稠密浸染状、团块状,在灰白色粗面安山岩、闪长岩中呈脉状和稠密浸染状。矿石结构为粗粒结构。脉石矿物主要为辉石、绿帘石、钾长石、阳起石等。主要矿石矿物为磁铁矿,晶形相当完整,颗粒较粗;次要矿石矿物为黄铁矿,呈微细脉状穿插于铁矿体中。脉石矿物主要为绿帘石、钾长石、石英等。主要围岩蚀变为绿帘石化、钾化,与矿化相

当密切;另有少量硅化和方解石化。

2.2.3 备战铁矿

备战矿区出露地层主要为石炭系大哈拉军山组及第四系,总体呈向斜产出。矿区处于夏格孜达坂向斜北翼,核部地层为石炭系大哈拉军山组第三岩性段,翼部依次为第二岩性段和第一岩性段。断裂构造较发育,较大断裂共9条,多为高角度压扭性正断层。出露岩浆岩主要有石英二长斑岩(局部相变为石英正长斑岩)、花岗斑岩、闪长岩脉、辉绿岩脉等。局部地段花岗(斑)岩出现细粒边缘相,形成时代为晚石炭世。备战花岗斑岩在矿体底部切穿矿体,对矿体起破坏作用。闪长岩脉和辉绿岩脉均为晚二叠世的侵入岩脉。矿区南部可见明显的熔结凝灰岩、熔结集块岩,东部见火山集块岩(图4)。

矿区共圈出铁矿体6个,其中矿床中部的L3矿体为主矿体。矿体主要赋存在大哈拉军山组第一岩性段及第二岩性段中,赋矿岩性为玄武质、安山质凝灰岩和大理岩中,部分矿体由断裂、断层控制。矿体产状较为复杂,呈层状(似层状)、脉状(L1矿体)、陡倾透镜状(L3矿体)。矿体上陡下缓向东有侧伏趋势,具有明显的分层性,上部似层状矿体,中部角砾状矿体,下部为脉状矿体。矿体矿化连续,品位变化均匀,总体表现为矿体向深部变厚变富。

矿石主要为致密块状、角砾状(图4)、脉状、浸染状构造,粗-微粒结构。主要矿石矿物为磁铁矿,占85%~87%;其次有黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿等,呈细脉状、浸染状分布于矿石中。脉石矿物主要为石榴子石、透辉石、阳起石、绿帘石。前人^[45]研究显示,石榴子石、透辉石、绿帘石等矿物形成的时间比磁铁矿早,而黄铁矿、磁黄铁矿等硫化物则较磁铁矿晚。主要围岩蚀变为绿帘石化、透辉石化、钾化、碳酸盐化和绿泥石化,以前三者为主,蚀变为线性蚀变。

2.3 矿床类型

西天山铁矿区矿石结构相差较大,粗粒、细粒、微细粒结构均有,基本不相互混染,在颜色、构造、微观特点上差别较大。因此,将磁铁矿分为2类:第一类为磁铁矿粒径较小,为0.02~0.1 mm,颜色为褐黑色、暗黑色、褐色,矿石为块状构造、脉状、角砾状构造(角砾为磁铁矿团块),矿石表面可见流动构造和细脉、微细脉状黄铁矿,矿石与围岩接触部位界

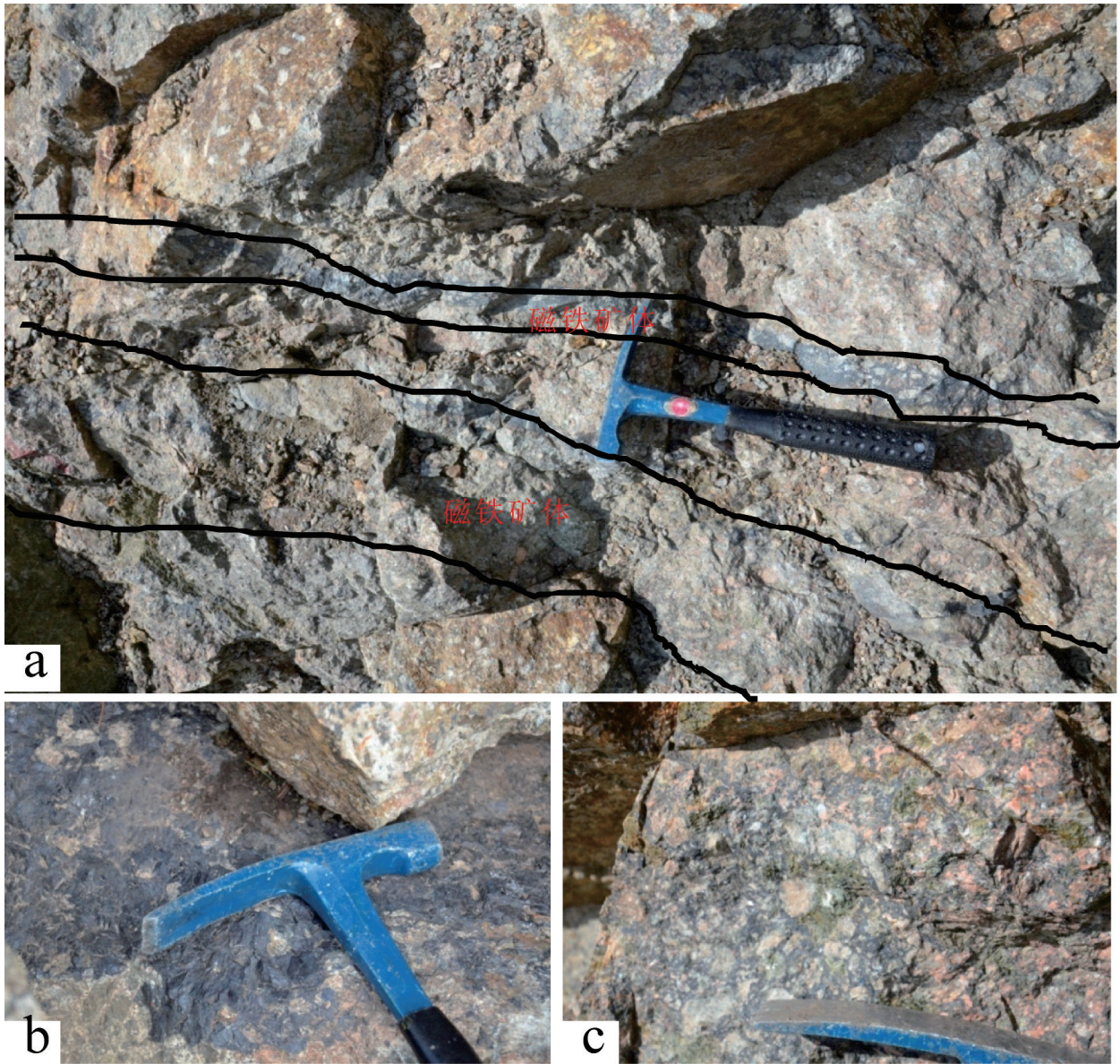


图3 塔尔塔格铁矿矿体与矿石构造

a—磁铁矿体呈脉状分布于粗面安山岩中; b—沿裂隙面分布的脉状磁铁矿; c—磁铁矿呈浸染状分布于绿帘石化、钾长石化粗面安山岩中
 Fig.3 Orebodies and ore structures in the Taertage Fe deposit
 a—Vein magnetite orebodies in trachyandesite; b—Vein magnetite ore in the fissure of trachyandesite; c—Disseminated magnetite ore in epidotized and K-feldspathized trachyandesite

限清晰,无蚀变;第二类磁铁矿颗粒较粗,粒径0.3~15 mm,个别粒径可达米级(见于敦德铁矿区),颜色为亮黑色、银黑色,脉状、角砾状构造(角砾为方解石),矿石中无流动构造,矿石与围岩接触部位界限模糊,见高温热液蚀变(主要是绿帘石化、石榴石化和透辉石化)。

因此,对区域具备上述2类矿石的备战铁矿进

行稀土元素分析,样品分别采自矿区L3、L4矿体。样品在廊坊市诚信地质服务有限公司破碎和分选后,再在双目镜下挑选纯度可达99%以上的磁铁矿、黄铁矿、透辉石单矿物,共挑选了3件磁铁矿、3件黄铁矿和1件透辉石样品,然后在玛瑙研钵中研磨至200目以下备用。样品分析工作在中科院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,

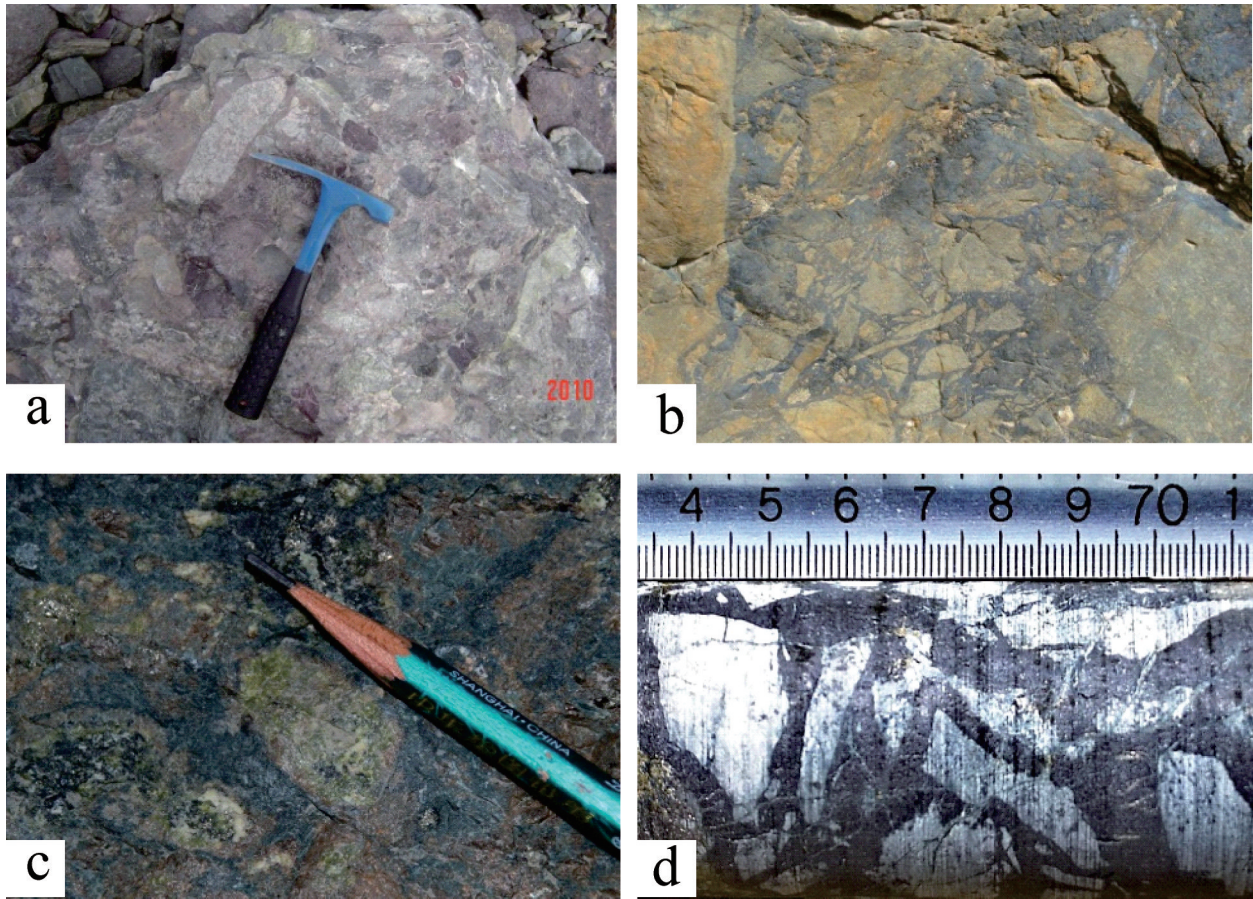


图4 备战铁矿火山集块岩和角砾状矿石
 a—火山集块岩; b—沿火山岩裂隙充填的磁铁矿; c—熔结凝灰岩; d—磁铁矿胶结英安岩

Fig.4 Volcanic agglomerate and breccia ore in the Beizhan Fe deposit

a—Volcanic agglomerate; b—Magnetite vein filling the fissure of volcanic rock; c—Ignimbrite; d—Dacite rubbles cemented by magnet ore

采用酸溶法, 分析仪器为等离子质谱 X-series, 执行标准为 DZ/T 0223-2001, 分析误差小于 5%, 检测限为 0.05×10^{-6} 。稀土元素球粒陨石标准采用文献[58]的标准, Eu 异常采用 $\delta Eu = (Eu)_N / \sqrt{[(Sm)_N * (Gd)_N]}$ 。

结果显示(图5), 第一类矿石中磁铁矿稀土元素配分模式为平缓右倾型, 具有轻微的钕负异常; 第二类磁铁矿稀土元素配分模式为陡立右倾型, 具有明显的钕正异常。两类磁铁矿与黄铁矿在稀土元素总量、钕异常、配分模式上存在较大差别, 但透辉石与第二类磁铁矿具有较好的相似性。另外, 第一类磁铁矿流体包裹体爆裂温度 $>450^\circ\text{C}$ (多数在 500°C 以上), 第二类磁铁矿流体包裹体爆裂温度 $<400^\circ\text{C}$, 也显示出明显的差别(另文撰述)。

结合矿体、矿石特征, 前者归类为海相火山岩型中的矿浆型(即火山喷溢型), 后者归类为海相火

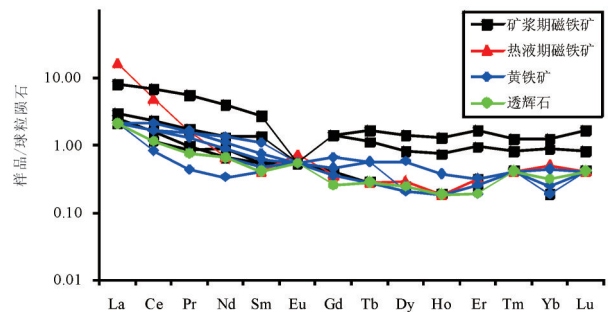


图5 西天山备战铁矿不同矿物稀土元素配分模式
 Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns of different minerals in the Beizhan Fe deposit, West Tianshan Mountains

山岩型中的(次)火山热液型。

西天山主要磁铁矿床成因类型划分及特征如表1:

表1 西天山磁铁矿床成因类型及特征

矿床类型及亚类		成矿元素	主要特征	矿床实例
海相火山岩型	矿浆型	Fe-Cu	矿体呈层状、似层状、不规则脉状, 距离火山口 1~2.5 km, 部分矿体上部见碧玉岩和细碧角斑岩; 矿石构造主要为致密块状、角砾状, 角砾主要为微细粒磁铁矿, 磁铁矿粒径较小, 0.02~0.1 mm, 呈暗黑色、黑色、褐色; 矿石与围岩界限清晰, 接触带无蚀变, 见流动构造、树枝状构造; 磁铁矿包裹体爆裂温度>450 °C。该类型矿床见少量火山热液型矿体, 但规模上远小于矿浆型矿体	查岗诺尔、智博、尼新塔格、松湖
	火山热液型	Fe-Zn-Au、Fe	矿体呈脉状、透镜状, 距离火山口 0~0.5 km; 矿石构造为块状、角砾状, 角砾主要为方解石、石英等; 磁铁矿为中粗粒, 粒径 0.3~15 mm, 颜色呈银黑色、亮黑色; 矿石与围岩界限模糊, 接触带见高温蚀变矿物, 如绿帘石、石榴石、透辉石等, 矿石表面无流动构造; 磁铁矿包裹体爆裂温度<400 °C。少数矿区见少量矿浆型矿体, 但规模很小, 如阿克苏依	阔拉萨依、塔尔塔格、阿克苏依
	矿浆-火山热液叠加型	Fe-Zn-Au	矿体呈层状、似层状、脉状和陡倾透镜状, 距离火山口 0~1.5 km; 矿体上陡下缓向东有侧伏趋势, 具有明显的分层性: 上部似层状矿体, 中部角砾状矿体, 下部为脉状矿体。矿石构造为致密块状、角砾状、脉状、浸染状, 粗-微细粒结构; 磁铁矿包裹体爆裂温度变化范围大, 存在多期性, 从 270 °C 到 601 °C 均有。矿体内伴生金和铅锌, 储量较大。矿浆型矿体、热液型矿体均有出现, 两者储量相差不大	敦德、备战

3 火山岩、侵入岩与矿体的成因关系

3.1 火山喷发、岩浆侵入与成矿时间

对西天山主要磁铁矿床火山岩、中酸性侵入岩、矿石进行了年龄测定, 测试方法分别为锆石 SHRIMP U-Pb、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 和磁铁矿 Re-Os 法。锆石、磁铁矿分选在廊坊市诚信地质服务有限公司完成。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析在中国地质科学院矿产资源研究所 LA-ICP-MS 实验室完成, 所用仪器为连接 NewWave UP-213 激光剥蚀系统的 Finnigan Neptune 型 ICP-MS。锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分析方法, 采用文献^[59-60]所报道的实验流程, 在北京离子探针中心的 SHRIMP II 上完成, 并对测定结果作了校正。磁铁矿 Re-Os 同位素定年分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室进行, 实验流程及方法见文献^[61]。该定年方法经前人多次尝试^[62-65], 并成功获得东天山沙泉子铜铁矿成矿年龄^[61]。该方法测试精度为 2%~5%, 可运用于金属矿床定年。具体年龄见表 2。

可以看出, 不同矿床火山岩、侵入岩、磁铁矿形成年龄并不一致。

前人^[26]测定备战铁矿火山岩未提及岩性, 文献中也未提及岩石特征, 故予舍弃。英安岩、英安质钠长斑岩、流纹岩年龄分别为 329 Ma、309 Ma、300

Ma, 从中性到酸性火山岩年龄逐渐变小, 显示出岩浆分异的特征。铁矿体位于火山凝灰岩中, 形成时间应晚于凝灰岩, 与熔岩相近或稍晚于熔岩。花岗岩(299 Ma)晚于火山岩形成, 与火山岩、矿体均为侵入接触关系, 为成矿后侵入体。故铁矿体形成时间应为 300~329 Ma。

查岗诺尔铁矿熔岩由于采样地点及测试单位的不同, 岩石年龄存在一定差异。但类砂卡岩为火山热液产物, 形成时间晚于同期熔岩。2号铁矿带中钾长花岗岩与铁矿体为侵入接触关系, 地表可见明显的侵入界限, 岩体中见铅锌、铜矿化, 形成时间也应晚于熔岩、凝灰岩与矿体。因此, 本次测试之凝灰岩、花岗岩年龄基本代表了其真实年龄。而铁矿石 336 Ma 的 Re-Os 等时线年龄, 考虑到精度与误差问题, 这个年龄值也可以接受, 其真实值应在 325~330 Ma。松湖铁矿 314 Ma 的 Re-Os 等时线年龄也可以接受。

智博铁矿熔岩由于采样地点不同, 岩石年龄存在一定差异。安山岩、流纹岩均为中矿段隧道口样品, 属同一期, 年龄较小, 为 307~310 Ma, 代表晚期火山活动时间。钠长斑岩为中矿段 40 线钻孔深部样品, 与上述岩石不属同一岩层, 其 336 Ma 年龄代表了矿区早期火山活动时间。矿区花岗岩同样有 2 期^[68]: 早期花岗岩切穿铁矿体, 形成时间为(320.3±2.5) Ma, 形成环境为大洋板块俯冲有关的活动大陆

表2 西天山主要磁铁矿床火山岩、侵入岩与矿石年龄一览

Table 2 Ages of some volcanic rocks, intrusive rocks and ores in main magnetite deposits, West Tianshan Mountains

矿床名称	岩石名称	测试方法	年龄/Ma	资料来源	采样位置
备战铁矿	英安岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	(329.1±1.0)	文献[66]	矿区东北部
	花岗岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	(307.0±1.2)	文献[66]	矿区东北部
	花岗岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	(301.4±0.4)	文献[67]	南部隧道口
	火山岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	(316.1±2.2)	文献[26]	未明
	花岗岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	(299.0±2.5)	本文	南部隧道口
	流纹岩	锆石 SHRIMP U-Pb	(300.4±2.2)	本文	ZK009
	钠长斑岩	锆石 SHRIMP U-Pb	(308.7±2.1)	本文	ZK009
查岗诺尔铁铜矿	凝灰岩	锆石 SHRIMP U-Pb	(303.0±2.1)	本文	ZK009
	类砂卡岩	石榴石 Sm-Nd 法	(316.8±6.7)	文献[9]	I 矿带
	闪长岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	(303.8~305.0)	文献[4]	II 矿带
	流纹岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	(321.2±1.3)	文献[1]	ZK2801 480m
	凝灰岩	锆石 SHRIMP U-Pb	(329.9±3.7)	本文	II 矿带
			(303±11)		
		花岗岩闪长岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	(325.9±2.7)	本文
松湖铁矿	铁矿石	磁铁矿 Re-Os	(336±8)	本文	I 矿带 3100 平硐
	安山岩	锆石 SHRIMP U-Pb	(323.9±1.9)	本文	I 矿体
	铁矿石	磁铁矿 Re-Os	(314±14)	本文	I 矿体
智博铁矿	安山岩	锆石 SHRIMP U-Pb	(310.0±3.0)	本文	中矿段
	英安岩	锆石 SHRIMP U-Pb	(307.0±3.0)	本文	中矿段
	钠长斑岩	锆石 SHRIMP U-Pb	(336.0±4.0)	本文	中矿段
	花岗岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	(320.3±2.5)	文献[68]	东矿段
	花岗岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	(294.5±1.0)	文献[68]	东矿段
	闪长岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	(318.9±1.5)	文献[68]	东矿段
	花岗岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	(304.1±1.8)	文献[68]	东矿段
敦德铁锌矿	英安岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	(316.0±1.7)	文献[69]	3912 平硐
	钾长花岗岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	(295.8±0.7)	文献[69]	矿区南部
	花岗岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	(300.7±2.0)	本文	矿区南部
	铁矿石	磁铁矿 Re-Os	(316±10)	本文	3912 平硐 8 穿脉
	英安岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	(353.3±3.5)	文献[70]	矿区北区
阔拉萨依铁锌铜矿	铁矿石	磁铁矿 Re-Os	(319±12)	本文	平硐

边缘岛弧环境;晚期花岗岩分别切穿矿体和火山岩,形成时间分别为295 Ma、304 Ma,为后碰撞花岗岩;闪长岩侵入于大哈拉军山组火山岩地层中,形成时间为319 Ma,形成环境为岛弧环境。铁矿体早于花岗岩形成,其年龄在320~336 Ma。

敦德铁矿英安岩年龄316 Ma,代表了成矿前熔岩形成时间;花岗岩年龄295~300 Ma,岩石具有明显的铜、铅锌矿化,代表了成矿后中酸性岩浆侵入时间;磁铁矿年龄316 Ma,代表了真实的矿石形成时间。阔拉萨依铁矿只有2个年龄样品,英安岩、磁铁矿年龄分别为353 Ma、319 Ma基本代表了矿区熔岩、铁矿体形成时间。

从上述年龄分析来看,西天山主要磁铁矿床由西到东(阔拉萨依、松湖、查岗诺尔、智博、敦德、备战),火山岩年龄由老变新的趋势,这可能与当时古天山洋关闭方向有关。磁铁矿形成年龄稍微晚于火山熔岩,但要早于中酸性侵入岩。这个规律表明,铁矿体不可能来自中酸性岩浆侵入活动,但可能与火山活动有关。

3.2 火山岩、侵入岩与矿石的地球化学联系

对区域磁铁矿区火山岩、磁铁矿石、侵入岩进行主量、微量、稀土元素分析。样品分别采自备战L3矿体、智博中矿段、查岗诺尔1矿带3100平硐和2号矿带露天采场、松湖L1矿体,敦德矿区采自3912平硐,阔拉萨依矿区采自3号平硐。所有火山岩、侵入岩样品均为新鲜样品,无明显蚀变、无污染;不同类型矿石样品在保证新鲜的前提下,确保每块矿石只有一种类型。铁矿石破碎至40~60目后,镜下剔除黄铁矿、黄铜矿、方解石等后期热液矿物,再在玛瑙钵中碾碎至200目以下备用。样品分析在中科院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,分析方法同前。稀土元素球粒陨石标准采用文献[55]的标准, Eu异常采用 $\delta Eu = (Eu)_n / \sqrt{[(Sm)_n * (Gd)_n]}$ 。具体特征见表3。

西天山磁铁矿区火山岩具有类似的元素化学特征。火山岩普遍高Al、低Ti($Al_2O_3 > 13\%$, $TiO_2 < 1.2\%$),且呈现出玄武岩>安山岩(英安岩)>流纹岩(石英角斑岩)的趋势。稀土元素总量为 $\Sigma REE =$

表3 西天山主要铁矿区火山岩、侵入岩、矿石主量及微量元素特征
Table 3 Characteristics of major elements and trace elements for some volcanic rocks, intrusive rocks and ores in main magnetite deposits, West Tianshan Mountains

矿区	岩石(矿石)	主量元素/%				微量元素/10 ⁻⁶							稀土元素/10 ⁻⁶				
		Al ₂ O ₃	TiO ₂	Li	Ce/Pb	Ba/La	K/Ta	δEu	(La/Yb) _N	LREE	HREE	LREE/HREE	δEu	(La/Yb) _N	LREE	HREE	LREE/HREE
备战	玄武岩	14.85~16.64/3	0.93~1.16/3	1.23/2	9.5~17.03/2	8.76~21.31/2	10000~66620/2	0.85~1.01/2	3.81~9.40/2	75.95~119.9/2	10~11.25/2	6.75~11.99/2					
	安山岩	13.81~16.23/4	0.31~0.94/4	0.91~1.56/4	4.31~10.09/4	7.83~28.36/4	5102~60000/4	0.61~0.86/5	0.28~6.68/5	17.7~77.5/5	8.1~17.8/5	1.66~9.81/5					
	流纹岩	10.70~13.49/3	0.21~0.34/3	5.4/2	3.63~12.71/2	15.26~124.76/2	12862~24562/2	0.44~0.69/2	1.08~2.38/2	42.33~80.2/2	8.3~8.89	4.76~9.66/2					
敦德	玄武岩	20.10/1	1.19/1	15.2~62.8/2	3.12~32.3/2	22.99~69.73/2	47252~55043/2	0.6~1.07/2	5.04~7.45/2	79.02~128.92/2	10.79~12.49/2	7.32~10.32/2					
	安山岩	7.55/1	0.67/1														
智博	玄武岩	15.95~17.85/4	0.65~0.81/4	1.8/1	8.14/1	2.18/1	8298/1	1.06/1	2.90/1	54.17/1	11.64/1	4.65/1					
	安山岩	13.24~17.25/3	0.53~0.95/3	2.8/1	20.28/1	3.96/1	43647/1	0.75~0.86/2	0.62~1.73/2	17.7~52/2	9.9~15.8/2	1.79~3.29/2					
查岗诺尔	流纹岩	11.95~13.45/2	0.18~0.29/2					0.43/1	2.75/1	97.13/1	18.51/1	5.25/1					
	流纹岩	15.65/1	0.56/1					0.58/1	2.73/1	83.33/1	18.32/1	4.55/1					
	安山岩	13.4~17.81/4	0.51~1.13/4	0.49~3.70/4	3.78~16.47/4	1.20~64.96/4	9615~68991/4	0.36~1.04/4	1~8.62/4	29.7~117.3/4	6.7~9.8/4	3.62~11.97/4					
松湖	类砂卡岩	4.5~8.8/4	0.11~0.27/4	0.10~0.51/4	0.07~3.43/4	3.5~45.6/4	270~9128/4	1.09~1.33/4	0.11~1.36/4	8.4~18.68/4	7.9~13.98/4	0.94/4.0/4					
	玄武岩	12.65/1	0.45/1	11.00/1	7.17/1	352.17/1	89530/1	0.97	5.31	77.21	9.25	8.35					
	安山岩	14.24~16.85/4	0.50~0.63/4	3.3~57.1/4	8.73~45.71/4	7.24~41.58/4	26324~93559/4	0.68~0.96/4	2.99~12.75/4	34.5~139.5/4	5.9~10.42/4	5.85~13.39/4					
阔拉萨依	玄武岩	15.02~19.32/8	0.74~1.26/8	37~54.8/8	0.15~8.73/8	3.31~61.63/8	8713~43149/8	0.67~1.17/8	1.66~8.85/8	36.57~152.47/8	8.01~16.07/8	3.77~10.15/8					
	热液矿石	0.78/1	0.11/1	0.25~0.44/2	1.47~5.48/2	3.85~18.18/2	13684~16000/2	1.52~3.05/2	3.23~10.87/2	5~6.7/2	0.7~1.4/2	4.79~7.14/2					
敦德	矿浆矿石			0.01~3.2/10	0.21~0.6/10	1.57~63.44/10	1833~8000/10	0.23~0.9/7	1.02~15.53/7	4.59~10.1/7	0.36~3.98/7	1.79~18.67/7					
	热液矿石			0.6/1	0.17/1	14.29/1	225/1	2.36/1	18.12/1	2.07/1	0.15/1	13.80/1					
智博	矿浆矿石			0.2~0.8/7	0.1~32.4/7	0.07~2.38/7	218~1667/7	0.46~1.2/7	17.72~81.8/7	11.38~38.46/7	0.17~7.5/7	14~390.8/7					
	热液矿石			3.3~175.5/10	0.21~12.09/10	0.07~14.29/10	830~6638/10	0.47~0.73/9	1.62~11.7/9	5.9~198.5/9	0.82~3.38/9	3.03~121.0/9					
查岗诺尔	矿浆矿石			0.33~4.8/11	0.01~4.64/11	0.26~85.71/11	830~106364/11	1.29~2.4/11	1.81~11.5/11	1.24~89.8/11	0.18~8.6/11	3.8~10.44/11					
	热液矿石			0.21~9.8/4	0.04~1.34/4	3.89~20/4	1660~11111/4	0.72~1.02/4	0.38~6.11/4	2.72~8.3/4	0.79~3.2/4	0.81~6.92/4					
松湖	矿浆矿石			339/1	152.38/1	1.62/1	35957/1	1.58/1	130.58/1	384.79/1	5.03/1	76.50/1					
	热液矿石			182.5~450/3	41.07~846.67/3	0.47~7.14/3	4979~29043/3	0.63~0.75/3	18.7~33.8/3	54.26~121.05/3	1.94~8.02/3	15.09~28.1/3					
阔拉萨依	矿浆矿石			0.6~24.7/8	1.13~18.91/8	0.06~17.11/8	277~2489/8	1.15~3.45/8	42.1~327.2/8	66.03~345.64/8	0.31~4.26/8	41.2~235.0/8					
	热液矿石			14.9/1	18.35/1	48.41/1	48957/1	0.84/1	6.64/1	106.26/1	10.74/1	9.89/1					
备战	辉绿岩			14.85~15.43/2	0.54~1.4/2	1.84/2	7.27~16.80/2	10.34~17.47/2	6638~8906/2	0.39~0.73/2	1.23~3.78/2	41.03~80.3/2					
	闪长岩			12.05~13.96/4	0.11~0.30/4	0.48~2.42/2	9.67~21.83/2	4.69~15.84/2	4200~28548/2	0.45~0.57/2	2.19~7.18/2	31.4~170/2					
敦德	花岗岩			9.43~12.22/4	0.06~0.13/4	2.4~2.6/3	16.62~18.28/3	1.75~2.85/3	15973~17878/3	0.03~0.09/3	3.62~3.88/3	188.8~236.1/3					
	花岗岩			14.29	10.97/1	33.93/1	43702/1	0.70/1	4.63/1	81.83/1	11.51/1	7.11/1					
松湖	花岗岩			13.98~14.11/2	0.35~0.36/2	7.7~10.8/2	56979~63479/2	0.8~0.86/2	7.19~7.86/2	76.73~78.2/2	6.81~6.86/2	11.27~11.4/2					
	花岗岩					32.3~39.23/2	6979~63479/2	0.8~0.86/2	7.19~7.86/2	76.73~78.2/2	6.81~6.86/2	11.27~11.4/2					

注:表中数值,如:14.85~16.64/3,14.85代表数值的最小值,16.64代表数值的最大值,3为统计样品个数;其他同。

$(4.99\sim 180.47)\times 10^{-6}$, 其中 $LREE=(17.7\sim 152.47)\times 10^{-6}$, $HREE=(5.9\sim 16.07)\times 10^{-6}$ 。在球粒陨石标准化稀土元素配分图中, 部分靠近蚀变带样品具有较弱的轻重稀土分馏 ($(La/Yb)_N$ 介于 $0.28\sim 1.08$); 其余火山岩样品则不同程度地发生轻重稀土的分馏作用 ($(La/Yb)_N$ 为 $1.36\sim 12.75$); 火山岩整体表现为轻稀土富集、重稀土亏损的平缓右倾型配分模式, $LREE/HREE=1.66\sim 13.39$; 除蚀变样品外, 轻稀土内部分异相对较明显 ($(La/Sm)_N$ 为 $0.38\sim 7.64$), 配分曲线陡峭; 重稀土元素内部分异较弱 ($(Gd/Yb)_N$ 分别为 $0.63\sim 1.98$), 配分曲线较平坦; 火山岩均具有明显-弱的负铕异常 (δEu 为 $0.36\sim 1.33$)。备战矿区灰岩稀土元素总量明显低于火山岩, $\Sigma REE=12.52\times 10^{-6}$, 整体表现为轻稀土富集、重稀土亏损的严重右倾型配分模式, $LREE/HREE=15.69$, 具有明显的负铕异常 (δEu 为 0.38)。辉绿岩、闪长岩、花岗岩具有与火山岩相似的稀土元素特征。

铁矿石中普遍低 Al、低 Ti ($Al_2O_3=0.71\%\sim 3.95\%$, $TiO_2=0.02\%\sim 0.22\%$), 不同类型基本一致。但不同类型矿石稀土元素有所差别。矿浆期铁矿石稀土元素总量为 $\Sigma REE=(3.51\sim 389.45)\times 10^{-6}$, $LREE/HREE=0.81\sim 390.8$, 轻、重稀土分异明显, 整体表现为轻稀土富集、重稀土亏损的右倾型配分模式; 在球粒陨石标准化稀土元素配分图中, 不同程度地发生轻重稀土的分馏作用 ($(La/Yb)_N$ 为 $0.38\sim 811.79$, 整体在 1.5 以上); 轻稀土内部分异相对较明显 ($(La/Sm)_N$ 为 $1.56\sim 32.87$), 配分曲线陡峭; 重稀土元素内部分异较弱 ($(Gd/Yb)_N$ 分别为 $0.40\sim 7.61$, 总体在 1 附近), 配分曲线较为平坦; 矿石均具有明显的负铕异常 (δEu 为 $0.23\sim 1.20$)。热液期铁矿石稀土元素总量为 $\Sigma REE=(1.42\sim 389.82)\times 10^{-6}$, $LREE/HREE=3.8\sim 235.02$, 整体表现为轻稀土富集、重稀土亏损的右倾型配分模式; 在球粒陨石标准化稀土元素配分图中, 发生明显的轻重稀土分馏作用 ($(La/Yb)_N$ 为 $1.81\sim 327.21$); 轻稀土内部分异相对较明显 ($(La/Sm)_N$ 为 $1.01\sim 190.18$, 整体在 2 以上), 重稀土元素内部分异较弱 ($(Gd/Yb)_N$ 分别为 $0.40\sim 6.92$, 整体 $1\sim 2$), 配分曲线较为波折; 铁矿石均具有明显的正铕异常 (δEu 为 $1.15\sim 3.45$)。可以看出, 矿浆型铁矿石与火山岩具有相似的稀土元素特征, 其来源为火山岩; 热液型铁矿石来源可能较为复杂。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图上, 西天山火山岩样品表现出类似的分配模式, 不同程度地富集大离子亲石元素 (LILE; 如 K、Rb、Sr、Th), 而明显地亏损高场强元素 (HFSE; 如 Nb、Ta、Ti、Zr), 并具有高 Li ($(0.49\sim 62.8)\times 10^{-6}$, 大部分在 2.0×10^{-6} 以上)、高 Ce/Pb 比值 ($0.15\sim 45.71$, 绝大多数在 2 以上, 其中玄武岩 $2\sim 32.3$)、高 Ba/La 比值 ($1.20\sim 352.17$, 绝大多数在 13 以上)、高 K/Ta 比值 ($8298\sim 93559$), 与岛弧火山岩的地球化学特征类似。与典型的岛弧火山岩富集 Ba 的特征不同, 火山岩样品均呈现出 Ba 的轻度亏损。闪长岩具有相同的稀土、微量元素特征, 在微量元素蛛网图中, 表现出与火山岩样品基本一致的配分形式, 暗示两类岩石在成因上具有一定的继承和演化的关系。花岗岩、灰岩贫 Sr、Zr, 与火山岩配分模式明显不同, 成因上与火山岩具有较大的差别 (图 6)。

不同成因铁矿石也具有基本相似的微量元素特征。在球粒陨石标准化蛛网图解投影上 (图 7), 原始地幔比值大体为 $1\sim 100$, 曲线较平缓右倾且个别交叉, 元素不相容性的降低逐渐趋于平缓。大部分样品出现类似分布模式, Rb、Th、U、Ta、La、Pb、Nd、Hf、Dy 等呈较明显富集, Ba、Nb、Zr、Ti 为亏损状态。热液型铁矿石具有明显的 Sr 负异常; 而矿浆型铁矿石表现出 Sr 弱正异常—弱负异常, 同时表现出明显的 Eu 负异常。另外, 在 Ce/Pb、Ba/La、K/Ta 比值上, 矿浆型铁矿石总体低于热液型矿石, 也显示出两者的差别。这些差别, 暗示两类矿石在来源上可能有所不同。矿浆型铁矿石表现出与火山岩基本一致的特征, 暗示成因上具有一定的联系与继承性。热液型铁矿石在成因上除与火山岩相关外, 还

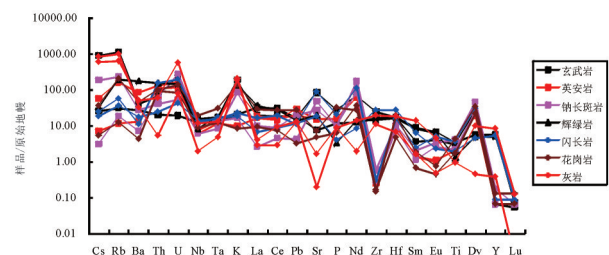


图 6 西天山备战铁矿不同岩石微量元素蛛网图
Fig.6 Trace element spider diagram of different rocks in the Beizhan Fe deposit, West Tianshan Mountains

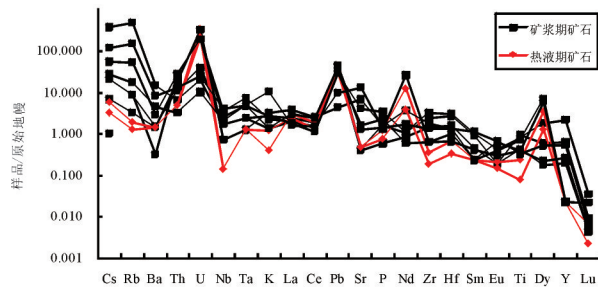


图7 西天山备战铁矿不同矿石微量元素蛛网图

Fig.7 Trace element spider diagram of different ores in the Beizhan Fe deposit, West Tianshan Mountains

可能与灰岩具有一定的联系。

4 成矿机理与成矿过程探讨

4.1 成矿地质背景

西天山铁矿床已探获铁矿石资源量约1700 Mt,其中大哈拉军山组中磁铁矿床(点)探获铁矿石资源量约1500 Mt,占西天山铁矿床(点)总资源量的88%。因此,前人多以该组形成环境代表西天山磁铁矿或西天山铁矿形成环境^[1, 23, 42, 45, 71]。

随着近年来火山岩中锆石年龄数据的不断增加以及不同方法、不同采样位置获得的年龄值相差较大(尽管单个数据比较精确),对大哈拉军山组沉积环境、构造环境的认识争议不断,归纳为3种:①大陆裂谷、地幔柱说^[13-16, 72-73]。认为石炭纪时,天山地区的古洋盆均已闭合,此时整个天山造山带处于造山后大陆裂谷拉伸阶段,石炭纪火山岩则属于碰撞后大陆裂谷火山岩系,这些裂谷火山岩系的形成与碰撞后裂谷拉张环境的古地幔柱活动有关,其母岩浆源于软流圈地幔和岩石圈地幔的混合岩浆。②活动大陆边缘和岛弧说^[18-24, 74]。认为西天山石炭纪火山岩具有大陆弧岩浆的地球化学特征,并提出大哈拉军山组火山岩形成于古南天山洋洋壳向中天山—伊犁板块俯冲所形成的火山岛弧,该岛弧持续演化到晚石炭世早期,晚石炭世开始向裂谷环境转变。文献^[24]认为昭苏北部的大哈拉军山组火山岩形成于具有元古宙基底的活动大陆边缘拉张环境,岩浆源区可能为俯冲流体交代富集的岩石圈地幔。③大陆减薄拉张说^[27],认为中天山—伊犁板块内部石炭纪火山岩可能形成于大陆减薄拉张环

境。但是,上述研究多以大哈拉军山组火山岩为研究对象,从元素地球化学、岩石年代学方面来探讨晚古生代矿床的地质背景,忽略了研究主体——矿石及矿石矿物在矿床研究中的重要作用及放射性同位素对构造背景的制约。

基于此,本文对西天山主要磁铁矿区矿石矿物磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿进行Sr、Nd、Pb同位素测定,样品测试在核工业北京地质研究院进行。对测试结果进行成矿年龄校正,获得Sr、Nd、Pb同位素参数后投影于不同参数图解中。黄铁矿、黄铜矿形成时间与磁铁矿相差不大,属同一构造旋回、同一岩浆活动产物,形成环境相同。

矿石铅同位素的 $\Delta\gamma-\Delta\beta$ 成因分类图解(图8)显示,西天山主要磁铁矿床主要矿石矿物样品(磁铁矿、黄铁矿)基本落入壳幔混合区和造山带区,主要落入两区结合部位。但海相的火山岩—碎屑岩组合及前人研究表明,西天山主要磁铁矿床(点)形成环境不可能为造山带。矿石铅只可能来自俯冲带的壳幔混合铅,其形成可能与伴随火山作用上涌的地幔流体在参与成矿作用的同时与地壳物质发生混染有关。矿石 μ 值较为均一,在9.3~11.4。

如图9所示,本区矿石矿物(磁铁矿、黄铁矿)样品($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i介于0.701~0.710,绝大多数>0.7045; $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化于-10.0~+5.0,整体为低 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$,表明其来源于较为富集的地幔。在($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 协变图上,矿石矿物Sr、Nd同位素主体落入岛弧火山岩区,少量落入上地壳区域,各样品点有向富Sr方向偏移的趋势,暗示矿石矿物Sr、Nd同位素主体来源于岛弧火山岩外,还有上地壳物质的贡献。

从区域构造上来看,虽然本区早在早古生代就进入了多岛洋演化阶段,并发生了古天山洋向伊犁微地块、塔里木板块的俯冲碰撞增生作用,但古天山洋在早石炭世之前并未闭合,直到早石炭世末才完全闭合^[33, 35],北、南天山洋闭合的时间分别为325~316 Ma、320~300 Ma^[41]。另外区域玄武岩、玄武安山岩具有高Al($\text{Al}_2\text{O}_3>13\%$)、低Ti($\text{TiO}_2<1.2\%$)、高Li($\text{Li}>12\times 10^{-6}$)、Ba/La比值($\text{Ba/La}>13$)和K/Ta比值($\text{K/Ta}>6000$)的特征,也暗示了区域火山岩来自俯冲带流体交代的岛弧火山岩浆^[24, 71, 77-78]。

可以看出,西天山主要磁铁矿床(点)的成矿环境为洋陆俯冲碰撞环境。另外,下石炭统钙碱性系

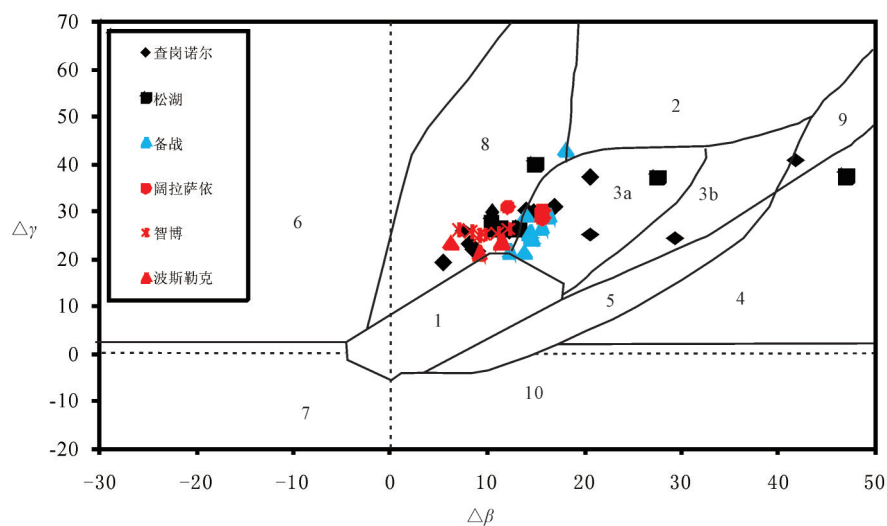


图8 西天山主要铁矿床矿石矿物铅同位素组成(底图据文献[75])

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

Fig.8 The $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ diagram of Pb isotopes for some ore minerals in main Fe deposits, West Tianshan Mountains (modified after reference [75])

1—Mantle; 2—Upper crust; 3—Mantle and upper crust mixed subduction zone (3a—Magmatism, 3b—Sedimentation); 4—Chemical sediments; 5—Hydrothermal sediments on the sea floor; 6—Medium-deep grade metamorphism; 7—Hypometamorphic lower crust; 8—Orogenic belt; 9—Upper crust of old shale; 10—Retrogressive metamorphism

列火山岩-沉积地层组合、风暴岩的发现及复杂的不协调褶皱、尖棱褶皱、强烈揉皱、区域性韧性断层的存在,也证实了西天山下石炭统为区域性挤压构造体制下的岛弧-弧后盆地环境^[34],与本文一致。

4.2 成矿机理

西天山晚古生代主要磁铁矿床(点)具有一些相同地质特征(表4): 矿石富铁低硫贫磷,磁铁矿中钛含量很低,晚期有少量黄铁矿及黄铜矿伴生; 矿床产出背景基本相同,围岩多为中基性火山岩和火山碎屑岩,以高铁富碱富含挥发分的安山岩、玄武岩和安山质凝灰岩为主,大部分矿区见碳酸盐岩地层; 矿体多受古火山机构及断裂构造控制,并发育有不同程度的围岩蚀变,蚀变整体以钠(钾)-钙质蚀变为主。这些特征,显示出特别的成矿机理。矿石低钛的化学特征,明显不同于岩浆结晶过程形成的高钛磁铁矿,基本排除了岩浆结晶成矿的可能性; 富铁低硫贫磷的特征,暗示铁矿石形成于硫逸度较低、氧逸度较高、挥发分较少的流(熔)体环境^[79-80]。

西天山富碱和挥发分的中-基性火山岩的大量出现,为铁矿石的形成提供了条件。前人研究表

明,富碱(尤其是钠)和挥发分的中-基性火山岩有利于火山岩型铁矿的形成^[81-83]。西天山玄武岩、安山岩、火山凝灰岩中碱含量较高, $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 在5%~9%,且 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$; 挥发分在1%~6%。火山岩具有较高的Ba/Nb(3.22~206.78,绝大部分在20以上)、Sr/Th(6.71~1600,绝大部分在30以上)、Ba/Th(2.49~500,绝大部分在40以上)比值和较低的Th/Ce值(0.03~1.12,大部分在0.36以下),与受俯冲带流体交代的火山岩一致。结合矿物Sr、Nd、Pb同位素显示的碰撞俯冲环境,有理由认为西天山火山岩源区受到了俯冲带流体的交代作用。交代流体不仅带来了成矿所需的磷、氟、硼等挥发分,促进铁矿浆由富铁硅酸盐岩浆中熔离出来^[84-85]; 也带来了大量成矿作用所需的氧,在降低岩浆硫逸度、增大氧逸度的同时,也促使氧与铁更好地结合形成铁氧化物(主要是磁铁矿)。

上已述及,西天山铁矿区形成时间接近或稍晚于火山活动期,但早于岩浆侵入期,暗示西天山晚古生代铁矿石形成可能只与火山作用相关。富铁流体(熔体)可能是由俯冲交代过程中形成的中基性

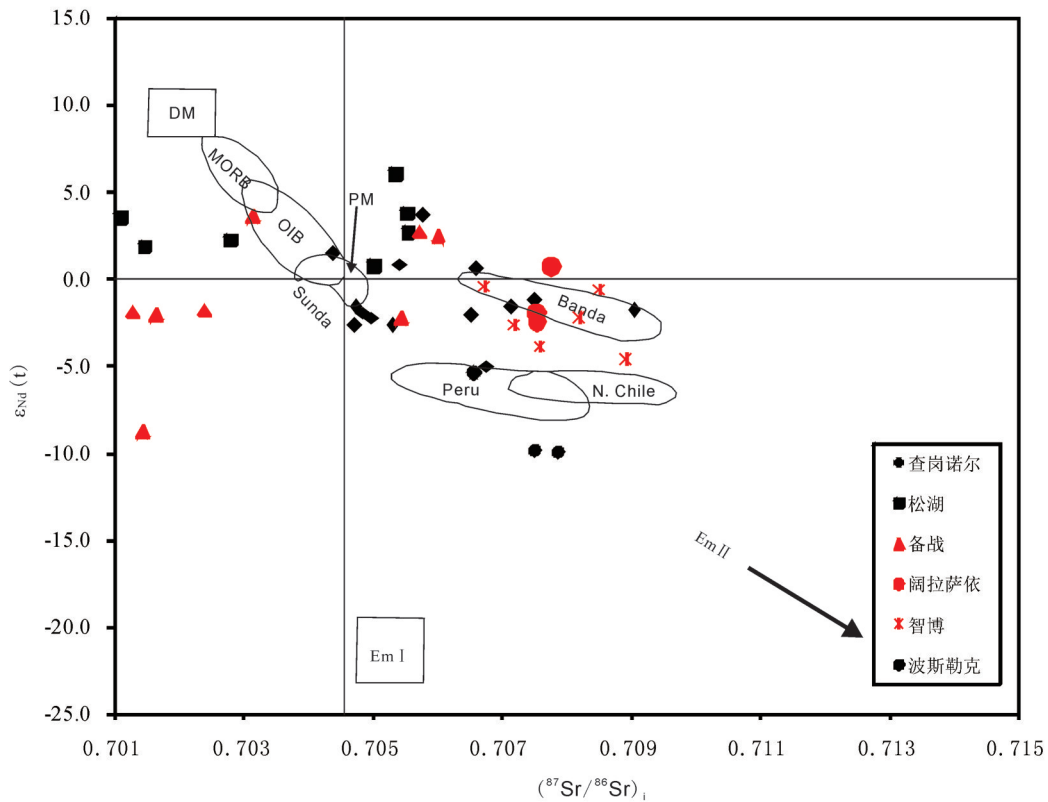


图9 西天山主要磁铁矿床矿石矿物锶-钕同位素组成与世界典型地区对比(底图据文献[76])

DM—亏损地幔; MORB—洋中脊玄武岩; PM—原始地幔; EM I—I型富集地幔; EM II—II型富集地幔; OIB—洋岛玄武岩; Sunda、Banda—印尼巽他和班达岛弧火山岩; N.Chile—北智利大陆边缘火山弧; Peru—秘鲁大陆边缘火山弧

Fig. 9 The Sr-Nd isotope composition of some ore minerals in main magnetite deposits, West Tianshan Mountains (modified after reference [76])

DM—Depleted mantle; MORB—Mid-ocean ridge basalt; PM—Initial mantle; EM I—I type enriched mantle; EM II—II type enriched mantle; OIB—Oceanic island basalt; Sunda, Banda—Sunda and Banda island arc volcanic rock; N.Chile—Continental margin volcanic arc in the north of Chile; Peru—Continental margin volcanic arc in Peru

表4 查岗诺尔矿区不同类型矿石部分主量元素特征(%)
Table 4 Characteristics of some major elements in different ores for the Chaganuoer deposit (%)

矿石类型	SiO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	P ₂ O ₅	LOI
矿浆期磁铁矿石	8.26	0.05	80.34	25.3	0.04	1.45
矿浆期磁铁矿石	10.30	0.05	73.45	26.7	0.10	2.23
矿浆期磁铁矿石	16.20	0.16	65.81	19.10	0.06	0
矿浆期磁铁矿	22.5	0.13	63.04	23.8	0.01	1.16
热液磁铁矿	12.85	0.02	77.30	25.5	0.01	0

岩浆分异形成,其具体的形成机制以及所对应的中基性岩浆起源和演化过程,是以后研究的重点之一。成矿铁质来源可能以岛弧岩浆作用所携带的深部铁质为主,另外含有少量火山-次火山气液交

代围岩所萃取的铁质^[12,45]。

4.3 成矿过程

因此,西天山晚古生代主要磁铁矿床(点)成矿过程如下(图10):晚古生代(晚泥盆世)—早石炭世,古亚洲洋并没有完全消失,在伊犁微地块与准噶尔板块之间、伊犁微地块与塔里木板块之间仍有古亚洲洋的残余。由于洋陆碰撞作用,受俯冲带流(熔)体交代的地幔楔发生部分熔融,生成富铁的玄武质岩浆。玄武质岩浆在上升过程中经历了一定程度的结晶分异作用和俯冲带流体的交代,陆续形成安山质岩浆、流纹质岩浆和铁矿浆。铁矿浆和这些岩浆沿同一通道上侵。由于重力作用和熔体的粘度影响,铁矿浆上侵的速率远低于火山岩浆。火山岩浆携带大量挥发分,经深大断裂上侵,并沿火

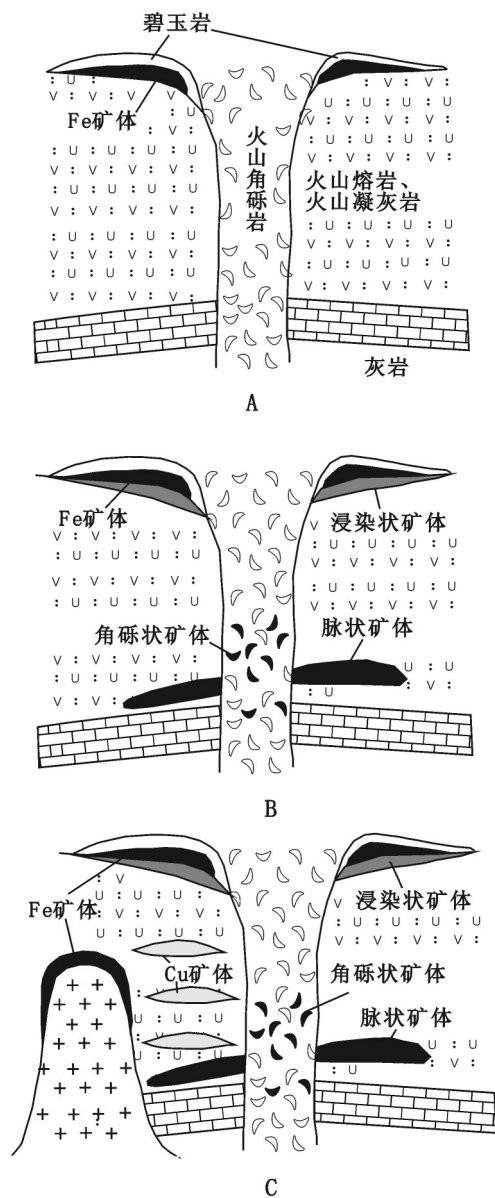


图10 西天山主要磁铁矿床成矿模式

A—火山岩浆喷溢阶段; B—火山高温热液阶段; C—岩浆热液阶段
Fig.10 Metallogenic model of main magnetite deposits, West Tianshan Mountains

A—The effusion stage of volcanic ore magma; B—The invasion stage of volcanic high-temperature hydrothermal solution; C—The invasion stage of magmatic hydrothermal solution

山机构的锥状向心断裂喷溢,形成了火山岩。铁岩浆沿火山通道、火山环状断裂、裂隙上升。这些火山机构也是岩浆或富含岩浆的熔浆汇聚并运移的通道。这些部位的压力骤降和氧分压的升高又促进了铁岩浆的熔离以及残浆、气、液的生成^[86-87]。在整个成矿过程中,岩浆或富含岩浆的岩浆在火山口附近不断聚集上升,同时围岩静压逐渐减小,导致

岩浆或富含岩浆的岩浆内的挥发分具有迅速分离出来的趋势。由于深部的岩浆流或富含岩浆的岩浆流持续补充,使得这一矿(岩)浆系统得以维持高的压力梯度。当矿(岩)浆系统的内压超过围岩静压时,必然导致超压爆破作用,形成角砾状矿石。当矿(岩)浆系统的内压小于围岩静压时,岩浆沿这些通道上升贯入,形成块状矿石;大部分岩浆沿火山通道口溢出火山口,在海底形成层状、似层状矿体,矿石具有波状流动构造。火山活动停止后,岩浆房处于高温、负压状态,使携带大量成矿物质的火山热液得以大量聚集。升温后的火山热液(可能包括少量海水)沿断裂、裂隙上升并沿途萃取围岩(包括火山岩)中的部分分散矿质,最终在火山机构中卸载,形成脉状-网脉状磁铁矿。当然,由于不同矿区具有不同的地质特征及后期不同的演化过程,不同矿区保留的成矿类型有所不同,这里不再赘述。

5 结 论

(1) 矿石矿物 Sr、Nd、Pb 同位素特征表明,西天山晚古生代主要磁铁矿床(点)的成矿环境为洋陆俯冲碰撞下的岛弧环境。

(2) 同位素年代学证明,主要磁铁矿床成矿年龄介于火山岩与中酸性侵入岩之间,接近于火山岩年龄。火山岩与矿石具有密切的成因联系。

(3) 西天山主要磁铁矿床总体归为海相火山岩型铁矿,可划分出3个亚类:火山喷溢型、火山-次火山热液型、火山喷溢-热液叠加型。不同亚类矿床具有不同的矿体、矿石特征。

(4) 铁矿石的形成,与俯冲带流体的交代作用有着密切的关系,早期为富铁岩浆交代后分异结晶作用的产物,后期则为火山热液沿断裂、裂隙交代、卸载的产物。

致谢: 样品采集过程中得到了新疆第三地质大队、第七地质大队、第十一地质大队及新疆有色物探队野外人员的大力帮助,审稿过程中两位审稿专家及编辑部杨艳老师提出了宝贵的意见,在此表示诚挚的感谢。

参考文献(References):

- [1] 冯金星,石福品,汪帮耀,等.西天山阿吾拉勒成矿带火山岩型铁矿[M].北京:地质出版社,2010:1-132.
Feng Jinxing, Shi Fupin, Wang Bangyao, et al. The Volcanic Type

- Iron Deposits in Awulale Area, Western Tianshan Mountain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010: 1-132(in Chinese).
- [2] 汪帮耀, 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): 385-402.
Wang Bangyao, Hu Xiujun, Wang Jiangtao, et al. Geological characteristics and genesis of the Chagannur iron deposit in western Tianshan, Xinjiang [J]. Mineral Deposits, 2011, 30(3): 385-402(in Chinese with English abstract).
- [3] 王春龙, 王义天, 董连慧, 等. 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, 2012, 31(5): 1038-1050.
Wang Chunlong, Wang Yitian, Dong Lianhui, et al. Geochemical characteristics of rare earth and trace elements compositions of the Songhu iron deposit in western Tianshan of Xinjiang and their significance[J]. Mineral Deposits, 2012, 31(5): 1038-1050(in Chinese with English abstract).
- [4] 蒋宗胜, 张作衡, 王志华, 等. 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, 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).
- [5] 陈毓川, 刘德权, 唐延龄, 等. 中国天山矿产及成矿体系[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 246-287.
Chen Yuchuan, Liu Dequan, Tang Yanling, et al. Mineral Resources and Metallogenic System of Tianshan Mountains in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 246-287(in Chinese).
- [6] 单强, 张兵, 罗勇, 等. 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, 2009, 25(6): 1456-1464.
Shan Qiang, Zhang Bing, Luo Yong, et al. Characteristics and element geochemistry of pyrite from the Songhu iron deposit, Nilek county, Xinjiang, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(6): 1456-1464(in Chinese with English abstract).
- [7] 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 Chagannuoer 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).
- [8] 洪为, 张作衡, 蒋宗胜, 等. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床磁铁矿和石榴子石微量元素特征对矿床成因的制约[J]. 岩石学报, 2012, 28(7): 2089-2102.
Hong W, Zhang Zuoheng, Jiang Zongsheng, et al. Magnetite and garnet trace element characteristics from the Chagannuoer iron deposit in the western Tianshan mountains, Xinjiang, NW China: Constrain for ore genesis[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(7): 2089-2102(in Chinese with English abstract).
- [9] 洪为, 张作衡, 李华芹, 等. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床成矿时代: 来自石榴子石 Sm-Nd 等时线年龄的信息[J]. 矿床地质, 2012, 31(5): 1067-1074.
Hong Wei, Zhang Zuoheng, Li Huaqin, et al. Metallogenic epoch of Chagannuoer iron deposit in western Tianshan mountains, Xinjiang: information from garnet Sm-Nd isochron age[J]. Mineral Deposits, 2012, 31(5): 1067-1074(in Chinese with English abstract).
- [10] 刘学良, 弓小平, 尹得功, 等. 新疆备战铁矿砂卡岩矿床地球化学特征及其成因意义[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2014, 30(4): 469-475.
Liu Xueliang, Gong Xiaoping, Yin Degong, et al. The geochemical characteristics and the meaning of the skarn-type deposits in the Beizhan iron ore deposit in Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2014, 30(4): 469-475(in Chinese with English abstract).
- [11] 葛松胜, 杜杨松, 王树星, 等. 新疆西天山敦德铁矿区砂卡岩成因: 矿物学和稀土元素地球化学约束[J]. 现代地质, 2014, 28(1): 61-72.
Ge Songsheng, Du Yangsong, Wang Shuxing, et al. Genesis of skarn from Dunde iron deposit in western Tianshan, Xinjiang: mineralogy and REE constraints[J]. Geoscience, 2014, 28(1): 61-72(in Chinese with English abstract).
- [12] 张招崇, 侯通, 李厚民, 等. 岩浆-热液系统中铁的富集机制探讨[J]. 岩石学报, 2014, 30(5): 1189-1204.
Zhang Zhaochong, Hou Tong, Li Houmin, et al. Enrichment mechanism of iron in magmatic-hydrothermal system [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(5): 1189-1204(in Chinese with English abstract).
- [13] 车自成, 刘良, 刘洪福, 等. 论伊犁古裂谷[J]. 岩石学报, 1996, 12(3): 478-490.
Che Zicheng, Liu Liang, Liu Hongfu, et al. Review on the ancient Yili rift, Xinjiang, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 1996, 12(3): 478-490 (in Chinese with English abstract).
- [14] 夏林圻, 张国伟, 夏祖春, 等. 天山古生代洋盆开启、闭合时限的岩石学约束—来自震旦纪、石炭纪火山岩的证据[J]. 地质通报, 2002, 21(2): 55-62.
Xia Linqi, Zhang Guowei, Xia Zuchun, et al. Constraints on the timing of opening and closing of the Tianshan Paleozoic basin: Evidence from Sinian and Carboniferous volcanic rocks[J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(2): 56-62 (in Chinese with English abstract).
- [15] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱[J]. 中国区域地质, 2004, 23(9/10): 903-910.
Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, et al. Carboniferous Tianshan igneous megaprovince and mantle plume[J]. Regional Geology of China, 2004, 23(9/10): 903-910(in Chinese with English abstract).

- [16] Xia L Q, Xu X Y, Xia Z C, et al. Petrogenesis of Carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan, northwestern China[J]. Geological Society of America Bulletin, 2004, 116: 419-433.
- [17] 董连慧, 冯京, 庄道泽, 等. 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, 2011, 29(4): 416-422.
Dong Lianhui, Feng Jing, Zhuang Daoze, et al. Discussion of metallogenic models, mineralization characteristics and main type of rich iron ore of Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2011, 29(4): 416-422(in Chinese with English abstract).
- [18] Windley B F, Allen M B, Zhang C, et al. Paleozoic accretion and Cenozoic reformation of the Chinese Tianshan range, Central Asia[J]. Geology, 1990, 18(2): 128-131.
- [19] 姜常义, 吴文奎, 张学仁, 等. 从岛弧向裂谷的变迁——来自阿吾拉勒地区火山岩的证据[J]. 岩石矿物学杂志, 1995, 14(4): 289-300.
Jiang Changyi, Wu Wenkui, Zhang Xueren, et al. The change from island arc to rift valley—evidence from volcanic rocks in Awulale area[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1995, 14(4): 289-300(in Chinese with English abstract).
- [20] 姜常义, 吴文奎, 张学仁, 等. 西天山阿吾拉勒地区岩浆活动与构造演化[J]. 西安地质学院学报, 1996, 18(2): 18-24.
Jiang Changyi, Wu Wenkui, Zhang Xueren, et al. Magma action and tectonic evolution in Awulale district, western Tianshan mountain[J]. Journal of Xi'an Engineering University, 1996, 18(2): 18-24(in Chinese with English abstract).
- [21] Gao J, Lims, Xiao X C, et al. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan orogen, northwestern China[J]. Tectonophysics, 1998, 287(1-4): 213-231.
- [22] Gao J, Klemd R. Formation of HP-LT Rocks and their tectonic implications in the western Tianshan orogen, NW China: geochemical and age constraints[J]. Lithos, 2003, 66: 1-22.
- [23] 朱永峰, 张立飞, 古丽冰, 等. 西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究[J]. 科学通报, 2005, 50(18): 2004-2014.
Zhu Yongfeng, Zhang Lifei, Gu Libing, et al. The Zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan mountains[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50: 2201-2212(in Chinese).
- [24] 钱青, 高俊, 熊贤明, 等. 西天山昭苏北部石炭纪火山岩的岩石地球化学特征、成因及形成环境[J]. 岩石学报, 2006, 22(5): 1307-1323.
Qian Qing, Gao Jun, Xiong Xianming, et al. Petrogenesis and tectonic setting of Carboniferous volcanic rocks from North Zhaosu, western Tianshan mountains: Constraints from petrology and geochemistry[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(5): 1307-1323(in Chinese with English abstract).
- [25] 荆德龙, 张博, 汪帮耀, 等. 新疆西天山尼新塔格铁矿床地质特征与矿床成因[J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33(5): 841-858.
Jing Delong, Zhang Bo, Wang Bangyao, et al. Geological characteristics and ore genesis of the Nixintage iron deposit in west Tianshan mountains, Xinjiang[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2014, 33(5): 841-858(in Chinese with English abstract).
- [26] 李大鹏, 杜杨松, 庞振山, 等. 西天山阿吾拉勒石炭纪火山岩年代学和地球化学研究[J]. 地球学报, 2013, 34(2): 176-192.
Li Dapeng, Du Yangsong, Pang Zhenshan, et al. Zircon U-Pb chronology and geochemistry of Carboniferous volcanic rocks in Awulale area, western Tianshan mountains [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2013, 34(2): 176-192(in Chinese with English abstract).
- [27] 陈丹玲, 刘良, 车自成, 等. 中天山骆驼沟火山岩的地球化学特征及其构造环境[J]. 岩石学报, 2001, 17(3): 378-384.
Chen Danling, Liu Liang, Che Zicheng, et al. Geochemical characteristics and tectonic implication of Carboniferous volcanites in the Luotuogou area of middle Tianshan[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(3): 378-384(in Chinese with English abstract).
- [28] 左国朝, 张作衡, 王志良, 等. 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, 2008, 54(6): 748-769.
Zuo Guochao, Zhang Zuoheng, Wang Zhiliang, et al. Tectonic division, stratigraphical system and the evolution of western Tianshan mountains, Xinjiang[J]. Geological Review, 2008, 54(6): 748-769(in Chinese with English abstract).
- [29] 舒良树, 卢华复, 印栋浩, 等. 新疆北部古生代大陆增生构造[J]. 新疆地质, 2001, 19(1): 59-63.
Shu Liangshu, Lu Huafu, Yin Donghao, et al. Late Paleozoic continental accretionary tectonic in northern Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2001, 19(1): 59-63(in Chinese with English abstract).
- [30] 舒良树, 朱文斌, 王博, 等. 新疆古块体的形成与演化[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 43-60.
Shu Liangshu, Zhu Wenbin, Wang Bo, et al. The formation and evolution of ancient blocks in Xinjiang[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 43-60(in Chinese with English abstract).
- [31] 高俊, 肖序常, 汤耀庆, 等. 西南天山构造地层学初步研究[J]. 地层学杂志, 1995, 19(2): 122-128.
Gao Jun, Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, et al. Some study on the structure and stratigraphy of southwest Tianshan mountains[J]. Journal of Stratigraphy, 1995, 19(2): 122-128(in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- [32] 李继磊, 钱青, 高俊, 等. 西天山昭苏东南部阿登套地区大哈拉军山组火山岩及花岗岩侵入体的地球化学特征、时代和构造环境[J]. 岩石学报, 2010, 26(10): 2913–2924.
- Li Jilei, Qian Qing, Gao Jun, et al. Geochemistry, zircon U–Pb ages and tectonics settings of the Dahalajunshan volcanic rocks and granitic intrusions from the Adengtao area in southeast Zhaosu, western Tianshan mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(10): 2913–2924(in Chinese with English abstract).
- [33] 李日俊, 杨海军, 赵岩, 等. 南天山区域大地构造与演化[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 94–104.
- Li Yuejun, Yang Haijun, Zhao Yan, et al. Tectonic framework and evolution of south Tianshan, NW China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33(1): 94–104(in Chinese with English abstract).
- [34] Allen M B, Windley B F and Zhang C. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tianshan, Central Asia [J]. *Tectonophysics*, 1992, 220: 89–115.
- [35] 李永军, 李注苍, 佟丽莉, 等. 论天山古洋盆关闭的地质时限—来自伊宁地块石炭系的新证据[J]. 岩石学报, 2010, 26(10): 2905–2912.
- Li Yongjun, Li Zhucang, Tong Lili, et al. Revisit the constraints on the closure of the Tianshan ancient oceanic basin: new evidence from Yining block of the Carboniferous[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(10): 2905–2912(in Chinese with English abstract).
- [36] 刘树文, 郭召杰, 张志诚, 等. 中天山东段前寒武纪变质地块的性质: 地质年代学和钕同位素地球化学的约束[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34 (5): 395–403.
- Liu Shuwen, Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng, et al. The property of Precambrian metamorphic block in central Tianshan mountains, Xinjiang: Evidences from geochronology and Nd isotopic chemistry [J]. *Science China(Series D)*, 2004, 34(5): 395–403(in Chinese).
- [37] 马中平, 夏林圻, 徐学义, 等. 南天山北部志留系巴音布鲁克组火山—侵入杂岩的形成环境及构造意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(5): 736–743.
- Ma Zhongping, Xia Linqi, Xu Xueyi, et al. The tectonic setting and implication of volcanic–magmatic complex from the upper Silurian bayinbuluke formation, southern Tianshan[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2006, 36(5): 736–743(in Chinese with English abstract).
- [38] 李永军, 李注仓, 周继兵, 等. 西天山阿吾拉勒一带石炭系岩石地层单位厘定[J]. 岩石学报, 2009, 25(6): 1332–1340.
- Li Yongjun, Li Zhucang, Zhou Jibing, et al. Diversion of the Carboniferous lithostratigraphic units in Awulalearea, western Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(6): 1332–1340(in Chinese with English abstract).
- [39] 张作衡, 王志良, 王彦斌, 等. 新疆西天山菁布拉克基性杂岩体闪长岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 2007, 26 (4): 353–360.
- Zhang Zuoheng, Wang Zhiliang, Wang Yanbin, et al. SHRIMP zircon U–Pb dating of diorite from Qingbulake basic complex in western Tianshan mountains of Xinjiang and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 2007, 26(4): 353–360(in Chinese with English abstract).
- [40] 朱志新, 王克卓, 郑玉洁, 等. 新疆伊犁地块南缘志留纪和泥盆纪花岗岩侵入体锆石 SHRIMP 定年及其形成时构造背景的初步探讨[J]. 岩石学报, 2006, 22(5): 1193–1200.
- Zhu Zhixin, Wang Kezuo, Zheng Yujie, et al. Zircon SHRIMP dating of Silurian and Devonian granitic intrusions in the southern Yili block, Xinjiang and preliminary on their tectonic setting [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1193–1200(in Chinese with English abstract).
- [41] 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁—超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄及其地质意义[J]. 科学通报, 2004, 49(2): 2324–2328.
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, et al. SHRIMP U–Pb zircon age of the mafic–ultramafic rocks and geological significance in the Karatungk and Huangshandong, Xinjiang[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(2): 2324–2328 (in Chinese).
- [42] 安芳, 朱永峰. 西北天山吐拉苏盆地火山岩 SHRIMP 年代学和微量元素地球化学研究[J]. 岩石学报, 2008, 24(12): 2741–2748.
- An Fang, Zhu Yongfeng. Study on trace elements geochemistry and SHRIMP chronology of volcanic rocks in Tulasu basin, northwest Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(12): 2741–2748(in Chinese with English abstract).
- [43] 王博, 舒良树, Cluzel D, 等. 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, 2006, 33(3): 498–508.
- Wang Bo, Shu Liangshu, Cluzel D, et al. Geochemical characteristics and tectonic significance of Carboniferous volcanic rocks in the northern part of the Ili block, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 2006, 33(3): 498–508(in Chinese with English abstract).
- [44] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 天山及邻区石炭纪—早二叠世裂谷火山岩岩石成因[J]. 西北地质, 2008, 41(4): 1–68.
- Xia Linqi, Xia Zhuchun, Xu Xueyi, et al. Petrogenesis of Carboniferous–early Permian rift–related volcanic rocks in the Tianshan and its neighboring areas, northwestern China[J].

- Northwestern Geology, 2008, 41(4): 1-68(in Chinese).
- [45] 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 and metallogenic setting of late Paleozoic iron deposits in western Tianshan mountains of Xinjiang [J]. Mineral Deposits, 2012, 31(5): 941-964(in Chinese with English abstract).
- [46] 万天丰. 新编亚洲大地构造区划图[J]. 中国地质, 2013, 40(5): 1351-1365. Wan Tianfeng. A new Asian tectonic unit map[J]. Geology in China, 2013, 40(5): 1351-1365(in Chinese with English abstract).
- [47] 朱永峰. 中亚成矿域地质矿产研究的若干重要问题[J]. 岩石学报, 2009, 25(6): 1297-1302. Zhu Yongfeng. Some important issues for the studies on the Central Asian metallogeny domain[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(6): 1297-1302(in Chinese with English abstract).
- [48] 李潇林斌, 弓小平, 马华东, 等. 西天山式可布台铁矿火山岩地球化学特征、成岩时代厘定及其构造意义[J]. 中国地质, 2014, 41(6): 1791-1804. Li Xiaolinbin, Gong Xiaoping, Ma Huadong, et al. Geochemical characteristics and petrogenic age of volcanic rocks in the Shikebutai iron deposit of west Tianshan mountains[J]. Geology in China, 2014, 41(6): 1791-1804 (in Chinese with English abstract).
- [49] 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).
- [50] Zhang Z H, Hong W, Jiang Z S, et al. geological characteristics and metallogenesis of iron deposits in western Tianshan, China[J]. Ore Geology Review, 2014, 57: 425-440.
- [51] Duan S G, Zhang Z H, Jiang Z S, et al. Geology, Geochemistry and geochronology of the Dundu iron-zinc ore deposit in western Tianshan, China[J]. Ore Geology Review, 2014, 57: 441-461.
- [52] Jiang Z S, Zhang Z H, Wang Z H, et al. Geology, geochemistry and geochronology of the Zhibo iron deposit in the western Tianshan, NW China: Constraints on metallogenesis and tectonic setting[J]. Ore Geology Review, 2014, 57: 406-424.
- [53] 段士刚, 张作衡, 魏梦元, 等. 新疆西天山雾岭铁矿闪长岩地球化学及锆石 U-Pb 年代学[J]. 中国地质, 2014, 41(6): 1757-1770. Duan Shigang, Zhang Zuoheng, Wei Mengyuan, et al. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of the diorite associated with the Wuling iron deposit in western Tianshan mountains, Xinjiang[J]. Geology in China, 2014, 41(6): 1757-1770(in Chinese with English abstract).
- [54] 郑仁乔, 段士刚, 张作衡, 等. 新疆西天山阿克萨依铁矿床地质及地球化学特征[J]. 矿床地质, 2014, 33(2): 255-270. Zheng Renqiao, Duan Shigang, Zhang Zuoheng, et al. Geological and geochemical characteristics of Akesayi iron deposit in western Tianshan mountains, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2014, 33(2): 255-270(in Chinese with English abstract).
- [55] 龙灵利, 王玉往, 唐萍芝, 等. 西天山 Cu Ni-V Ti Fe 复合型矿化镁铁-超镁铁杂岩-哈拉达拉岩体成岩成矿背景特殊性讨论[J]. 岩石学报, 2012, 28(7): 2015-2028. Long Lingli, Wang Yuwang, Tang Pingzhi, et al. A debate on the special circumstance of rockforming and ore-forming of Haladala pluton, a mafic-ultramafic complex related to Cu Ni-V Ti Fe composite mineralization, in western Tianshan[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(7): 2015-2028(in Chinese with English abstract).
- [56] 薛云兴, 朱永峰. 西南天山哈拉达拉岩体的锆石 SHRIMP 年代学及地球化学研究[J]. 岩石学报, 2009, 25(6): 1353-1363. Xue Yunxing, Zhu Yongfeng. Zircon SHRIMP chronology and geochemistry of the Haladala gabbro in southwestern Tianshan mountains[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(6): 1353-1363 (in Chinese with English abstract).
- [57] 朱志敏, 赵振华, 熊小林, 等. 西天山特克斯晚古生代辉长岩岩石地球化学[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(6): 675-690. Zhu Zhimin, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, et al. Petrogeochemistry of late Paleozoic gabbroic rocks from Tekes county in west Tianshan mountains[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2010, 29(6): 675-690(in Chinese with English abstract).
- [58] McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth[J]. Chemical Geology, 1995, 120: 223-253.
- [59] 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石样品 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 2002, 48(S): 26-30. Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, et al. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. Geological Review, 2002, 48 (S): 26-30(in Chinese with English abstract).
- [60] 简平, 刘敦一, 张旗, 等. 蛇绿岩及蛇绿岩中浅色岩的 SHRIMP U-Pb 测年[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 439-456. Jian Ping, Liu Dunyi, Zhang Qi, et al. SHRIMP dating of rocks of phiolite and leucocratic within phiolite[J]. Earth Science

- Frontiers, 2003, 10(4): 439–456(in Chinese with English abstract).
- [61] 黄小文, 漆亮, 王怡昌, 等. 东天山沙泉子铜铁矿床磁铁矿 Re–Os 定年初探[J]. 中国科学(D辑), 2014, 44(4): 606–615.
- Huang Xiaowen, Qi Liang, Wang Yichang, et al. Re–Os dating of magnetite from the Shaquanzi Fe–Cu deposit, eastern Tianshan, NW China[J]. Science in China(Series D), 2014, 44(4): 606–615 (in Chinese).
- [62] Qi L, Zhou M F, Gao J, et al. An improved Carius tube technique for determination of low concentrations of Re and Os in pyrites[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2010, 25: 585–589.
- [63] Qi L, Zhou M F, Wang C Y, et al. Evaluation of a technique for determining Re and PGEs in geological samples by ICP–MS coupled with a modified Carius tube digestion[J]. Geochemical Journal, 2007, 41: 407–414.
- [64] 黄小文, 漆亮, 刘莹莹. 磁铁矿 Re–Os 定年的可行性探讨[J]. 矿床地质, 2010, 29(S): 825–826.
- Huang Xiaowen, Qi Liang, Liu Yinyin. Some study on Re–Os isotopic dating of magnetite[J]. Mineral Deposits, 2010, 29(S): 825–826(in Chinese).
- [65] 黄小文, 漆亮, 刘莹莹, 等. 黄铁矿 Re–Os 同位素定年化学前处理若干条件初探[J]. 地球化学, 2012, 41: 380–386.
- Huang Xiaowen, Qi Liang, Liu Yinyin, et al. Some conditions before chemical handling with Re–Os isotopic dating of pyrite[J]. Earth Chemistry, 2012, 41: 380–386(in Chinese).
- [66] 孙吉明, 马中平, 徐学义, 等. 新疆西天山备战铁矿流纹岩的形成时代及其地质意义[J]. 地质通报, 2012, 31(12): 1973–1982.
- Sun Jiming, Ma Zongping, Xu Xueyi, et al. The formation epoch of the host wall rock of the Beizhan iron deposit in western Tianshan mountains of Xinjiang and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(12): 1973–1982(in Chinese with English abstract).
- [67] 韩琼, 弓小平, 毛磊, 等. 西天山备战铁矿成岩年代厘定及矿床成因研究[J]. 新疆地质, 2013, 31(2): 136–140.
- Han Qiong, Gong Xiaoping, Mao Lei, et al. Study on the metallogenic epoch and mineral genesis of Beizhan iron ore in western Tianshan[J]. Xinjiang Geology, 2013, 31(2): 36–140(in Chinese with English abstract).
- [68] Zhang X, Tian J Q, Gao J, et al. Geochronology and geochemistry of granitoid rocks from the Zhibo syngenetic volcanogenic iron ore deposit in the western Tianshan mountains (NW–China): constraints on the age of mineralization and tectonic setting[J]. Gondwana Research, 2012, 22: 585–596.
- [69] Duan S G, Zhang Z H, Jiang Z S, 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.
- [70] 张芳荣, 程春华, 余泉, 等. 西天山乌孙山一带大哈拉军山组火山岩 LA–ICP–MS 锆石 U–b 定年[J]. 新疆地质, 2009, 27(3): 231–235.
- Zhang Fangrong, Chen Chunhua, Yu qing, et al. LA–ICP–MS zircon U–Pb dating of volcanic rocks from Dahalajunshan formation, Wusunshan mountains in west Tianshan[J]. Xinjiang Geology, 2009, 27(3): 231–235 (in Chinese with English abstract).
- [71] 牛贺才, 罗勇, 李宁波, 等. 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), 2012, 48(3): 256–265.
- Niu Hecai, Luo Yong, Li Ningbo, et al. Study on the Cu–mineralization of the Chagangnuoer Fe–deposit in the Awulale area, Xinjiang [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2012, 48(3): 256–265(in Chinese with English abstract).
- [72] 顾连兴, 胡受奚, 于春水, 等. 论博格达俯冲断裂裂谷的形成与演化[J]. 岩石学报, 2001, 17(4): 585–597.
- Gu Lianxing, Hu Shouxi, Yu Chunshui, et al. Initiation and evolution of the Bogda subduction–torn–type rift[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(4): 585–597(in Chinese with English abstract).
- [73] 顾连兴, 胡受奚, 于春水, 等. 博格达陆内碰撞造山带挤压–拉伸构造转折期的侵入活动[J]. 岩石学报, 2001, 17(2): 187–198.
- Gu Lianxing, Hu Shouxi, Yu Chunshui, et al. Intrusive activities during compression–extension tectonic conversion in the Bogda intracontinental orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(2): 187–198(in Chinese with English abstract).
- [74] 孙林华, 彭头平, 王岳军. 新疆特克斯东南大哈拉军山组玄武安山岩地球化学特征: 岩石成因和构造背景探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(3): 372–379.
- Sun Linhua, Peng Touping, Wang Yuejun. Geochemical characteristics of basaltic andesites from Dahalajunshan Formation, southeastern Tekesi (Xinjiang): petrogenesis and its tectonic significance[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31(3): 372–379 (in Chinese with English abstract).
- [75] 朱炳泉, 刘北玲, 李献华. 大陆与大洋地幔 Nd–Sr–Pb 同位素特征与三组分混合–四体系再循环模式 [J]. 中国科学(B 辑), 1998, (10): 1092–1102.
- Zhu Binquan, Liu Beiling, Li Xianhua. The Nd–Sr–Pb isotopic feature of continental and oceanic mantle and the model of recycledtrimaceral mixing–quaternary recycled system.[J]. Science in China(Series B), 1998, (10): 1092–1102(in Chinese).

- [76] 周新华, 张国辉, 杨进辉, 等. 华北克拉通北缘晚中生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素填图及其构造意义[J]. 地球化学, 2001, 30(1): 10-23.
Zhou Xinhua, Zhang Guohui, Yang Jinhui, et al. Sr-Nd-Pb isotope mapping of late Mesozoic volcanic rocks across northern margin of north China craton and implications to geodynamic processes[J]. Geochimica, 2001, 30(1): 10-23(in Chinese with English abstract).
- [77] 李注苍, 李永军, 李景宏, 等. 西天山阿吾拉勒一带大哈拉军山组火山岩地球化学特征及构造环境分析[J]. 新疆地质, 2006, 24(2): 120-124.
Li Zhucang, Li Yongjun, Li Jinghong, et al. Geochemical characteristics of the Dahalajunshan formation volcanic rocks and their implications on the tectonic setting in Awulale area[J]. Xinjiang Geology, 2006, 24(2): 120-124(in Chinese with English abstract).
- [78] 茹艳娇, 徐学义, 李智佩, 等. 西天山乌孙山地区大哈拉军山组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造环境[J]. 地质通报, 2012, 31(1): 50-62.
Ru Yanjiao, Xu Xueyi, Li Zhipei, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and tectonic background of the Dahalajunshan formation volcanic rocks in Wusun Shan area, west Tianshan mountains [J]. Geological Bulletin of China, 31(1): 50-62(in Chinese with English abstract).
- [79] Zhang Z C, Hou T, Santosh M, 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.
- [80] Li Y H, Hou K J, Wan D F, et al. Precambrian banded iron formations in the north China craton: silicon and oxygen isotopes and genetic implications[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 57: 299-307.
- [81] 徐志刚. 中国东部中生代陆相火山岩型铁矿成矿北京和火山岩浆性质[J]. 矿床地质, 1986, 5(1): 13-25.
Xu Zhigang. Ore-forming background and characteristics of magmas of the Mesozoic volcanic iron deposits in east China[J]. Mineral Deposits, 1986, 5(1): 13-25 (in Chinese with English abstract).
- [82] Henriquez F, Martin R F. Crystal-growth textures in magnetite flows and Feeder Dykes, El Laco, Chile[J]. Canadian Mineralogist, 1978, 16: 581-589.
- [83] 余金杰, 毛景文. Kiruna 型铁矿床基本地质特征和成矿环境[J]. 矿床地质, 2002, 21: 83-86.
Yu Jinjie, Mao Jingwen. Geology and ore-forming environment of Kiruna-type iron deposits[J]. Mineral Deposits, 2002, 21: 83-86(in Chinese with English abstract).
- [84] Philpotts A R. Origin of certain iron-titanium oxide and apatite rocks[J]. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, 1967, 62(3): 303-315.
- [85] 苏良赫. 液相不共溶在岩石学及矿床学中的重要性[J]. 地球科学, 1984, 1: 1-12.
Su Lianghe, The importance of liquid immiscibility on lithology and mineralogy [J]. Earth Science, 1984, 1: 1-12 (in Chinese with English abstract).
- [86] 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): 8-12.
Lu Zongliu, Mo Jiangping. Geological characters and ore genesis of Awulale iron-rich deposit in Xinjiang [J]. Geology and Prospecting, 2006, 42(5): 8-12(in Chinese with English abstract).
- [87] 吴利仁. 我国东部中生代陆相火山岩宁芜型铁矿形成的基本原理[J]. 地质与勘探, 1978, 6: 1-8.
Wu Liren. Fundament of forming of the Mesozoic Ningwu-type volcanic iron deposits in east China[J]. Geology and Exploration, 1978, 6: 1-8 (in Chinese with English abstract).