

西昆仑大红柳滩铁矿床矿物电子探针化学成分和赤铁矿氧同位素特征研究

胡 军^{1*}, 王 核², 徐德明¹, 王 磊¹, 周 岱¹, 王祥东¹

(1. 中国地质调查局 武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205; 2. 中国科学院 广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640)

摘 要: 位于西昆仑甜水海地块东段的大红柳滩铁矿床是近年来发现的新元古代大型赤铁矿床。本文开展了详细的岩相学、电子探针(EPMA)和赤铁矿氧同位素分析, 首次对该矿床矿石矿物特征进行了系统的研究, 识别出 3 种白云石类矿物, 分别为白云石、含铁白云石和铁白云石, 根据矿石组构和矿物共生关系等特征, 将成矿过程划分为沉积-成岩期、变质变形期和表生氧化期 3 个成矿期, 其中沉积-成岩期形成的赤铁矿主要呈尘埃状、微细粒他形和自形-半自形结构, 变质变形期和表生氧化期形成的赤铁矿主要呈板状-针柱状和重结晶他形粒状-显微鳞片状结构, 矿物化学成分规律性的变化表明矿石中 Fe 元素的富集可能伴随着 Mn、Mg 和 Ca 元素的迁出, 赤铁矿中普遍较高的 MnO 含量可能为赤铁矿中含类质同象的 Mn 所致。大红柳滩铁矿床与国内外成矿阶段类似的条带状铁建造(BIF)型富铁矿具有可比较的氧同位素特征, 其中石英-赤铁矿型富矿石中的赤铁矿 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $-3.9\text{‰} \sim -0.9\text{‰}$, 贫 $^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 的特征表明变质热液流体和大气降水参与了富铁矿的形成过程, 综合分析认为变质变形期和表生氧化期为富铁矿形成的重要阶段。

关键词: 矿物化学成分; 氧同位素; 大红柳滩铁矿床; 甜水海地块; 西昆仑

中图分类号: P611 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2019)05-0458-10

DOI: 10.19700/j.0379-1726.2019.05.003

Study of mineral electron probe micro analysis (EPMA) chemistry and hematite oxygen isotopes at the Dahongliutan iron deposit, West Kunlun

HU Jun^{1*}, WANG He², XU De-ming¹, WANG Lei¹, ZHOU Dai¹ and WANG Xiang-dong¹

1. Wuhan Center of Geological Survey, China Geological Survey, Wuhan 430205, China;

2. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract: The newly discovered large-scale Neoproterozoic Dahongliutan hematite-rich iron deposit is located in the eastern part of the Tianshuihai terrane, West Kunlun. In this paper, we present the first integrated study on ore minerals based on microscopic observation of thin and polished sections, as well as EPMA and O isotope analysis. Three kinds of dolomite minerals, including dolomite, ferroan dolomite, and ankerite were found at this site. According to the ore textures and characteristics of mineral paragenesis, the formation of the Dahongliutan iron deposit can be divided into three metallogenic stages: depositional-diagenetic, metamorphic, and supergene oxidation periods. Hematite dust and fine anhedral and euhedral to subhedral hematite were formed in depositional-diagenetic stage, whereas (micro)-platy and recrystallized hematite were formed during the metamorphic and supergene oxidation stages. A regular change in the mineral chemistry indicated that the enrichment of Fe was accompanied by the movement of Mn, Mg, and Ca. Furthermore, the generally high MnO content in hematite may be attributed to the isomorphism of Mn in hematite. The oxygen isotope compositions of

收稿日期(Received): 2018-12-24; 改回日期(Revised): 2019-05-05; 接受日期(Accepted): 2019-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(41602063); 中国地质调查局地质矿产调查项目(DD20190047)

作者简介: 胡军(1988-), 男, 助理研究员, 主要从事矿床学研究。

* 通讯作者(Corresponding author): HU Jun, E-mail: aa226039@126.com; Tel: +86-27-81381970

the Dahongliutan iron deposit were comparable to those known for typical high-grade BIF-hosted iron ore deposits, whose ore-forming stages are similar to those of the Dahongliutan iron deposit. The $\delta^{18}\text{O}$ values of hematite in the rich ores of quartz-hematite type ranged from -3.9% to -0.9% . The negative $\delta^{18}\text{O}$ values imply that the metamorphosed hydrothermal fluids and meteoric water played an important role in the formation of rich ores. In summary, rich ores were mainly formed during the metamorphic and supergene oxidation periods.

Key words: mineral chemistry; oxygen isotope; Dahongliutan iron deposit; Tianshuihai terrane; west Kunlun

0 引言

近年来在西昆仑甜水海地块前寒武纪地层中发现了 2 个重要的含铁沉积变质带: 一是塔什库尔干县一带布伦阔勒群中产出多个沉积变质型磁铁矿, 自北至南产出有塔阿西、叶里克、老并、赞坎和莫喀尔等矿床^[1-7]; 二是黑孜干-大红柳滩一带产出有大红柳滩赤铁矿床、黑孜干赤铁矿床和阿克苏依铁锰矿床等数个大中型沉积变质型铁矿^[6-7]。笔者前期对大红柳滩铁矿床的地质特征和成岩成矿时代开展了研究, 限定成矿时代为 532~593 Ma, 认为该矿床为新元古代苏比利尔湖型富赤铁矿床, 不仅能够反演甜水海地块新元古代缺氧富铁的古海洋环境, 而且其巨大的深部找矿潜力和特殊的成矿类型, 为西昆仑铁矿的下一步找矿指明了方向^[8-9]。虽然笔者开展了一些研究工作, 但系统的矿物地球化学和矿物同位素特征研究仍然匮乏。

本研究拟在详细野外观察的基础之上, 通过室内大量光薄片鉴定及电子探针(EPMA)分析, 确定矿物形成的先后顺序、矿床成矿期次及不同成矿期矿物元素地球化学特征, 结合赤铁矿氧同位素特征, 分析矿石矿物成因, 以期探讨大红柳滩铁矿床形成过程和富铁矿形成机理研究提供更多的有效信息。

1 区域及矿床地质特征

西昆仑造山带总体呈现 NW-SE 走向的巨型反“S”状展布, 由北向南为奥依塔格-库地缝合带、麻扎-康西瓦缝合带、乔尔天山-红山湖缝合带将其分为北昆仑地块、南昆仑地块、甜水海地块和喀喇昆仑地块^[10-12](图 1a)。

大红柳滩铁矿床构造位置上处于甜水海地块东段(图 1a), 区域出露地层主要有震旦系、寒武系、志留系和三叠系, 其中甜水海岩群为一套滨浅海低绿片岩相碎屑岩夹碳酸盐岩, 岩性主要为硬绿泥石千

枚岩、片理化泥质板岩、绿泥钙质片岩夹片理化粉砂岩、大理岩和白云岩。区域性康西瓦大断裂严格控制着该区地层及岩浆岩的展布方向, 共同构成巨大的近 EW 向构造隆起带^[6,7,9]。

矿区出露地层主要为震旦系甜水海岩群和第四系, 其中甜水海岩群为铁矿体赋矿层位, 赋矿岩性组合主要为硬绿泥石白云母石英片岩、白云母石英片岩、硅化方解石大理岩和含铁白云质大理岩(图 1b)。受区域性大断裂和岩体侵位的影响, 矿区内发育小规模波状褶曲和强烈的脆韧性变形, 导致局部地层和矿体形成一系列“V”型褶皱。矿区外围侵入加里东期中粒含斑黑云母二长花岗岩、少量中细粒黑云母二长花岗岩, 矿区内以加里东期变辉长岩脉为主。矿区内区域变质作用普遍发育, 变质程度达低绿片岩相。动力变质作用主要包括塑性变形和脆性变形 2 种形式, 前者为褶皱变形、拉伸线理和定向构造等, 后者表现为地层错移和岩石挤压破碎等, 局部铁矿体发生褶皱变形, 矿体形态和矿石质量受后期改造^[6,7,9]。

矿区目前发现几十条铁矿体, 分为南、北两个矿带(图 1b)。北矿带整体近 EW 走向断续延伸约 5 km, 地表出露宽度 3~150 m; 南矿带地表出露长度近 12 km, 地表出露宽度 2~32 m。矿体主要呈较稳定层状、似层状或者透镜状断续产出, 受地层变形控制, 矿体部分走向由 NW 转向 NE, 层控特征明显, 矿石整体品位 18%~53%, 平均品位达 38%。

2 矿石矿物特征

2.1 矿石类型、组构及矿物组成

矿石主要分为以下 4 种类型: (1) 石英-赤铁矿型矿石(类型-1)为矿区最主要的矿石类型, 占矿物总储量的 90%左右, 主要由石英、赤铁矿和少量白云母组成(图 2a, 图 2f~图 2i); (2) 石英-白云母-白云石-方解石-赤铁矿型矿石(类型-2)主要由石英、白云母、白云石、方解石、赤铁矿和褐铁矿组成, 矿石矿物

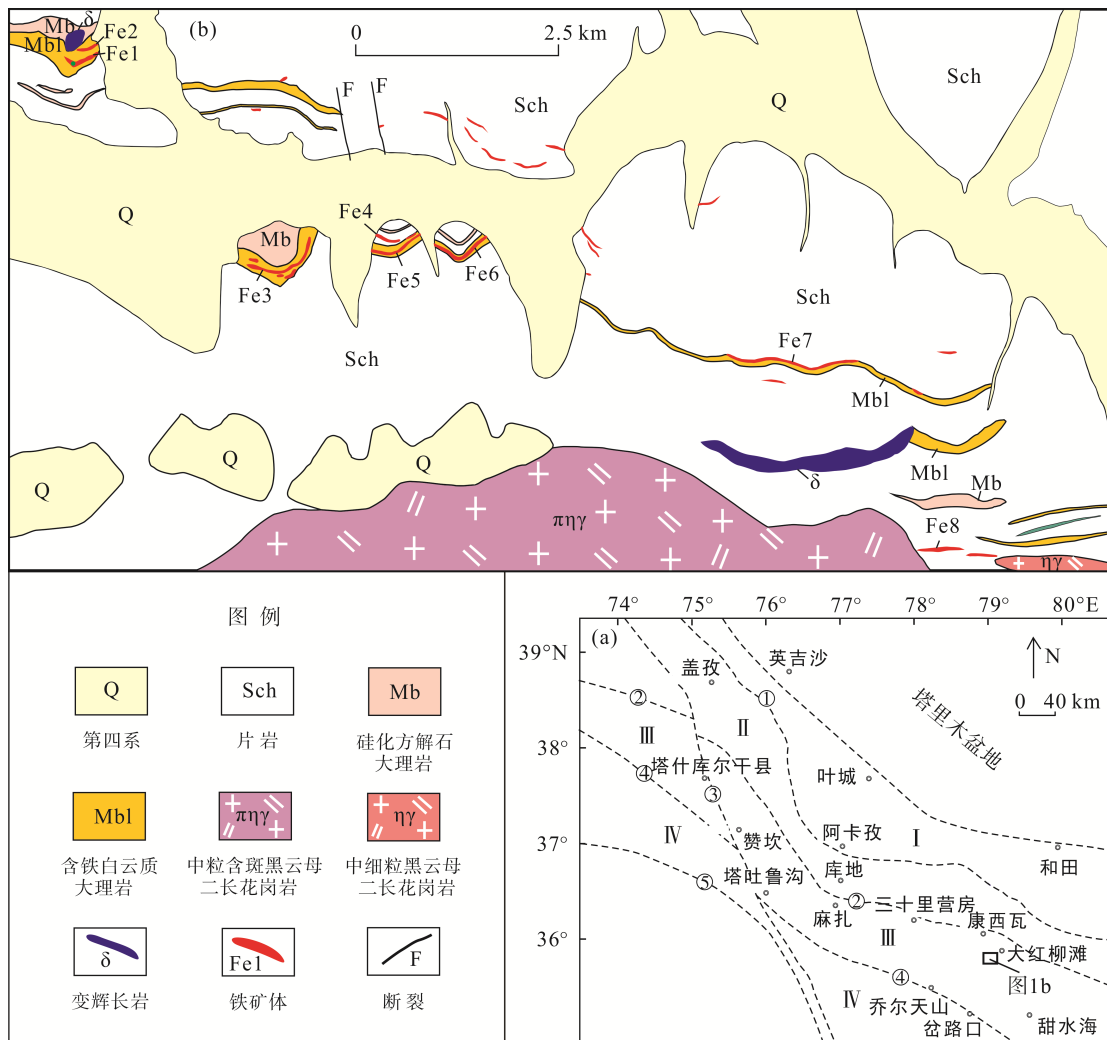


图1 西昆仑地区大地构造位置(a)和大红柳滩铁矿床地质简图(b)^[7,9]

Fig.1 Geological location of West Kunlun (a) and a simplified geological map of the Dahongliutan iron deposit (b)^[7,9]

I—北昆仑地块; II—南昆仑地块; III—甜水海地块; IV—喀喇昆仑地块。①—奥依塔格-库地缝合带; ②—麻扎-康西瓦缝合带; ③—喀喇昆仑断裂; ④—乔尔天山-红山湖缝合带; ⑤—班公湖-怒江缝合带
I—North Kunlun terrane; II—South Kunlun terrane; III—Tianshuihai terrane; IV—Karakorum terrane; ①—Oytagge-Kudi suture; ②—Mazha-Kangxiwa suture; ③—Karakorum fault; ④—Qiaortianshan-Hongshanhu suture; ⑤—Bangonghu-Nujiang suture

和脉石矿物形成韵律层,宽度为0.25~25 mm不等(图2c);(3) 石英-铁白云石-赤铁矿型矿石(类型-3)主要由铁白云石、含铁白云石、石英、赤铁矿和少量白云母组成,该类型矿石含铁品位低,多与类型-2及含铁白云质大理岩互层产出,钻孔中和镜下常见到0.35~30 mm的石英、铁白云石条带和0.1~0.5 mm的赤铁矿条带互层(图2b,图2d);(4) 石英-菱铁矿-赤铁矿型矿石(类型-4)主要由菱铁矿、石英、赤铁矿及少量白云母组成(图2e),可见1~5 mm的石英条带和1~5 cm的赤铁矿和菱铁矿条带互层产出^[6]。

矿石结构主要包括鳞片变晶(图2h,图2i)、粒状变晶、交代结构(图2e)、变余砂状结构(图2f)、他形粒状结构及包含结构(图2d,图2g);矿石构造主

要为条带状构造(图2b~图2e)、块状构造(图2a,图2h,图2i)和揉皱构造(图2b),其中条带状矿石最为发育,主要由赤铁矿、菱铁矿、石英、方解石、白云石、含铁白云石、铁白云石和白云母组成的互层条带构成,宏观条带(>2.54 cm)基本未见,主要发育中等条带(1.7 mm~2.54 cm)和微观条带(0.3~1.7 mm);块状构造富矿石主要由赤铁矿、石英及少量白云母组成,矿物呈无定向密集分布在矿石中。矿石矿物主要为赤铁矿,次为菱铁矿和褐铁矿;脉石矿物主要为石英、白云石、铁白云石、含铁白云石、方解石和白云母等。

2.2 赤铁矿和菱铁矿

赤铁矿主要呈尘埃状(赤铁矿-1)、微细粒他形

(赤铁矿-2)、自形-半自形(赤铁矿-3)、板状-针柱状(赤铁矿-4)和重结晶他形粒状-显微鳞片状(赤铁矿-5) 5种形态。赤铁矿-1(图 2f) 粒度极细(<1 μm), 含量较少, 分布在类型-1 矿石中, 局部可见与石英组成变余砂状结构, 没有显示出任何的交代结构, 代表了原始的沉积特征; 赤铁矿-2(图 2d, 图 2g)主要分布在条带状类型-2 和类型-3 矿石中, 少量分布在类型

-1 矿石中, 呈微细粒他形结构, 多被石英、方解石和白云石类矿物包裹; 赤铁矿-3(图 2c, 图 2g)为自形-半自形晶体, 粒度较大, 宽度分布在 60~150 μm 之间, 长度分布在 80~200 μm 之间, 主要发育在条带状类型-1、类型-2 和类型-3 矿石中, 与白云石、含铁白云石、铁白云石、方解石、石英和白云母共生; 赤铁矿-4(图 2d, 图 2e, 图 2g)长度分布在 80~320 μm

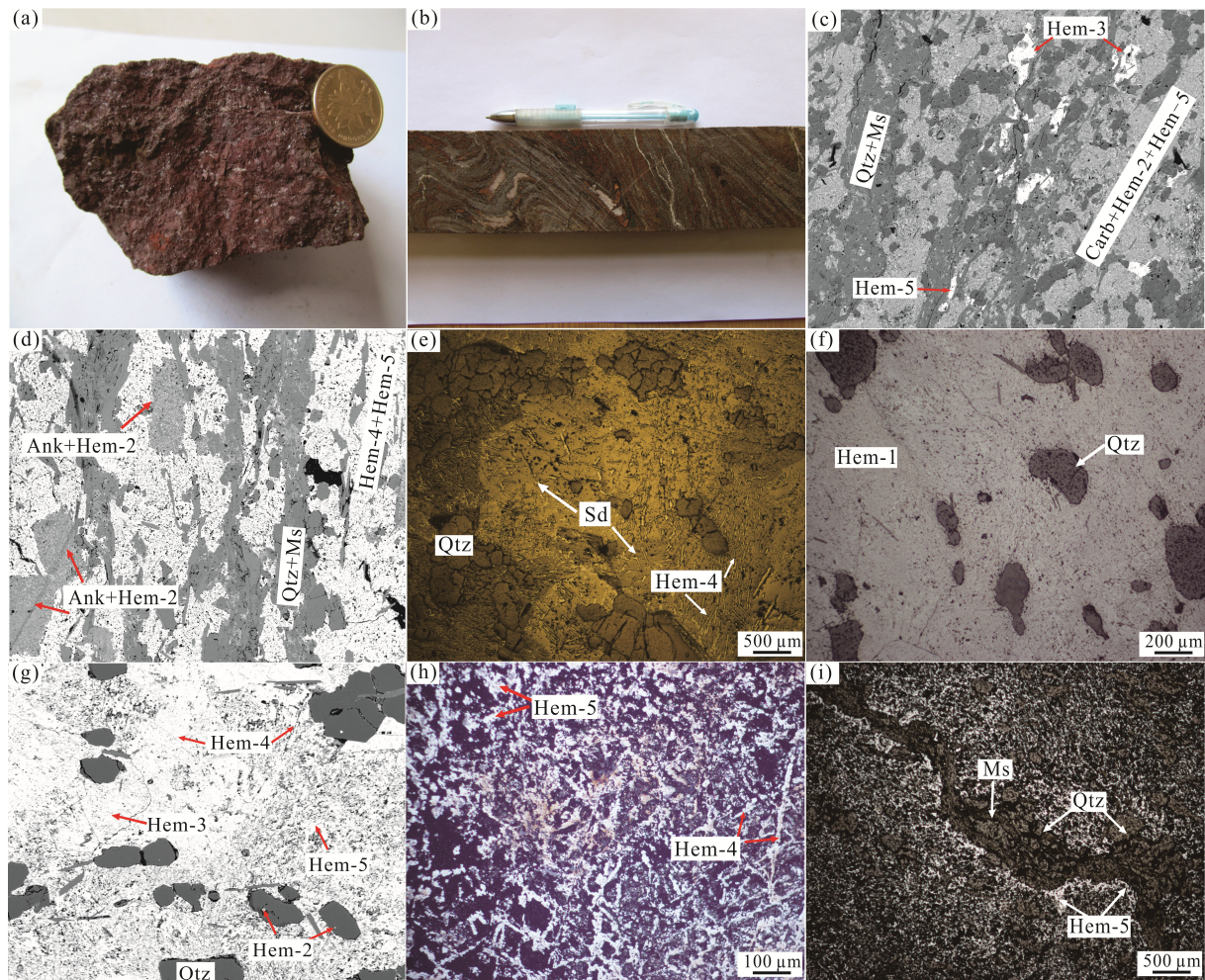


图 2 大红柳滩铁矿床矿石手标本和矿物显微结构照片

Fig.2 Hand specimen of ore and mineral microphotographs from the Dahongliutan iron deposit

a-块状类型-1 矿石; b-类型-3 矿石的揉皱构造; c-类型-2 矿石的条带状构造。赤铁矿-2 呈星点状被白云石和方解石包裹; 自形-半自形赤铁矿-3 中包含自形的白云石, 分布在石英和白云母组成的微细条带中; 赤铁矿-5 局部呈定向集合体状与白云母共生(背散射电子图像); d-类型-3 矿石的条带状构造, 赤铁矿-2 呈星点状分布在铁白云石和含铁白云石矿物颗粒中(背散射电子图像); e-类型-4 矿石的条带状构造, 赤铁矿-4 呈网格状交代菱铁矿(反射光); f-赤铁矿-1 和石英组成的变余砂状结构(反射光); g-类型-1 矿石中包含不同晶型的赤铁矿, 其中赤铁矿-2 呈微细粒他形结构被石英包裹(背散射电子图像); h-块状类型-1 矿石、赤铁矿-4 和赤铁矿-5 共生(反射光); i-类型-1 矿石鳞片变晶结构, 赤铁矿-5 呈定向集合体状、他形石英和片状白云母呈定向拉长且发生褶皱(反射光)。Qtz-石英; Hem-赤铁矿; Ank-铁白云石、含铁白云石; Sd-菱铁矿; Carb-碳酸盐矿物; Ms-白云母

a-massive type 1 ore; b-folded type 3 ore; c-banded structure of type 2 ore, fine anhedral hematite-2 found within dolomite and calcite; large euhedral to subhedral hematite-3 containing euhedral dolomite occurred in microbands composed of quartz and muscovite; hematite-5 locally forming orientational elongated aggregates intergrown with muscovite (BSE image); d-banded structure of type 3 ore, hematite-2 dispersed within rhombic ankerite grains (BSE image); e-banded structure of type 4 ore, hematite-4 replaced siderite, along edges of siderite grains or cutting the siderite grains (reflected light); f-hematite-1, together with quartz, constitute blastopsammitic texture in type 1 ore (Reflected light); g-type 1 ore contain hematite grains of different forms, quartz granules containing hematite-2 inclusions (BSE image); h-massive type 1 ore, hematite-4 and hematite-5 are intergrown (reflected light); i-type 1 ore exhibiting lepidoblastic texture, hematite-5 forming orientational elongated aggregates intergrown with elongated and folded anhedral quartz and flake muscovite (reflected light). Qtz-quartz; Hem-hematite; Ank-ankerite; Sd-siderite; Carb-carbonate minerals; Ms-muscovite

之间,宽度分布在 5~50 μm 之间,主要分布在块状类型-1、类型-3 矿石和条带状类型-4 矿石中,在块状富铁矿石中,赤铁矿-4 与赤铁矿-5、石英共生,在类型-4 矿石中,赤铁矿-4 呈网格状交代菱铁矿(图 2e);赤铁矿-5(图 2h~图 2i)在各种类型矿石中均有分布,多呈粒状集合体形式出现,粒径分布在 5~100 μm 之间,在条带状类型-1 矿石中,呈定向拉长集合体状与他形石英共生,在条带状类型-2 和类型-3 矿石中,与白云母、白云石、含铁白云石、铁白云石和方解石共生。菱铁矿呈他形-半自形粒状结构,粒径大于 200 μm ,与他形粒状石英形呈条带状展布,被赤铁矿-4 呈网格状交代(图 2e)。

3 成矿期次和成矿阶段

通过综合分析野外地质现象、矿石组构、矿物共生关系、产出特征和前期开展的研究工作^[7],大致将该矿床演化期次划分为 3 期:(1) 沉积-成岩期;(2) 变质变形期;(3) 表生氧化期(图 3)。各期次成矿特征、矿石特征和矿物共生组合如下。

矿物名称	沉积-成岩期	变质变形期	表生氧化期
赤铁矿-1	■		
赤铁矿-2	■		
赤铁矿-3	■		
赤铁矿-4		■	■
赤铁矿-5		■	■
菱铁矿	■		
褐铁矿			■
石英	■	■	
铁白云石		■	
含铁白云石		■	
白云石		■	
方解石		■	
硬绿泥石		■	
白云母		■	

图 3 大红柳滩铁矿床主要矿物生成顺序

Fig.3 Mineral paragenesis diagram of the Dahongliutan iron deposit

(1) 沉积-成岩期

该期次所形成的矿物组合为赤铁矿-1、赤铁矿-2、赤铁矿-3、菱铁矿、石英、白云石、含铁白云石、铁白云石和方解石。其中赤铁矿和菱铁矿多已经发生重结晶或者被后期矿物所交代,所形成的沉积构造也被改造为铁矿体中广泛发育的条带状或者块状构造,仅小部分矿石中可见变余砂状结构。

(2) 变质变形期

受区域绿片岩相变质作用和动力变质作用的影响,沉积-成岩期形成的铁矿石进一步富集,赤铁矿

发生变质重结晶作用,形成了赤铁矿-5,在条带状矿石中,常见赤铁矿与石英、云母呈定向拉长排列,区域构造应力作用导致矿体发生了塑性变形,主要表现在矿体和矿石的条带状构造发生褶曲。该期次形成的矿物组合为赤铁矿-4、赤铁矿-5、石英、白云母、硬绿泥石、白云石、含铁白云石、铁白云石和方解石。

(3) 表生氧化期

铁矿体在遭受一系列变质变形之后抬升到地表被氧化,氧化作用既可能包括地表大气的氧化作用,也可能包括来源于深部或者浅部流体的氧化作用,一部分菱铁矿被氧化成赤铁矿,该期次主要矿物组合为赤铁矿-4 和褐铁矿。

4 样品特征及测试方法

4.1 EPMA 分析

EPMA 分析是在详细室内光薄片观察的基础上,兼顾矿石类型、组构、矿物组合及矿物形态差异,选择不同成矿期内的典型矿石样品开展测试工作。典型矿石均取自矿区钻孔,样品新鲜,包括石英-赤铁矿型矿石 4 件、石英-白云母-白云石-方解石-赤铁矿型矿石 3 件、石英-铁白云石-赤铁矿型矿石 3 件和石英-菱铁矿-赤铁矿型矿石 2 件。测试工作在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成,实验仪器为 EMPA-1600 分析仪,本次重点开展背散射电子像(BSE)观察和成分定量分析 2 个方面的研究。工作条件如下:加速电压 15 kV,电子束流大小为 1×10^{-8} A,电子束半径 1~3 μm ,检出限为 0.1%。

4.2 氧同位素

测试氧同位素的 6 件赤铁矿样品选自于石英-赤铁矿型矿石,其中 5 件取自钻孔岩芯,1 件取自探槽,样品新鲜,品位高(TFe > 50%)。将样品破碎后,用酒精清洗、干燥后在双目镜下挑选赤铁矿单矿物,纯度达 98%以上。尽管前文识别出 5 种不同晶型的赤铁矿,但是由于挑选过程中无法明确区分,因此进行测试分析的赤铁矿是赤铁矿 1~5 的混合样品。将挑选出的赤铁矿在核工业北京地质研究院分析测试研究中心进行氧同位素测试工作,分析方法采用五氟化溴(BrF₅)法,分析值采用国际标准 SMOW 给出,分析精度为 $\pm 0.2\%$ 。

5 测试结果

5.1 矿物 EMPA 分析

EMPA 分析测试结果见表 1, 由于测试点数较多 (166 点), 具体测试结果可见图 4 和文中分析, 表 1 中只列举了矿物化学成分的平均值、最小值和最大值, 分析结果如下。

(1) 赤铁矿

沉积-成岩期形成的赤铁矿-1、赤铁矿-2 和赤铁矿-3 化学成分变化较为一致, 没有明显的差别。FeO 含量分布在 62.72%~78.59% 之间, 平均值为 72.24%; MnO 含量分布在 0.47%~10.60% 之间, 平均值为 3.91%; MgO 含量分布在 0.65%~8.71% 之间, 平均值为 2.99%; SiO₂ 含量分布在 0.72%~3.59% 之间, 平均值为 2.53%。

变质变形期和表生氧化期形成的赤铁矿-4 和赤铁矿-5 成分变化较为一致, 与沉积-成岩期相比, FeO 含量明显增高, MnO 和 MgO 含量降低, SiO₂ 含量变化不大, 其中 FeO 含量分布在 75.63%~83.61% 之间, 平均值为 80.08%; MnO 含量分布在 0.28%~4.18% 之间, 平均值为 1.28%; MgO 含量分布在 0.34%~3.86% 之间, 平均值为 1.50%; SiO₂ 含量分布在 0.04%~3.45% 之间, 平均值为 2.16%。

(2) 菱铁矿

铁矿中 FeO 含量分布在 47.00%~52.45%, 平均值为 49.84%, MnO 含量分布在 1.52%~2.66% 之间, 平均值为 1.89%, MgO 含量分布在 3.61%~9.11% 之间, 平均值为 6.19%。

(3) 白云石类矿物

根据矿物学上的严格规定^[13]: 当 FeO>MgO(含量)时, 为铁白云石; 若 FeO<MgO(含量)时, 则为含

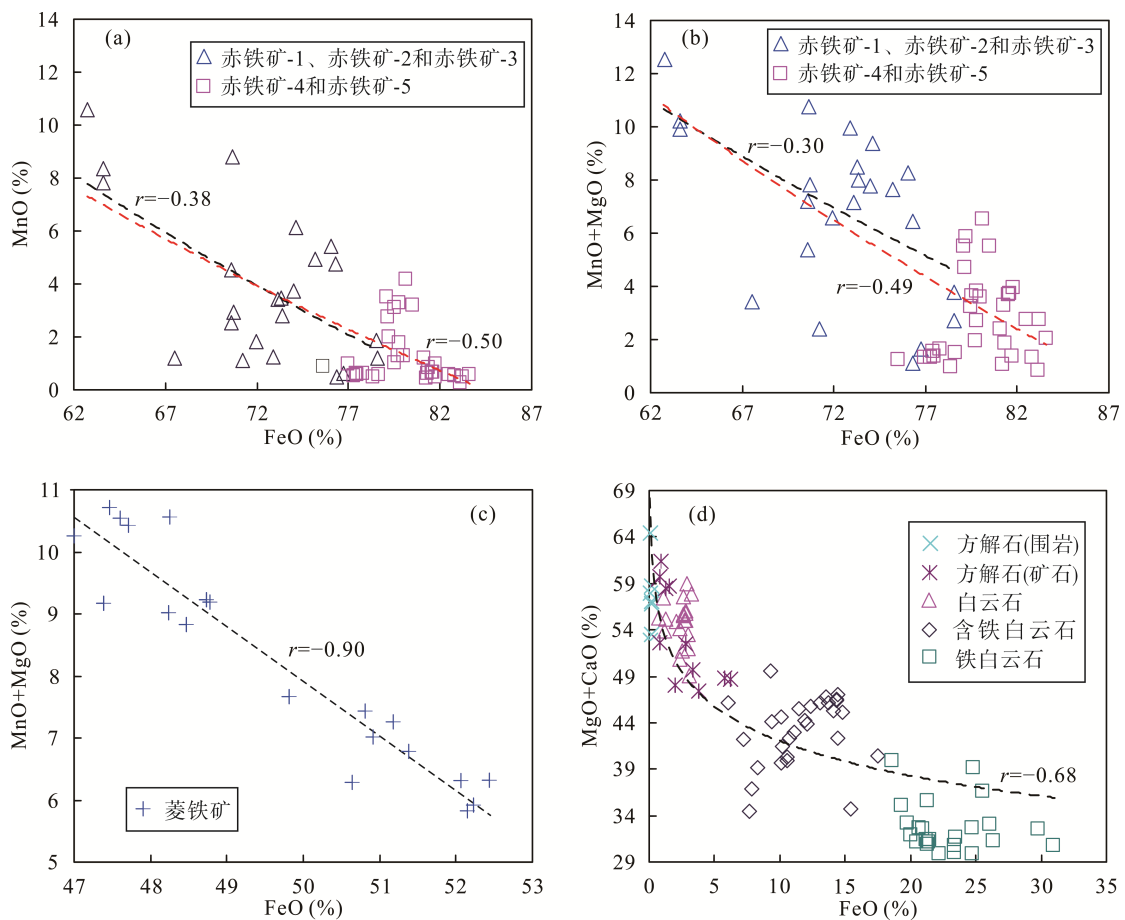


图 4 大红柳滩铁矿床矿物化学成分特征图解。其中赤铁矿 1~3 数据多出自条带状铁矿石中; 赤铁矿-4 和赤铁矿-5 数据多出自于块状铁矿石中; 方解石(围岩)数据出自硅化方解石大理岩; 方解石(矿石)和白云石数据出自石英-白云母-白云石-方解石-赤铁矿型矿石中; 含铁白云石和铁白云石数据出自石英-铁白云石-赤铁矿型矿石中

Fig.4 Diagram of mineral chemistry from the Dahongliutan iron deposit. Data of hematite 1, 2 and 3 from banded iron ore; Data for hematite 4 and 5 from massive iron ore; Data of calcite (wall rock) from silicified calcic marbles; Data for calcite (ore) and dolomite from the quartz-dolomite-calcite-muscovite-hematite ore; Data of ferroan dolomitie and ankerite from quartz-ankerite-hematite ore

表1 大红柳滩铁矿矿石矿物和脉石矿物 EMPA 测试结果

Table 1 EPMA analyses of ore minerals and gangue minerals from the Dahongliutan iron deposit

矿物名称	化学成分	Na ₂ O (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	SiO ₂ (%)	MnO (%)	MgO (%)	CaO (%)	FeO (%)	P ₂ O ₅ (%)
赤铁矿 (n=55)	平均值	0.22	0.10	0.02	0.05	2.32	2.38	2.12	0.25	76.80	0.01
	最小值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.28	0.34	0.00	62.72	0.00
	最大值	1.24	0.69	0.19	0.26	3.59	10.60	8.71	1.68	83.61	0.06
菱铁矿 (n=20)	平均值	0.04	0.01	0.01	0.01	0.02	1.89	6.19	0.08	49.84	0.00
	最小值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.52	3.61	0.00	47.00	0.00
	最大值	0.09	0.03	0.02	0.06	0.04	2.66	9.11	0.21	52.45	0.01
白云石 (n=20)	平均值	0.08	0.05	0.01	0.01	0.00	0.18	23.75	31.03	2.38	0.04
	最小值	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	21.80	27.28	0.71	0.01
	最大值	0.31	0.48	0.12	0.03	0.04	0.88	26.04	32.98	3.26	0.10
含铁白云石 (n=29)	平均值	0.19	0.49	0.03	0.07	0.20	0.63	16.75	26.36	11.60	0.03
	最小值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	13.73	18.39	6.05	0.00
	最大值	2.53	5.88	0.13	1.15	1.21	1.12	21.15	29.76	17.52	0.08
铁白云石 (n=24)	平均值	0.11	0.05	0.02	0.03	0.26	1.84	7.00	25.70	22.98	0.02
	最小值	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.79	3.49	16.27	18.56	0.00
	最大值	0.33	0.44	0.08	0.15	1.66	3.59	17.18	33.82	30.98	0.09
方解石(围岩) (n=7)	平均值	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.03	0.56	56.77	0.14	0.03
	最小值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.51	52.36	0.08	0.00
	最大值	0.06	0.03	0.02	0.02	0.00	0.07	0.66	63.76	0.19	0.07
方解石(矿石) (n=11)	平均值	0.09	0.13	0.01	0.03	0.00	0.85	4.09	49.19	2.65	0.05
	最小值	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.15	0.27	42.98	0.79	0.03
	最大值	0.18	0.37	0.03	0.06	0.00	2.15	6.07	56.64	6.26	0.09

铁白云石, 含铁白云石和铁白云石晶体结构相同, 但前者的铁含量明显低于后者, 说明样品在形成过程中铁的补给量少, 进入晶格的 Fe²⁺受到限制^[14]。本次 EMPA 测试工作鉴别出 3 种白云石类矿物: 白云石、含铁白云石和铁白云石。

白云石 MgO 含量分布在 21.80%~26.04%之间, 平均值为 23.25%; CaO 含量分布在 27.28%~32.98%之间, 平均值为 31.03%; FeO 含量分布在 0.71%~3.26%之间, 平均值为 2.38%。含铁白云石 MgO 含量分布在 13.73%~21.15%之间, 平均值为 16.75%; CaO 含量分布在 18.39%~29.76%之间, 平均值为 26.36%; FeO 含量分布在 6.05%~17.52%之间, 平均值为 11.60%。铁白云石 MgO 含量分布在 3.49%~17.18%之间, 平均值为 7.00%; CaO 含量分布在 16.72%~33.82%, 平均值为 25.70%; FeO 含量分布在 18.56%~30.98%之间, 平均值为 22.98%。

以上数据显示白云石、含铁白云石和铁白云石化学成分呈现 TFeO 含量依次增高, MgO 和 CaO 含量依次降低的特征。

(4) 方解石

EMPA 结果显示硅化方解石大理岩和矿石中的

方解石成分具有一定的差异, 其中硅化方解石大理岩中的方解石 CaO 含量分布在 52.36%~63.76%之间, 平均值为 56.77%; MgO 含量分布在 0.51%~0.66%之间, 平均值为 0.56%; FeO 含量分布在 0.08%~0.19%之间, 平均值为 0.14%。矿石中的方解石相比较而言, 具有较低的 CaO 含量, 较高的 MgO 和 FeO 含量, 其中 CaO 含量分布在 42.98%~56.64%之间, 平均值为 49.19%; MgO 含量分布在 0.27%~6.07%之间, 平均值为 4.07%; FeO 含量分布在 0.79%~6.26%之间, 平均值为 2.65%。

5.2 氧同位素

赤铁矿氧同位素分析测试结果见表 2, 结果显示 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 集中分布在 -3.9‰ ~ -0.9‰ 之间, 平均值为 -2.1‰。

6 讨论

从 EMPA 测试结果可以看出大红柳滩铁矿床矿物化学成分具规律性变化, 变质变形期和表生氧化期形成的赤铁矿相比沉积-成岩期, FeO 含量明显增高,

表 2 大红柳滩铁矿床赤铁矿氧同位素测试结果
Table 2 The $\delta^{18}\text{O}$ values of hematite from the Dahongliutan iron deposit

样号	矿物名称	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ (‰)
DHLT-33	赤铁矿	-2.1
ZK10001T-1	赤铁矿	-1.3
ZK10001T-2	赤铁矿	-0.9
ZK10001T-3	赤铁矿	-1.5
ZK2701T-1	赤铁矿	-3.9
ZK2701T-2	赤铁矿	-2.6

MnO 和 MgO 含量明显降低, MnO-FeO 图解(图 4a)显示赤铁矿中 Fe 与 Mn 含量呈负相关关系($r = -0.50$), 其中沉积-成岩期形成的赤铁矿-1、赤铁矿-2 和赤铁矿-3 也显示出一定的相关关系($r = -0.38$, 图 4a)。在(MnO+MgO)-FeO 图解(图 4b)显示赤铁矿中 Fe 与 Mn、Mg 含量呈负相关关系($r = -0.49$), 沉积-成岩期形成的赤铁矿-1、赤铁矿-2 和赤铁矿-3 也显示出一定的相关关系($r = -0.30$, 图 4b)。沉积-成岩期形成的菱铁矿矿物化学成分变化较大, (MnO+MgO)-FeO 图解(图 4c)显示菱铁矿中 Fe 与 Mn、Mg 含量呈明显负相关关系($r = -0.90$); 白云石、含铁白云石、铁白云石和方解石矿物中, 随着 FeO 含量的增加, MgO 和 CaO 含量呈现降低的趋势, (MgO+CaO)-FeO 图解(图 4d)显示碳酸盐类矿物中 Fe 与 Ca、Mg 含量呈明显负相关关系($r = -0.68$)。上述特征表明矿石中 Fe 的富集可能伴随着 Mn、Mg 和 Ca 成分的迁出, 铁矿石富集的主要成矿阶段为变质变形期和表生氧化期。值得注意的是赤铁矿中含有普遍高的 MnO 含量, 但显微镜下并未发现软锰矿、硬锰矿、褐锰矿和方锰矿等锰的氧化物及菱锰矿等锰的碳酸盐矿物, 推断可能为赤铁矿中含类质同象的 Mn 所致。

大红柳滩铁矿床石英-赤铁矿型富矿石中负的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值(-3.9‰ ~ -0.9‰, 平均值为-2.1‰)与国内外典型的 BIF 型富铁矿较为一致^[6], 如 Thorne *et al.*^[15] 获得的澳大利亚西部 Hamersley 盆地 BIF 型富铁矿床中高品位铁矿石(TFe 60%~68%)和热液蚀变矿物组合中磁铁矿和赤铁矿的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值(分布在 -9.0‰ ~ -2.9‰ 之间); Gutzmer *et al.*^[16] 对世界上典型的 BIF 型赤铁矿床高品位铁矿成因研究时获得了如下的氧同位素值: (1) 假像赤铁矿 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值分布在 -4.0‰ ~ -7.3‰ 之间, 平均值为 -5.6‰ (巴西 Minas Gerais 矿床); (2) 假像赤铁矿和微板状赤铁矿 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值分布在 -3.8‰ ~ -5.1‰ 之间, 平均值为 -4.9‰ (Hamersley 盆地 Mount Tom Price 矿床); (3) 微

板状赤铁矿 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值分布在 -1.3‰ ~ -2.6‰ 之间, 平均值为 -2.1‰ (印度 Noamundi 矿床); (4) 微板状赤铁矿、镜铁矿 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值分布在 -6.0‰ ~ 3.4‰ 之间 (南非 Thabazimbi 矿床); (5) 假像赤铁矿 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 平均值为 -6.1‰ (南非 Zeekoebaart 矿床); 魏菊英等^[17] 和刘军等^[18] 分别获得了弓长岭富铁矿石中磁铁矿的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 -0.41‰ ~ -5.4‰ (平均值为 -2.9‰) 和 -2.2‰ ~ 1.2‰ (平均值为 -0.75‰); 李延河等^[19] 获得了鞍本地区 BIF 型富铁矿石中磁铁矿的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 -5.4‰ ~ -2.8‰, 平均值为 -2.17‰。以上学者们普遍认为 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值的亏损和降低, 主要是变质热液流体、大气降水和盆地卤水改造原始沉积 BIF 而形成, 因此大红柳滩铁矿床矿石中负的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值可能表明了变质作用和表生淋滤作用参与了富矿石形成过程且起到了重要作用, 与赤铁矿矿物化学成分规律性变化的特征相吻合。文中呈现的地球化学特征也得到了区域地质和岩相学证据的支持, 奥陶纪早期-志留纪早期(480~440 Ma), 甜水海地块处于碰撞后伸展阶段, 伴随着大规模区域变质作用和动力变质作用发生, 变质热液流体促使甜水海地块前寒武纪地层赋存的铁矿层中的 Fe 成矿元素进一步迁移、活化和富集, 磁铁矿和赤铁矿发生重结晶作用, 这在甜水海地块东段塔什库尔干县一带的沉积变质型磁铁矿床的成矿与改造过程中已经有所响应^[3,4,9,12]。甜水海地块含铁岩段经历了复杂的构造活动改造和漫长的地质历史, 表生氧化作用强烈, 东段塔什库尔干县一带磁铁矿经表生氧化作用形成褐铁矿和赤铁矿, 黄铁矿经表生氧化作用形成黄钾铁矾和褐铁矿, 西段黑黑孜干-大红柳滩一带褐铁矿和孔雀石等表生矿物的形成^[3,4,9], 这些均表明, 遭受一系列变质变形之后, 这些铁矿床被抬升至地表, 伴随着大气降水的加入, 局部金属矿物发生了氧化作用。同时大红柳滩铁矿床变质变形期和表生氧化期形成的赤铁矿-4 和赤铁矿-5 多产出在块状富赤铁矿中, 也与上述矿物地球化学分布规律相吻合。

综合矿物化学成分演化特征、赤铁矿氧同位素特征、区域地质和岩相学特征, 我们认为变质变形期和表生氧化期为富铁矿形成的重要阶段。

7 结 论

(1) 在大红柳滩铁矿床中发现 5 种不同晶型的

赤铁矿(尘埃状、微细粒他形、自形-半自形、板状-针柱状和重结晶他形粒状-显微鳞片状)和 3 种白云石类矿物(白云石、含铁白云石和铁白云石)。

(2) 大红柳滩铁矿床可划分为 3 个成矿期次,分别为沉积-成岩期、变质变形期和表生氧化期,其中沉积-成岩期形成的赤铁矿主要呈尘埃状、微细粒他形和自形-半自形结构;变质变形期和表生氧化期形成的赤铁矿主要呈板状-针柱状和重结晶他形粒状-显微鳞片状结构;变质变形期和表生氧化期形成的赤铁矿和菱铁矿与沉积-成岩期相比,TFeO 含量明显增高,MnO 和 MgO 含量明显降低,矿石中 Fe 元素的富集可能伴随着 Mg、Mn 和 Ca 元素的迁出。赤铁矿中普遍高的 MnO 含量可能为赤铁矿中含类质同象的 Mn 所致。

(3) 大红柳滩铁矿床中石英-赤铁矿型富矿石贫 $^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ (平均值为 -2.1%)特征,表明变质热液流体和大气降水参与了富铁矿的形成过程。

(4) 综合分析认为变质变形期及表生氧化期为富铁矿形成的重要阶段。

野外地质工作得到了新疆新地地质勘查有限公司韩红卫教授级高级工程师以及魏勇工程师的支持和帮助;审稿专家许德如教授和申萍研究员对本文提出了宝贵意见和建议,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References):

- [1] 冯昌荣,吴海才,陈勇. 新疆塔什库尔干县赞坎铁矿地质特征及成因浅析[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(3): 404-409.
Feng Chang-rong, Wu Hai-cai, Chen Yong. Geological characteristics and genesis of the Zankan iron deposit in Taxkorgan, Xinjiang[J]. Geotecton Metallogen, 2011, 35(3): 404-409 (in Chinese with English abstract).
- [2] 燕长海,陈曹军,曹新志. 新疆塔什库尔干地区“帕米尔式”铁矿床的发现及其地质意义[J]. 地质通报, 2012, 31(4): 549-557.
Yan Chang-hai, Chen Cao-jun, Cao Xin-zhi. The discovery of the Pamir-type iron deposits in Taxkorgan area of Xinjiang and its geological significance[J]. Geol Bull China, 2012, 31(4): 549-557 (in Chinese with English abstract).
- [3] 陈登辉,伍跃中,李文明,王兴安,乔耿彪,赵晓健. 西昆仑塔什库尔干地区磁铁矿床特征及其成因[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(4): 671-684.
Chen Deng-hui, Wu Yue-zhong, Li Wen-ming, Wang Xing-an, Qiao Geng-biao, Zhao Xiao-jian. Geological characteristics and genesis of the iron deposits in the Taxkorgan area, West Kunlun[J]. Geotecton Metallogen, 2013, 37(4): 671-684 (in Chinese with English abstract).
- [4] 黄朝阳. 西昆仑布伦托勒群铁矿床地质特征及成因研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2014.
Huang Chao-yang. Geological characteristics and genesis of the iron ore deposit in the Bulunkuoile Group, West Kunlun, Xinjiang[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [5] 李红中,翟明国,张连昌,李智泉,郑梦天,牛佳,虞鹏鹏. 西昆仑赞坎地区古元古代化学沉积岩系的地球化学及微区特征研究[J]. 岩石学报, 2016, 32(1): 233-250.
Li Hong-zhong, Zhai Ming-guo, Zhang Lian-chang, Li Zhi-quan, Zheng Meng-tian, Niu Jia, Yu Peng-peng. Study on geochemistry and micro-area characteristics of Paleoproterozoic sedimentary rocks from Zankan area, West Kunlun, China[J]. Acta Petrol Sinica, 2016, 32 (1): 233-250 (in Chinese with English abstract).
- [6] 胡军. 西昆仑大红柳滩铁矿床成矿时代、动力学背景和成因研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2015.
Hu Jun. Ore-forming age, metallogenic geodynamic setting and genesis of the Dahongliutan iron ore deposit, West Kunlun, Xinjiang[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [7] 胡军,王核,韩红卫,魏勇,慕生禄. 西昆仑甜水海地块大红柳滩铁矿床成因浅析及找矿意义[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(5): 949-959.
Hu Jun, Wang He, Han Hong-wei, Wei Yong, Mu Sheng-lu. Genesis of the Dahongliutan iron deposit in the Tianshuihai terrane, West Kunlun and its prospecting significance[J]. Geotecton Metallogen, 2016, 40(5): 949-959 (in Chinese with English abstract).
- [8] 胡军,王核,黄朝阳,慕生禄,韩红卫,魏勇. EH4 连续电导率法在西昆仑大红柳滩赤铁矿床勘查中的应用[J]. 新疆地质, 2015, 33(4): 556-601.
Hu Jun, Wang He, Huang Chao-yang, Mu Sheng-lu, Han Hong-wei, Wei Yong. Application of EH4 successive electrical conductivity survey to the Dahongliutan hematite-rich Fe deposit in the Western Kunlun orogenic belt [J]. Xinjiang Geol, 2015, 33(4): 556-601 (in Chinese with English abstract).
- [9] Hu J, Wang H, Huang C Y, Tong L X, Mu S L, Qiu Z W. Geological characteristics and age of the Dahongliutan Fe-ore deposit in the Western Kunlun orogenic belt, Xinjiang, northwestern China[J]. J Asian Earth Sci, 2016, 116: 1-25.
- [10] 潘裕生,文世宣,孙东立. 喀喇昆仑山-昆仑山地区地质演化[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-523.
Pan Yu-sheng, Wen Shi-xuan, Sun Dong-li. Geological Evolution of the Karakorum and Kunlun Mountains[M]. Beijing: Science Press, 2000: 1-523 (in Chinese).
- [11] 潘桂棠,朱弟成,王立全,廖忠礼,耿全如,江新胜. 班公湖-怒江缝合带作为冈瓦纳大陆北界的地质地球物理证据[J]. 地学前缘, 2004, 11(4): 371-382.
Pan Gui-tang, Zhu Di-cheng, Wang Li-quan, Liao Zhong-li, Geng Quan-ru, Jiang Xin-sheng. Banggong Lake—Nu River suture zone—the northern boundary of Gondwanaland: Evidence from geology and geophysics[J]. Earth Sci Front, 2004, 11(4): 371-382 (in Chinese with English abstract).
- [12] 张传林,陆松年,于海锋,叶海敏. 青藏高原北缘西昆仑造

- 山带构造演化: 来自锆石 SHRIMP 及 LA-ICP-MS 测年的证据[J]. 中国科学(D 辑), 2007, 37(2): 145–154.
- Zhang Chuanlin, Lu Songnian, Yu Haifeng, Ye Haimin. Tectonic evolution of the Western Kunlun orogenic belt in the northern margin of the Tibetan Plateau: Evidence from SHRIMP and LA-ICP-MS zircon dating[J]. *Sci China (D)*, 2007, 37(2): 145–154 (in Chinese).
- [13] 王璞, 潘兆橧, 翁玲宝. 系统矿物学[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 1–32.
- Wang Pu, Pan Zhao-lu, Weng Ling-bao. *Systematical Mineralogy*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 1–32 (in Chinese).
- [14] 高翔, 王平康, 李秋英, 王成善, 高远. 松科 1 井嫩江组湖相含铁白云石的准确定名和矿物学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(2): 22–31.
- Gao Xiang, Wang Ping-kang, Li Qiu-ying, Wang Cheng-shan, Gao Yuan. The precise naming and mineralogical characteristics of ferruginous lacustrine dolomite in Well CCSD-SK[J]. *Acta Petrol Mineral*, 2010, 29(2): 22–31 (in Chinese with English abstract).
- [15] Thorne W, Hagemann S, Vennemann T, Oliver N. Oxygen isotope compositions of iron oxides from high-grade BIF-hosted iron ore deposits of the central Hamersley province, Western Australia: Constraints on the evolution of hydrothermal fluids[J]. *Econ Geol*, 2009, 104(7): 1019–1035.
- [16] Gutzmer J, Mukhopadhyay J, Beukes N J, Pack A, Hayashi K, Sharp Z D. Oxygen isotope composition of hematite and genesis of high-grade BIF-hosted iron ores[J]. *Mem Geol Soc Am*, 2006, 198: 257–268.
- [17] 魏菊英, 王关玉, 强德美. 鞍山弓长岭铁矿床的氧同位素组成特征[M]. 北京: 北京大学出版社, 1985: 158–167.
- Wei Ju-ying, Wang Guan-yu, Qiang De-mei. *Oxygen Isotope Compositions of Anshan Gongchangling Iron Deposit*[M]. Beijing: Peking University Press, 1985: 158–167 (in Chinese).
- [18] 刘军, 靳淑韵. 辽宁弓长岭铁矿磁铁矿富矿的成因研究[J]. 现代地质, 2010, 24(1): 80–88.
- Liu Jun, Jin Shu-yun. Genesis study of magnetite-rich ore in Gongchangling iron deposit, Liaoning[J]. *Geoscience*, 2010, 24(1): 80–88 (in Chinese with English abstract).
- [19] 李延河, 张增杰, 侯可军, 段超, 万德芳, 胡古月. 辽宁鞍本地区沉积变质型富铁矿的成因: Fe、Si、O、S 同位素证据[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2351–2372.
- Li Yan-he, Zhang Zeng-jie, Hou Ke-jun, Duan Chao, Wan De-fang, Hu Gu-yue. The genesis of Gongchangling high-grade-iron ores, Anshan-Benxi area, Liaoning Province, NE China: Evidence from Fe-Si-O-S isotopes[J]. *Acta Geol Sinica*, 2012, 88(12): 2351–2372 (in Chinese with English abstract).