

西昆仑塔什库尔干铁矿带矿床类型、 成因及成矿规律

张连昌¹, 冯 京², 董连慧², 朱明田¹, 郑梦天¹, 李智泉¹, 郝延海³, 石玉君³

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029;

2. 新疆地质矿产勘查开发局, 新疆 乌鲁木齐 830000;

3. 新疆地质矿产勘查开发局第二地质大队, 新疆 喀什 844002)

摘 要:在对西昆仑塔什库尔干地块地质演化、含矿岩系、锆石 U-Pb 同位素年代学和典型铁矿床进行研究的基础上,总结了区域含矿建造的特征、时代、矿床类型及成矿规律。结果表明:西昆仑塔什库尔干地块原“布伦阔勒群”实际上发育古元古代(2 100~2 500 Ma)、寒武纪早期(510~540 Ma)等两期沉积成矿事件,同时在中晚元古代(800~1 800 Ma)和海西期—印支期(200~410 Ma)分别发生过强烈的变质和变形作用,局部富矿的形成可能与后期热液的叠加改造作用有关。区域铁矿可划分为两类:一为条带状铁建造遭受后期热液叠加改造的沉积变质型铁矿床,如赞坎、莫喀尔和吉尔铁克沟铁矿床,其形成环境为早元古代活动陆缘的弱氧化—还原的浅海相沉积环境,成矿物质来源于海底热液对基性火山岩的淋滤及少量陆源物质的风化;二为早寒武世海相火山—喷流沉积型铁矿床,如喀来子、老井和叶里克铁矿床,其形成条件为半深海—浅海相、弱氧化—半氧化的断陷盆地环境,成矿成岩物质主要来源于海底热水沉积及陆源物质。根据区域成矿规律,推测卡拉本—喀来子—莫拉赫一带是寻找早寒武世与海底喷流成矿系统有关的铁—多金属矿的有利地区,吉尔铁克沟—赞坎北地区、莫喀尔及其以南地区是赞坎铁矿带的北延和南延,是寻找古元古代沉积变质型铁矿的有利地区。

关键词:铁建造;矿床类型;矿床成因;成矿规律;沉积变质;喷流沉积;塔什库尔干地块;西昆仑
中图分类号:P618.31 **文献标志码:**A

Deposit Types, Origin and Metallogenic Regularity of Taxkorgan Iron Ore Belt in West Kunlun

ZHANG Lian-chang¹, FENG Jing², DONG Lian-hui², ZHU Ming-tian¹,

ZHENG Meng-tian¹, LI Zhi-quan¹, HAO Yan-hai³, SHI Yu-jun³

(1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources and Development, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 3. No. 2 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Kashgar 844002, Xinjiang, China)

Abstract: Based on the studies of the geological evolution, field investigation of the ore-bearing rock series, zircon U-Pb isotope chronology and typical iron ore deposits of Taxkorgan Block in West Kunlun, the characteristics and forming ages of regional ore-bearing formation, ore deposit type and metallogenic regularity were summarized. The results show that the previously defined

收稿日期:2016-04-11

基金项目:国家自然科学基金项目(41372100);国家 305 项目(2015BAB05B02);新疆地质矿产勘查开发局科研项目(XGMB2012011)

作者简介:张连昌(1959-),男,陕西西安人,研究员,博士研究生导师,理学博士,E-mail:lczhang@mail.iggcas.ac.cn。

“Bulunkuole Group” actually contains Paleoproterozoic (2 100-2 500 Ma) and Early Cambrian (510-540 Ma) sedimentary metallogenic events, which are suffered to the intensely metamorphism and deformation in both Middle-Late Proterozoic (800-1 800 Ma) and Hercynian-Indosinian (200-410 Ma). Moreover, the genesis of the local high-grade ores may be related to the later hydrothermal activities. The regional iron deposits can be divided into two types. The first one is the meta-sedimentary type iron deposit that is superimposed and transformed by the later hydrothermal fluids; taking Zankan, Mokaer and Jiertekegou as examples, they form in weakly oxic to reducing marine sedimentary environment of Early Proterozoic active continental margin and the metallogenetic materials are derived from the leaching of basic volcanic rocks by seafloor hydrothermal fluids and a small amount of terrigenous sediments input. The second type is the Early Cambrian marine volcanic exhalative sedimentary iron deposit, such as Kalaizi, Laobing and Yeleke sulfate-iron deposit; their depositional environment should be bathyal-neritic facies weakly oxic to suboxic faulted basin; and the ore-forming materials come from the submarine hydrothermal sedimentary and terrigenous materials input. According to the regional metallogenic regularity, it is speculated that Kalaben-Kalaizi-Molahe belt is the favorable area for prospecting the iron-polymetallic deposits, which associate with the Early Cambrian marine exhalative metallogenic system. While, Jiertekegou-Zankanbei area, Mokaer and its southern area, which are the northward and southward extensional zones of Zankan iron ore belt, are both the favorable areas for prospecting the meta-sedimentary type of Paleoproterozoic iron deposits.

Key words: iron formation; deposit type; deposit origin; metallogenic regularity; meta-sedimentary; exhalative sedimentary; Taxkorgan Block; West Kunlun

0 引 言

近年来,新疆地质矿产部门在阿尔泰、西天山和西昆仑等地的铁矿勘查中取得了一批重要成果,取得重大突破的矿床类型主要是海相火山岩型和沉积变质型^[1]。其中,沉积变质型铁矿主要分布于塔里木盆地周缘及昆仑山的前寒武纪地块区。在西昆仑塔什库尔干地块原“布伦阔勒群”下部和上部先后发现了一系列沉积变质型磁铁矿床,如赞坎、莫喀尔、吉尔铁克沟、老井、叶里克、喀来子等大中型铁矿,以及塔阿西、苏巴什、孜洛依、其克尔克、河可兰尔等中小型铁矿,形成一条 NW—SE 向展布的规模巨大的沉积变质型磁铁矿带^[2]。该铁矿带的发现对于稳定南疆社会秩序,加快地方经济发展,开发中巴经济走廊具有重要的战略意义。

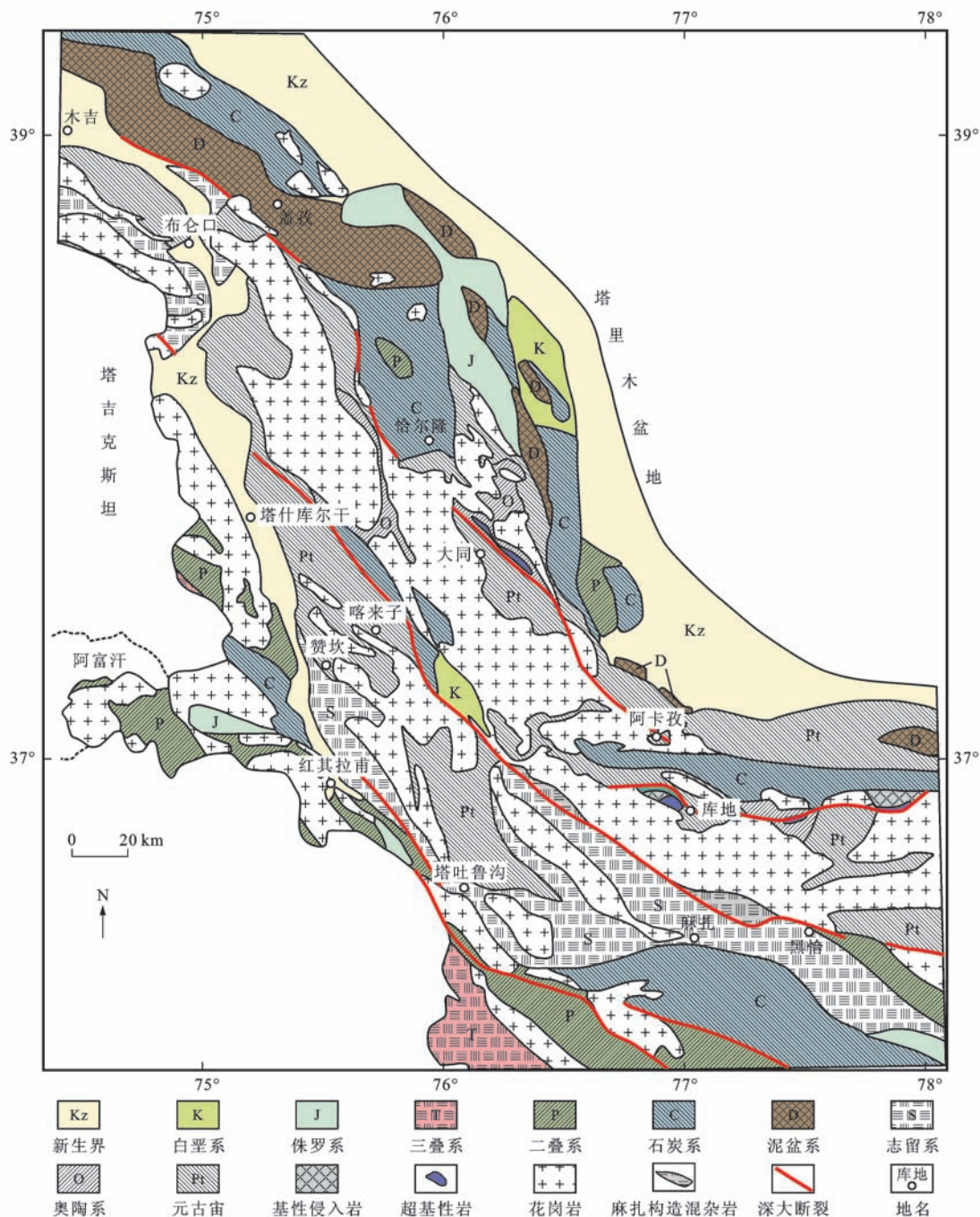
由于区域地质构造背景、塔什库尔干地块的属性及演化过程、布伦阔勒群的组成范围及时代等研究程度较低,致使赋存于塔什库尔干地块中的铁矿类型及成因机制等存在不同认识。其中主要有形成于前寒武纪地块的沉积变质(或 BIF)型^[3-5]和早古生代海相沉积型^[6-9]的成因认识。本文通过对塔什库尔干地块地质演化、铁建造类型和锆石 U-Pb 同位素年代学等

的综合研究,对区域含矿地层时代、成矿年龄、矿床类型及成矿规律等方面进行了归纳总结。

1 区域地质特征

西昆仑位于青藏高原西北缘和塔里木盆地西南缘,总体呈现为 NW—SE 向巨型反“S”状展布^[9](图 1)。西昆仑造山带形成于古亚洲洋和特提斯构造域的交汇部位,经历了长期的复杂演化,同时新生代青藏高原的隆升和帕米尔构造节的形成使该区地质构造变得更为复杂^[10-12]。西昆仑地区出露地层较为齐全,从下元古界到新生界都有发育,以元古宙和古生界发育为特征。该区在构造上存在多条缝合带和构造混杂岩,以库地蛇绿岩和麻扎混杂岩最为著名。区域断裂构造发育,包括塔阿西、康西瓦和布伦口等深大断裂。区域岩浆岩活动强烈,中酸性侵入岩占绝对优势,碱性岩次之,中基性岩相对较少。岩浆侵入活动以燕山期最为强烈和频繁,次为喜马拉雅期,其中走克本、马尔洋和大同岩体规模较大。

原“布伦阔勒群”是塔什库尔干地块的主要组成部分,是西昆仑铁矿的主要赋矿地质体。区内铁矿主要分布于塔阿西断裂以东、康西瓦断裂以西的塔什库尔干地块布伦阔勒群变质岩系中(图 1)。近年



图件引自文献[9]

图1 西昆仑地区地质构造略图

Fig.1 Geological Sketch Map of West Kunlun Area

来,围绕布伦阔勒群变质岩和铁矿的形成时代,研究者做了大量锆石年代学工作。本文通过收集整理有关原“布伦阔勒群”火山-沉积建造及铁矿围岩的锆石 U-Pb 年代学新资料(表1)^[3,5-7,13-18],认为分布于塔什库尔干地块原“布伦阔勒群”除继续保留部分古元古代变质地层外,还应分离出一套早古生代地层,其中在喀来子—叶里克—塔阿西一线划分出早寒武世沉积-成矿区(带)的证据比较充分(图2)。

下元古界布伦阔勒群为一套富含石榴石、矽线石等特征变质矿物的变质岩系,变质程度达高角闪岩相。主要岩石类型有角闪斜长片麻岩、石榴斜长角闪片麻岩、黑云斜长片麻岩、石榴黑云斜长片麻岩、矽线石榴黑云斜长片麻岩、大理岩、夹石英岩、黑云石英片岩和少量变质杏仁状安山岩。本区有较多的花岗岩伟晶岩脉,花岗闪长岩脉、石英岩脉呈顺层或斜切贯入其中。另外,本区在塔合曼、赞坎等地还发

表 1 原“布伦阔勒群”锆石 U-Pb 年龄统计结果

Tab. 1 Statistical Results of U-Pb Ages of Zircons from Previously Defined “Bulunkuole Group”

编号	采样地点	定年对象	测年方法	年龄/Ma	锆石类型	资料来源
1	布伦阔勒群		U-Pb/Rb-Sr	2 130~2 700		文献[19]
2	塔县水库南	石榴黑云片岩	SHRIMP U-Pb	600~2 200	碎屑锆石	文献[15]
4	布伦口	斜长角闪片麻岩	LA-ICP-MS U-Pb	1 828	岩浆锆石	文献[16]
5	布伦口	石英岩	LA-ICP-MS U-Pb	515、219	变质锆石	文献[14]
6	孜落依	黑云石英片岩	LA-ICP-MS U-Pb	500	变质锆石	文献[14]
7	孜落依	二云石英片岩	LA-ICP-MS U-Pb	495	变质锆石	文献[14]
9	塔阿西	斜长角闪岩	LA-ICP-MS U-Pb	516.5±5.2	岩浆锆石	文献[9]
10	塔阿西	变英安岩	LA-ICP-MS U-Pb	521	岩浆锆石	文献[18]
12	塔阿西	斜长角闪岩	LA-ICP-MS U-Pb	508	岩浆锆石	文献[19]
13	叶里克	黑云母石英片岩	LA-ICP-MS U-Pb	473.6±7.4	变质锆石	文献[9]
14	叶里克	变英安岩	LA-ICP-MS U-Pb	517~565	岩浆锆石	文献[20]
15	喀来子	角闪斜长变粒岩	LA-ICP-MS U-Pb	517	碎屑锆石	文献[20]
16	喀来子	黑云斜长片麻岩	LA-ICP-MS U-Pb	537.2±6.4	岩浆锆石	文献[17]
17	老井	黑云母石英片岩	LA-ICP-MS U-Pb	532±3.9	碎屑锆石	文献[6]
18	老井	长英质片岩	LA-ICP-MS U-Pb	526±5.0	碎屑锆石	文献[6]
19	莫喀尔	斜长角闪片岩	LA-ICP-MS U-Pb	511.2±3.5	变质锆石?	文献[9]
20	莫喀尔	黑云母石英片岩	LA-ICP-MS U-Pb	511.7±6.7	变质锆石?	文献[9]
21	赞坎	变粒岩	SIMS U-Pb	2 424	碎屑锆石	文献[20]
23	赞坎	黑云母石英片岩	LA-ICP-MS U-Pb	2 375	岩浆锆石	文献[20]
25	赞坎	霏细斑岩	LA-ICP-MS U-Pb	543	岩浆锆石	文献[20]
26	赞坎	斜长角闪片岩	LA-ICP-MS U-Pb	800~900	变质锆石	文献[20]
27	赞坎	磁铁矿石	LA-ICP-MS U-Pb	1 959~2 465、558~904		文献[14]
28	赞坎	黑云母石英片岩	LA-ICP-MS U-Pb	2 500、706~985		文献[14]
29	赞坎	花岗岩	LA-ICP-MS U-Pb	583	岩浆锆石	文献[20]
30	赞坎	霓石正长岩	LA-ICP-MS U-Pb	551	岩浆锆石	文献[14]

育一套含铁建造,岩性有层状-条带状磁铁矿、磁铁石英岩、含矿黑云斜长片麻岩等,为区内重要的含铁层位,有的地区还形成规模巨大的沉积-变质型磁铁矿床。综合前人资料,布伦阔勒群按岩性可分为含铁岩段、(含石榴)斜长角闪片麻岩段、矽线石榴片麻岩-石英岩段、大理岩段等 4 套变质建造组合。

(1)含铁岩段:分布于布伦阔勒群西部,主要岩性组合包括层状-条带状磁铁矿、磁铁石英岩、(含磁铁)黑云斜长片麻岩夹斜长角闪片(麻)岩等,具典型的沉积-变质型磁铁矿特征。

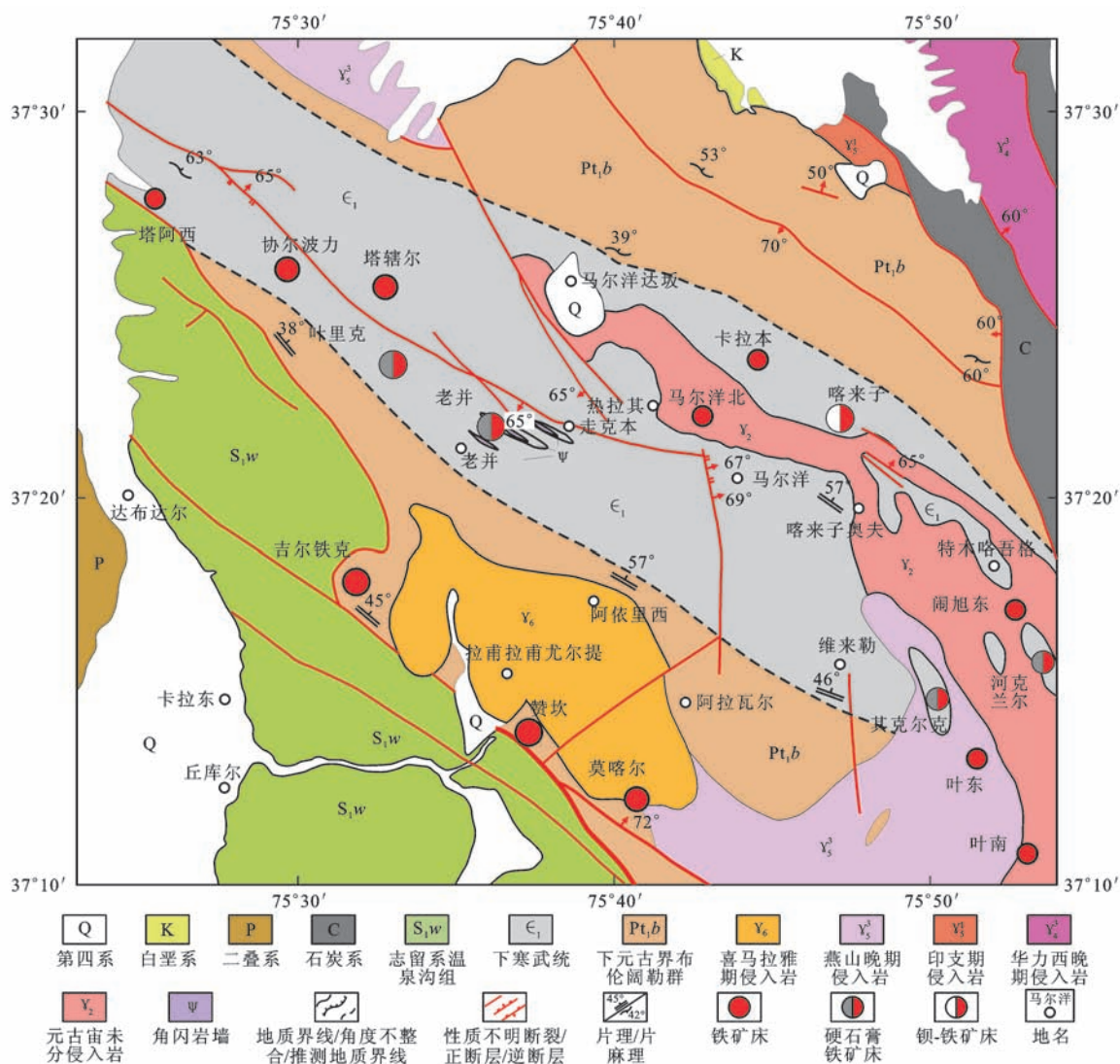
(2)(含石榴)斜长角闪片麻岩段:主体分布于布伦阔勒群中部,主要岩性组合为斜长角闪片麻岩、石榴角闪片麻岩,夹少量石榴黑云石英片岩、二云斜长片麻岩。

(3)矽线石榴片麻岩-石英岩段:主体分布于布伦阔勒群中东部,岩石富含石榴石、矽线石等特征变

质矿物,体积分数高者为 20%~30%。其主要岩石组合为含石榴黑云石英片岩、含矽线石榴斜长黑云石英片岩、含石榴石英岩、含石榴大理岩、含(矽线)石榴黑云斜长片麻岩,夹少量角闪片岩和斜长角闪片岩等,局部出现矽线石片岩及石榴石岩,石榴石、矽线石结晶粗大,石榴石大者直径可达 4 cm,颜色多呈玫瑰红色。

(4)大理岩段:主体分布于布伦阔勒群东部,主要岩性组合为黑云母大理岩、透闪石大理岩,夹石榴黑云石英片岩、片麻岩等。

该套地层片麻理及脉体揉皱较强,构造置换强烈,原始构造形态已难以恢复。其褶皱表现为一系列片麻理的平卧褶皱、斜卧褶皱以及片内无根褶皱等,并形成一系列复式背向斜构造。其塑性流变特征明显,石英脉体拉长,部分地段显示较清楚的变晶糜棱结构,镜下可见石英多晶条带、长石旋转碎斑



图件引自文献[20],有所修改

图 2 塔什库尔干地块南段沉积变质型铁矿分布

Fig. 2 Distribution of Meta-sedimentary Iron Deposits in the South of Taxkorgan Block

等,表现其遭受过强烈的韧性剪切变形。岩石中有大量长英质、花岗岩质岩脉,亦强烈揉皱,呈不规则肠状或拉断成香肠状。原始结构构造因经过区域变质作用彻底改造,难以寻觅,只有变质火山岩中残留有杏仁状构造特征。其断裂也多为走向断裂,与区域构造线方向一致。

从岩石组合和沉积建造综合分析,布伦阔勒岩群形成于海相沉积,火山活动强烈,具多旋回喷发特征,自西向东形成硅铁建造、中基性火山岩建造、碎屑岩建造、碳酸盐岩建造组合。

下寒武统地层是本文新厘定的地层单元,沿叶里克—老井—喀来子铁矿区一线展布,主要是一套变质的沉积碎屑岩-碳酸盐岩-硫酸盐岩-磁铁矿建造(图2)。其中,喀来子矿区主要岩石类型以(石榴石)二云母石英片岩为主,并含黑云斜长片麻岩、磁

铁矿化白云石大理岩、硬石膏岩、方解石石英磁铁岩和(角闪)斜长变粒岩,局部夹二云母斜长片麻岩等。老井矿区岩石类型主要为片岩类、角闪质岩类、长英质岩类及大理岩和硬石膏岩类,其中斜长角闪片岩和黑云石英片岩为区内铁矿的主要赋矿围岩。叶里克铁矿区主要为黑云母石英片岩、石英片岩、斜长角闪片岩和大理岩,局部夹角闪片岩、斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩和角闪石英片岩等,并在原黑云母石英片岩中识别出一类区别于典型黑云母石英片岩的变英安岩。

综合研究表明,喀来子至叶里克一带发育一套早寒武世含硫酸盐-铁沉积建造。这套建造明显区别于以赞坎为代表的古元古代硅铁建造及华北克拉通前寒武纪条带状铁建造。原岩恢复表明:喀来子地区以泥质碎屑岩-碳酸盐-硫酸盐-石英钠长石岩建

造为主,并夹少量中酸性火山岩;老井地区以泥质碎屑岩-硫酸盐-碳酸盐夹基性火山岩的含铁建造为主;叶里克地区变质岩以泥质碎屑岩-硫酸盐-碳酸盐夹双峰式火山岩的含铁建造为主;而至塔阿西地区,则几乎以含铁建造的双峰式火山岩为主^[18]。从东南部喀来子地区至西北部塔阿西地区,火山岩活动越来越强烈,且早寒武世含铁建造具有明显分带特征,从喀来子的重晶石-硬石膏-磁铁矿建造到老井-叶里克的硬石膏-磁铁矿,最后到塔阿西完全不含硫酸盐的角闪石-磁铁矿建造。这样的分带特征反映出早寒武世含铁建造的沉积水环境从东南至西北由深变浅的特征。喀来子矿区连续的海相碎屑岩和碳酸盐岩沉积、石英钠长石岩和磁铁重晶石岩等热水沉积岩同盆共存说明其沉积海盆具裂陷性质。叶里克-塔阿西变质岩中斜长角闪岩及变英安岩密切共生,形成双峰式火山岩建造,说明喀来子至叶里克-塔阿西一带早寒武世为伸展背景下的裂谷或裂陷盆地。

温泉沟组分布于塔阿西断裂达布达尔东北一盖家克达坂、甫卡来河流域、卡拉秋库尔苏河流域等地,多呈不规则面状形态,出露面积约1100 km²,与周围地体呈断层接触。向南延入巴基斯坦(巴控克什米尔),向西延入阿富汗。该组主体为笔石相碎屑岩沉积,轻微变质,主要岩性为粉砂质泥(板)岩、钙泥质粉砂岩、石英砂岩、结晶灰岩,含少量硅质岩、硅质砾岩等^[19]。该组岩石颜色以灰黑色为主,呈薄层状-薄板状-页片状,水平层理发育,局部砂岩中发育波痕构造。

2 铁矿地质特征及矿床类型

根据地质年代学资料,区域铁矿可分为赋存于原下元古界布伦阔勒群中的沉积变质(或BIF)型铁矿,以赞坎、吉尔铁克沟铁矿等为例;赋存于下寒武统沉积岩中的海相沉积型含硫酸盐铁矿,以喀来子、叶里克、老井铁矿为例(图2)。

2.1 古元古代沉积变质铁矿

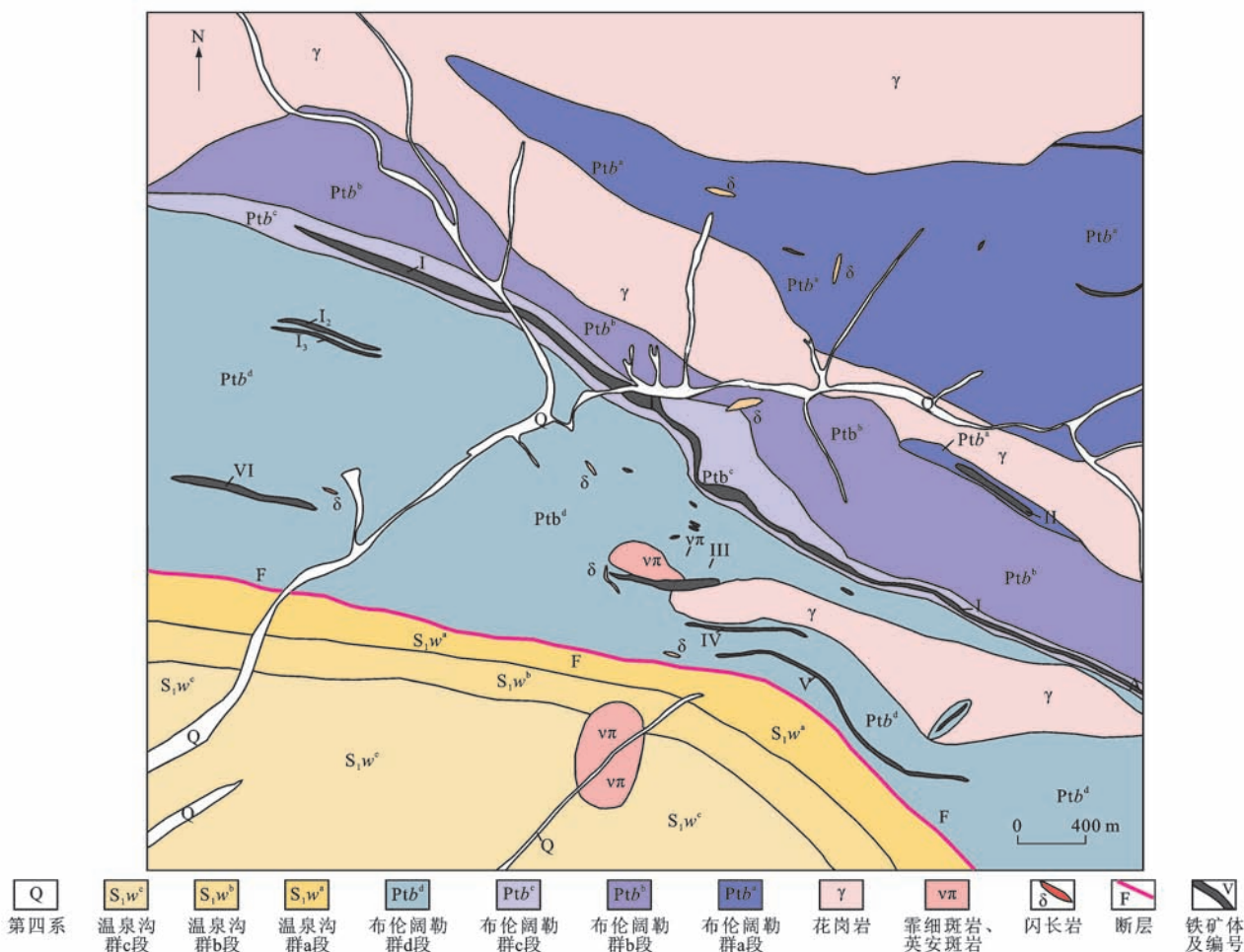
赞坎铁矿是古元古代沉积变质(或BIF)型铁矿的典型代表(图3)。该矿位于西昆仑造山带塔什库尔干地块南段、达布达尔东侧,矿区内出露地层主要为下元古界布伦阔勒群(Pt₁b)及下志留统温泉沟群(S₁w),地层总体呈单斜产出,走向为NW300°左右,倾向NE,倾角一般在30°~80°之间,矿区地层倒转产出,志留系地层被下元古界变质岩覆盖,二者之间为断层接触。矿区南部出露早古生代花岗岩及霏细

斑岩岩体。矿区北部大面积出露赞坎岩体,该岩体呈岩株状侵入于布伦阔勒岩群中,岩性为正长花岗岩(时代为11 Ma左右)。矿区断裂构造发育,主要呈NW—SE向延伸,次为EW向断裂。受断层活动影响,小型褶曲和层间滑动构造多见。

赞坎铁矿区已发现13条磁铁矿(化)体,其中主要矿体为I、II、III、IV。矿体产出严格受岩性界面控制。矿体主要呈层状、似层状产于下元古界布伦阔勒群地层中,赋矿岩性下部以角闪黑云石英片岩为主,中上部以角闪斜长片麻岩或黑云石英片麻岩为主,局部见硅质岩^[21]。矿体与围岩呈整合或渐变接触关系,或呈互层状产出,局部与围岩发生同步褶曲,具有明显的沉积成矿作用特征。I号矿体为矿区规模最大的一条工业矿体,位于矿区中部(图3),矿体总体走向为129°,倾向NE,倾角26°~70°。矿体沿走向长约5900 m,平均厚度21.2 m,局部厚度为50~102 m。矿体全铁(TFe)平均品位为28.12%,磁性铁(mFe)品位为23.58%;局部见富矿段,全铁平均品位大于50%,发育块状磁铁矿。按照矿物组合,矿石类型以角闪磁铁矿和石英磁铁矿为主。

矿体围岩黑云母石英片岩(原岩为酸性火山岩)锆石U-Pb年龄为(2375±81)Ma,大致反映沉积铁矿的形成时代^[5]。矿区出露两个捕获有铁矿体的岩体:花岗岩和霏细斑岩。花岗岩锆石U-Pb年龄为(504±26)Ma;霏细斑岩锆石U-Pb年龄为(520±33)Ma。两期岩体的侵入对铁矿有明显的改造和叠加作用。

矿区发育原生条带状、似条带状矿石[图4(a)~(c)],以及后期热液改造形成的浸染状和块状矿石[图4(d)、(e)],局部见角砾状矿石。其中,条带状磁铁矿石为矿区内常见的矿石类型之一,呈细粒粒状变晶结构,由磁铁矿和石英组成条带状构造,铁条带由磁铁矿、角闪石组成,单层厚2~8 mm,硅条带主要由石英组成,层厚3~12 mm。矿石矿物主要为磁铁矿(体积分数为35%~40%),脉石矿物为石英、角闪石;有的条带状矿石因后期热液作用改造,部分条带不完整,见活化的石英(脉),构成似条带状构造。致密块状磁铁矿石是矿区主要富矿石,矿石全铁品位一般在50%以上,矿石呈他形一半自形粒状结构;少量呈自形粒状结构和致密块状构造,矿石矿物磁铁矿占70%以上,伴生少量黄铁矿、磁黄铁矿,局部有黄铜矿等金属矿物,脉石矿物含量少,主要有角闪石、阳起石、方解石、透闪石等。角砾状矿石主



图件引自文献[5],有所修改

图3 塔什库尔干地块赞坎铁矿地质图

Fig.3 Geological Map of Zankan Iron Deposit in Taxkorgan Block

要出现在赞坎Ⅲ号矿体附近,角砾成分主要为铁矿石,呈棱角状-不规则状,大小不一,粒径一般为1~8 cm,胶结物为霏细斑岩。

赞坎Ⅰ号和Ⅲ号矿体主要地段发育条带状矿石,但由于受后期多次变质-构造-岩浆侵入事件的影响,常出现似块状、脉状和角砾状构造的矿石。Ⅰ号和Ⅲ号矿体明显受地层和岩性控制,并在矿体上盘见一套具明显沉积特征的硅质岩。Ⅲ号矿体东段和Ⅰ号矿体中段出现富矿,是受后期构造-岩浆热液作用改造的结果。

同位素组成分析表明,3种类型矿石中,磁铁矿的 $\delta^{18}\text{O}$ 值均为正值,变化范围在1.8‰~5.5‰之间,平均为3.79‰,都在原生沉积成因磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}$ 值范围内(1.3‰~6.8‰),且 $\delta^{18}\text{O}$ 值在后期变质作用中变化不大,反映原始沉积的 $\delta^{18}\text{O}$ 值特征。

赞坎铁矿的形成过程大致为:早元古代赋含铁质的基性-超基性岩浆大量喷发到海底,形成以玄武质为主体的新生洋壳(火山盆地);这时,由于大气

开始大量增氧(GOE),所以海洋上部水体含氧,下部水体缺氧;由于海底热液发生对流循环,从新生洋壳和火山岩中萃取了大量铁质及硅质,溶解于水体中;在海底洋流的作用下,含铁流体向浅部运移,在氧化-还原界面附近沉淀,形成条带状铁建造。

2.2 寒武纪海底火山-喷流(沉积)型铁矿

喀来子钼-铁矿床是研究区典型的寒武纪海底喷流沉积型矿床(图5)。该矿床位于西昆仑塔什库尔干地块东侧,矿体产于原“布伦阔勒群”变质沉积岩中,矿石以磁铁矿和重晶石为主组成条纹状-条带状构造,是西昆仑唯一发现的由磁铁矿-重晶石组成的钼-铁矿床。矿体围岩主要为变碎屑沉积岩(含石榴石二云石英片岩),含少量变火山岩(黑云斜长变粒岩和黑云斜长片麻岩等)。围岩黑云斜长片麻岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄将喀来子钼-铁矿床成矿年龄限定在 (537.2 ± 6.4) Ma左右^[17]。由此,本文推测原属下元古界的“布伦阔勒岩群”应分离出部分下寒武统火山-沉积岩系列。

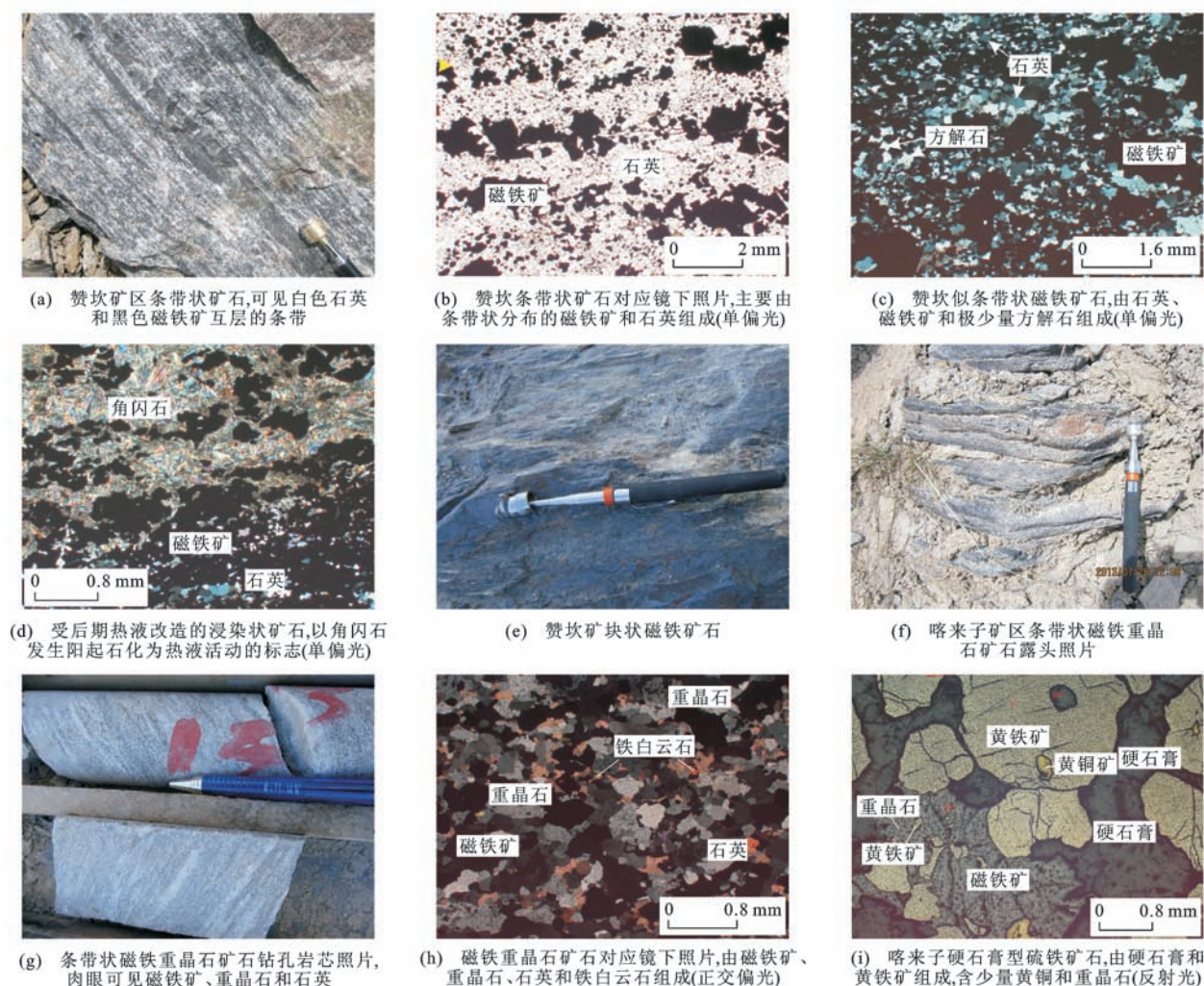


图4 塔什库尔干铁矿带主要类型铁矿石的野外及镜下特征

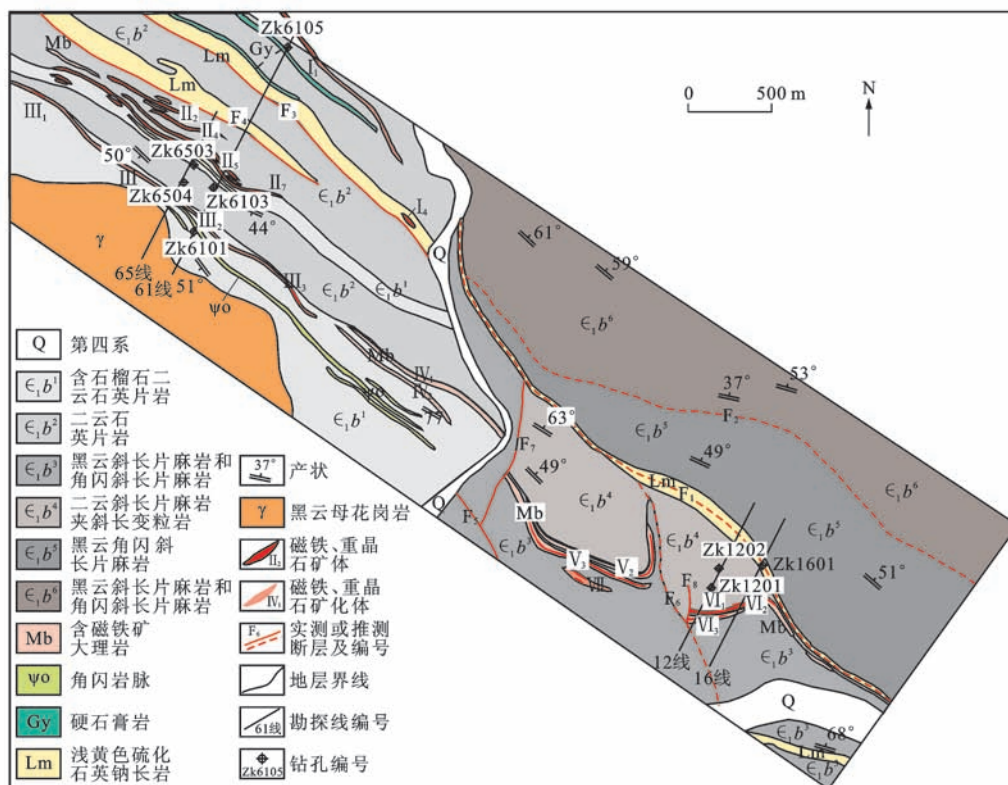
Fig. 4 Field and Microscopic Characteristics of Main Types of Iron Ores in Taxkorgan Iron Ore Belt

喀来子钼-铁矿区目前已发现7条规模较大的矿体(图5),矿体的产出和分布严格受到地层层位和岩性的控制。矿体围岩主要为(含石榴石)二云石英片岩,含少量黑云变粒岩和黑云斜长片麻岩等。矿体走向以NW—SE向为主,在矿区西部倾向SW(I~IV号),而在东部则倾向NE(V~VII号),呈层状、似层状产于含铁岩系中。其中,II号矿体是矿区最重要的矿体,以发育磁铁矿重晶石矿石为特征,为塔什库尔干铁矿带内独有的磁铁矿-重晶石建造。II号矿体整体长约2.0 km,宽50~200 m,可进一步划分为7个小规模矿体。单个矿体形态简单,具层状分布,与含石榴石二云石英片岩和二云石英片岩互层产出。磁铁矿重晶石矿石中磁铁矿品位一般在10%~45%之间,而重晶石品位相对较高,为10%~85%。另外,在磁铁矿重晶石矿石上盘硬石膏岩层中局部可见硫铁矿化及铅锌矿化。

矿区矿石类型主要为磁铁矿重晶石、大理岩型磁铁

矿和白云母石英型磁铁矿矿石,并含一定的硬石膏硫铁矿和石英硫铁矿矿石。磁铁矿重晶石矿石最为发育,主要产于II号矿体中,为半自形—他形粒状结构和条带状-条带状构造[图4(f)、(g)],主要由重晶石(体积分数为15%~80%,粒径为0.2~0.7 mm)、磁铁矿(体积分数为10%~30%,粒径为0.1~0.6 mm)、石英和铁白云石组成[图4(h)];大理岩型磁铁矿矿石产于IV、V和VI号矿体中,与大理岩呈渐变过渡关系;白云母石英型磁铁矿矿石产于III号矿体中,磁铁矿呈浸染状-条带状赋存于围岩白云石英片岩中,二者呈渐变过渡关系;硬石膏硫铁矿产于I和II号矿体中,矿石矿物黄铁矿呈浸染状-条带状分布于硬石膏岩中[图4(i)]。

郑梦天等依据喀来子钼-铁矿床地质特征,结合矿区磁铁矿氧同位素比值($\delta^{18}\text{O}$ 值为5.0‰~9.2‰)、硫酸盐硫同位素比值($\delta^{34}\text{S}$ 值为39.3‰~41.4‰)和黄铁矿硫同位素比值($\delta^{34}\text{S}$ 值为17.0‰~



图件引自文献[17]和[22],有所修改

图5 塔什库尔干地块喀来子矿区地质简图

Fig. 5 Geological Sketch Map of Kalaizi Deposit in Taxkorgan Block

23.5%)分析,认为喀来子钼-铁矿床为经历细菌还原作用(BSR)的热液喷流沉积(SEDEX)型矿床^[17]。成因机制可能为:在早寒武世半封闭的海水环境中,富含铁-钼的海底热液沿断裂等构造喷流至海底沉积成矿,其中重晶石为热液流体中钼与经细菌还原作用后残余的 SO_4^{2-} 反应生成的,磁铁矿形成于海底弱氧化条件下富铁热液的沉淀。

2.3 区域铁矿类型

近年来,国内外有关铁矿床成因类型主要包括岩浆岩型、矽卡岩型、火山岩型、沉积变质型(条带状)和海相沉积型。目前,研究者对于西昆仑地区的铁矿还存在火山岩型、沉积变质型(条带状)和海底火山-喷流沉积型等的不同认识。为了确定西昆仑有关铁矿类型,有必要对有关类型铁矿的基本地质特征进行对比研究(表2)。

2.3.1 火山岩型铁矿床

火山岩型铁矿床为在空间上、时间上与陆相或海相火山作用密切相关的一类矿床,具有规模大、富矿多、分布广、常成群或成带产出的特征。根据火山活动的阶段、喷发方式和火山岩相组合,该类矿床可分为火山喷溢-沉积型、火山热液交代型、次火山热液充填交代型、次火山岩浆贯入型及火山-沉积型等

多种矿化类型。它们之间存在一定的差异,但有密切的内在联系,不少矿区内常是多种矿化类型叠加或并存。其中,火山喷溢-沉积作用是形成富铁矿的重要成矿作用,由熔离作用形成的富铁熔浆经火山喷发和沉积作用沿断裂或火山口喷溢到达地表而形成。火山岩型铁矿根据铁围岩产出的环境可进一步分为陆相火山岩型铁矿和海相火山岩型铁矿:前者发育于陆相火山作用中侵入活动的中心部位,在空间上形成从侵入岩体到围岩、从高温到低温的一系列矿床,如长江中下游宁芜地区著名的“玢岩铁矿”^[23];后者多发育于海底火山喷发中心附近或周边的沉积岩中,铁矿床的形成受喷气沉积作用、岩浆热液作用、热液交代作用等的影响,最终形成在成因上紧密相关的矿床。中国天山地区(特别是西天山地区)海相火山岩分布广泛,与其有关的铁矿是天山地区最重要的矿床类型,且多以富铁矿为主^[1]。该类型铁矿围岩一般为中基性—中酸性火山岩、次火山岩或火山碎屑岩;铁矿体与火山岩层间整合或不整合,具有一定层位,受古火山活动中心控制;矿体形态较复杂,形状多样;围岩蚀变强烈,主要有透辉石化、阳起石化、绿帘石化、绿泥石化、石榴石化、钠长石化、硅化等;矿石矿物以磁铁矿为主,其次有穆

表 2 典型铁矿类型地质特征对比

Tab. 2 Comparison of Geological Features Among Typical Types of Iron Deposits

铁矿类型	阿尔戈玛型 条带状铁建造	苏必利尔型 条带状铁建造	海相火山- 沉积岩型铁矿	海相沉积型铁矿	赞坎铁矿(叠加改 造的条带状铁矿)	喀来子—老并铁矿 (喷流沉积型铁矿)
分布时代	古元古宙为主, 2.4~2.5、1.8~ 1.9 Ga 为高峰期	古元古宙为主, 2.4~2.5、1.8~ 1.9 Ga 为高峰期	古生代为主,少量 元古代、中生代	主要时代为元古 代、泥盆纪、石炭纪	2.2~2.4 Ga	510~540 Ma
含铁岩系的 原岩建造类型	与碎屑岩-碳酸盐 岩联系紧密;铁矿 主要分布于沉积 碎屑岩与碳酸盐 岩之间	与碎屑岩-碳酸盐 岩联系紧密;铁矿 主要分布于沉积 碎屑岩与碳酸盐 岩之间	围岩一般为中基 性—中酸性火山 岩、次火山岩或火 山碎屑岩	围岩一般为海相 粉砂岩向页岩或 碳酸盐岩过渡部位	基性火山岩与细 碎屑沉积岩的过 渡带;后期有热液 改造叠加,硅质岩 发育	双峰式火山岩与 沉积岩的过渡带; 硫酸盐岩发育
沉积构造 环境	被动大陆边缘,大 陆架浅海环境,克 拉通内部盆地	被动大陆边缘,大 陆架浅海环境,克 拉通内部盆地	裂谷、岛弧环境	主要产于海相环 境的坳陷带和沉 陷盆地内	与岛弧有关的弧 后盆地	断陷盆地
沉积相	主要为氧化物相, 可见原生的赤铁 矿相	主要为氧化物相, 可见原生的赤铁 矿相	磁铁矿-赤铁矿	菱铁矿-赤铁矿-碳 酸盐相	主要为氧化物相、 硅酸盐相	主要为氧化物相、 硫酸盐相
矿石特征	主要为条带状和 块状赤铁矿-磁铁 矿;矿石品位高, 矿体厚度大	主要为条带状和 块状赤铁矿-磁铁 矿;矿石品位高, 矿体厚度大	块状、浸染状、脉状	块状、条带状矿 产,矿体多呈层 状、透镜状	角闪磁铁矿和石 英磁铁矿为主	重晶石磁铁矿、硬 石膏磁铁矿和石 英磁铁矿
同位素组成	磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 10‰~15‰	磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 10‰~15‰	磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 3.4‰~6.4‰	磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 10‰~16‰	磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 14.7‰~21.8‰、 3.9‰~7.4‰	磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 3.3‰~7.2‰
矿石 PAAS 配分模式	重稀土元素富集	重稀土元素富集	重稀土元素亏损		重稀土元素富集	轻稀土元素富集
变质变形	变质程度浅,一般 为绿片岩相,变形弱, 混合岩化不明显	变质程度浅,一般 为绿片岩相,变形弱, 混合岩化不明显	变质变形弱,热液 蚀变明显	变质变形弱	变形强烈、角闪岩相	变余组构常见,低 角闪岩相变质
富矿情况	存在风化壳型的 富矿,规模巨大	存在风化壳型的 富矿,规模巨大	富矿,常见矽卡岩 铁矿叠加	经复合成矿作用, 有后期热液叠加 或改造	强烈的热液改造 富集	构造控矿明显
典型地区和 矿床	美国—加拿大 Su- perior 湖地区、澳 大利亚 Hamers- ley 地区等	美国—加拿大 Su- perior 湖地区、澳 大利亚 Hamers- ley 地区等	西天山的备战铁 矿、智博和查岗诺 尔铁矿等	宣龙式和宁乡式 铁矿,西昆仑契列 克其等铁矿床	赞坎、莫喀尔、吉 尔铁克沟等	喀来子、叶里克、 老并等
资料来源	文献[24]	文献[24]	文献[25]	本文	本文	本文

磁铁矿、赤铁矿、磁赤铁矿等;矿石构造一般为块状、浸染状,品位较富;空间上,矿床常产于火山活动中心或附近,如西天山的备战铁矿、智博铁矿和查岗诺尔铁矿等^[25-26]。

2.3.2 海相沉积型铁矿床

海相沉积型铁矿床是在浅海或滨海环境中由沉积作用形成的铁矿,产于海相环境的坳陷带和沉陷盆地内。铁矿产出受一定的地层层位控制,主要时代为元古代、泥盆纪、石炭纪。其矿化常产于粉砂岩向页岩或碳酸盐岩过渡部位,矿体形态有层状、似层状、透镜状,也可呈扁豆状、脉状、不规则状。围岩蚀变有阳起石化、绿帘石化、绢云母化、绿泥石化、硅化、矽卡岩化等。矿石矿物主要为赤铁矿和菱铁矿,含少量磁铁矿。矿石以块状、浸染状、条带状构造为

主。海相沉积型铁矿床经复合成矿作用,有后期热液叠加或改造;其分布较为广泛,有宣龙式和宁乡式铁矿,在新疆有鄯善县梧桐沟、阿克陶县契列克其等铁矿床。

2.3.3 沉积变质型(条带状)铁矿

前寒武纪条带状铁建造是一种化学沉积岩,主要由硅质(碧玉、燧石、石英)和铁质(磁铁矿、赤铁矿)组成;Fe 含量(质量分数,下同)必须不小于 15%才能组成条带状构造或韵律层^[27]。在中国,由于 BIF 型铁矿床都遭受了变质而被称为沉积变质型铁矿床。该类矿床主要由变质重结晶石英、铁氧化物、铁硅酸盐和碳酸盐矿物等组成,广泛分布在华北克拉通的辽宁鞍山—本溪地区、冀东等地^[24,28-29]。近年来,在一些造山带,如秦岭造山带(鱼洞子式铁

矿)、祁连造山带(镜铁山式铁矿)和东天山地区(天湖式铁矿)也有沉积变质型铁矿床的报道。

2.3.4 喷流沉积(SEDEX)型铁矿床

喷流沉积型铁矿床多形成于古生代裂陷盆地环境,与海底喷流岩(硅质岩、铁碳酸盐岩及重晶石岩)关系密切,所形成的磁铁矿常与黄铁矿、黄铜矿、方铅矿及闪锌矿伴生,如阿尔泰泥盆纪地层中的铁尔木特铁铜铅锌矿。

2.3.5 小结

通过对比可见,塔什库尔干铁矿产于早寒武世和元古代变质火山-沉积岩系中,可以统称为沉积变质型铁矿。但根据铁矿成因、时代、铁建造类型及后期改造叠加程度,其进一步可划分为受变质及热液叠加改造的条带状铁建造(BIF)型铁矿和受变质的海底火山-喷流沉积型铁矿。

3 区域铁矿成矿环境与矿床成因

综合塔什库尔干地块有关铁矿的地质特征、含矿建造类型及围岩岩性差异,该地区在古元古代与早寒武世有不同的成矿环境,并具有不同的矿床成因。

3.1 古元古代

计文化等认为,下元古界布伦阔勒群中片理化变流纹岩(年龄为2481 Ma)与玄武岩、玄武安山岩互层状产出,共同组成布伦阔勒群的下元古界组分^[13]。 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(3.14~4.88)及微量元素地球化学特征显示其具有亏损地幔源区特征,反映本地区古元古代是地壳快速增生的时期;该时期火山活动强烈,为铁矿成矿提供了大量的物质来源。赞坎矿区斜长角闪片岩的原岩为拉斑玄武岩性质,进一步推测其构造背景为岛弧-弧后盆地环境。

赞坎地区硅质岩的地球化学特征与活动大陆边缘硅质岩特征基本一致^[21]。赞坎地区硅质岩(PAAS配分模式)具有明显的Ce负异常,赞坎和吉尔铁克沟铁条带状矿石稀土元素配分模式也出现负Eu异常;这些均反映了沉积环境的弱氧化条件。赞坎矿区条带状磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}$ 值在14.7‰~21.8‰之间,明显高于喀来子、叶里克矿区磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}$ 值,同样反映了赞坎沉积成岩(矿)的环境不同于后者。在地质历史上,大氧化事件开始于2.3~2.4 Ga区间^[30-32],这与赞坎地区古元古代早期硅质岩形成时的弱氧化环境基本吻合。

赞坎铁建造主要含铁矿物为磁铁矿。磁铁矿化学特征和形成条件反映其主要是在较低氧逸度下的中性到碱性环境(pH=6~9)中形成的。还原弱酸

性的深部富铁海水在海侵过程中上升到浅部相对氧化和弱碱性的浅水环境中,因Eh、pH值及氧逸度的变化,导致铁质沉淀和铁建造的形成。条带状建造的特点是硅质和铁质交替沉积;二氧化硅沉积需要较低的pH值环境,当pH=5时, SiO_2 溶解量为 $109\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而当pH=6时,便增加到 $218\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;而铁的氢氧化物沉积则需要较高的pH值环境,若是 Fe^{3+} 沉积,还需要较高的氧化环境。因此,硅质和铁质的交替沉积说明当时沉积环境的pH值处于一种交替变化之中。高pH值和高氧以及低pH值和低氧的交替变化推测可能是因海底热液周期性活动引起的。

通过矿床地质、矿石地球化学和稳定同位素组成研究,赞坎—吉尔铁克沟铁矿床的铁质主要来源于海底热液淋滤的基性火山岩和少量的陆缘物质,沉积环境为弱氧化—还原、低硫的海相环境。主要依据有以下几个方面:

(1)赞坎等矿区的磁铁矿与基性火山岩变质而成的斜长角闪片岩关系密切。矿体的顶、底板岩石主要由斜长角闪片岩和黑云石英片岩组成,有的磁铁矿化与顶、底板斜长角闪片岩呈渐变过渡和互层产出。吉尔铁克沟条带状铁矿石和部分赞坎条带状铁矿石的微量、稀土元素特征(Eu明显的正异常)显示海底热液条件下沉积成矿的特征,其成矿物质来源推测与海底热液淋滤基性火山岩中的铁质有关。

(2)吉尔铁克沟部分条带状铁矿石PAAS配分模式出现Ce的负异常(Ce/Ce^* 值为0.72~0.95),而赞坎铁矿也有弱的Ce负异常,表明区域铁建造沉积时海水处于弱氧化—还原状态。赞坎铁矿床矿石轻稀土元素富集,重稀土元素亏损,Th、U含量高。与沉积变质型铁矿床对比,赞坎铁矿床矿石微量元素Ce、Y无明显异常,部分矿石Eu显示正异常,Eu正异常是海底高温热液的特征^[32-34],说明赞坎铁矿床矿石中的稀土元素部分来自海底热液。Bhatia等研究认为 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值可以作为确定物源类型的标志^[35]。当 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值约为4.5时,其物源主要以沉积岩为主,可能有岛弧火山碎屑岩的混入。赞坎铁矿 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值为0.02~13.09,平均为2.60,且 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 值为0.11~4.47,平均0.99,综合显示铁矿与陆源沉积岩有一定关系^[36-37]。其中, $w(\cdot)$ 为元素含量。

(3)赞坎铁矿床矿石中的磁铁矿矿物微区原位(LA-ICP-MS)分析表明,磁铁矿颗粒的 FeO^{T} 含量为99.00%~99.21%,平均为99.05%,杂质成分

Cr_2O_3 、 Al_2O_3 、 V_2O_5 、 TiO_2 、 MnO 、 MgO 含量低,具明显的沉积变质型铁矿床特征。矿物学分析(X射线衍射)表明,磁铁矿的晶胞参数为 $a=b=c=8.398 \text{ \AA}$,支持赞坎铁矿属于沉积变质成因^[21]。其中, a 、 b 、 c 为 3 组棱长。

(4)通过与海相火山岩型、海相沉积型和条带状铁建造型铁矿的基本地质特征进行比较,笔者认为赞坎—吉尔铁克沟铁矿的成因类型为前寒武纪条带状铁建造型铁矿。但由于该铁矿形成后被卷入到强烈的造山过程中并经历了强烈的变质变形作用,部分矿体遭受了强烈的改造和后期热液的叠加。

早元古代富含铁质的幔源基性—超基性岩浆大量喷发到海底,形成以基性—超基性岩为主体的新生洋壳(火山盆地)。这时由于大气刚开始增氧,海洋仅上部水体含氧,其下部巨大体积的水体缺氧。由于海底热液发生对流循环,从新生洋壳和火山岩中萃取了大量的铁质及硅质,溶解于水体中。在海底洋流的作用下,含铁流体向浅部运移,在氧化—还原界面附近沉淀,形成条带状铁建造。由于海水深度的不同,可形成不同的铁矿物相,具有特定的相变分带。火山中心部位及附近深海的铁以硫化物相沉淀。在浅海区,受海底火山活动和陆源水、陆源碎屑物质的加入,在弱酸性—弱碱性环境下,铁质以氧化物相沉淀。铁建造形成后经区域变质作用形成赞坎和吉尔铁克沟铁矿(图 6)。

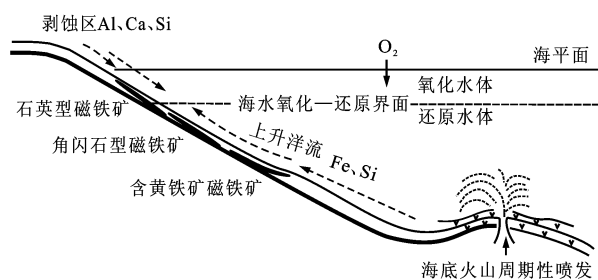


图 6 赞坎铁矿和吉尔铁克沟铁矿成矿模式

Fig. 6 Metallogenic Model of Zankan and Jiertekegou Iron Deposits

3.2 早寒武世

塔什库尔干喀来子—叶里克早寒武世铁矿带发育在元古代基底上。由于元古代基底含有丰富的硅铁建造(和矿源层),当该铁矿带处于伸展断陷盆地环境时,同生断裂活动促使海底热液循环对流,淋滤下伏地层中的铁质,在海底适宜条件发生沉淀。

燕北海等研究认为,在老井一带伴随有同生断裂构造,致使盆地呈阶地状断陷展布。老井矿区在同生断裂发育的地段往往可见绿色斜长角闪片岩、

绿泥石片岩、黑云母石英片岩以及磁铁矿层与同生角砾岩呈“共生”关系^[6-7]。这反映出同生断裂、基性火山岩和矿化之间具有一定的耦合关系。同生断裂构造还制约着火山沉积盆地形成演化,不仅导致盆地内基性火山岩喷发,而且也是盆地内深部地壳热液、铁质等源源不断向盆地内集中释放堆积的重要通道,更是沉积铁矿床形成的关键所在。在老井铁矿床中有时可见原生沉积鲕状组构^[6-7]。含磁铁变质砂岩具明显的碎屑结构,主要由磁铁矿和石英碎屑构成,胶结物为泥质,其中含有球形鲕粒,呈圆形,具同心环带构造。鲕状组构一般大小为 $100 \mu\text{m}$,内核为铁质物,外圈是由石英构成的鲕粒。根据变质砂岩的产出地质条件和鲕粒的特征,铁矿是在滨海—浅海波动的水体介质中由化学作用和机械作用综合影响形成的。黑云母石英片岩(磁铁石英岩)主要产于第二岩性段,主要发育在老井及塔阿西铁矿。老井铁矿岩性从底部到上部主要为大理岩、二云石英片岩、石英片岩—石膏—磁铁矿段、黑云母石英片岩段。该矿区含矿岩性典型特征是石膏磁铁矿的出现。初步研究表明,该含矿建造铁矿物部分来源于陆缘碎屑物质,其形成环境为受局限的断陷盆地环境。

喀来子矿区内广泛发育含磁铁矿的重晶石岩、硅质岩和钠长岩等具热水喷流岩,反映了海底热液活动频繁。通过分析与磁铁矿共生的黄铁矿及硫酸盐(硬石膏和重晶石)的硫同位素比值,喀来子矿区黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $16.80\text{‰} \sim 23.46\text{‰}$,变化范围较小,暗示为单一来源的硫。喀来子矿区硫酸盐 $\delta^{34}\text{S}$ 值均较高,5 个重晶石样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $39.27\text{‰} \sim 42.77\text{‰}$,3 个硬石膏样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $39.50\text{‰} \sim 40.70\text{‰}$,硬石膏与重晶石硫同位素特征说明二者硫具有一致且单一的来源。这些黄铁矿中的硫均来自于海水硫酸盐的微生物还原作用。金属成矿物质来源于海底喷流作用,并通过喷发作用运移、上升和沉淀,同时从碳酸盐地层中淋滤出的元素 Ca 与海水硫酸盐结合形成硬石膏,以黄铁矿为主的硫化物应在海底硫酸盐还原后与铁质结合形成^[17]。因此,该期形成一套早古生代泥质碎屑岩—碳酸盐岩—硫酸盐岩—磁铁矿沉积建造,主要喷流沉积的矿物包含磁铁矿、黄铁矿、硬石膏、钠长石及石英等。

重晶石—磁铁矿共生是喀来子矿区成矿的特色,在现代海水富硫酸盐条件下不可能大规模形成磁铁矿沉淀^[38],但随着海水温度的提高(从 25°C 到 75°C),重晶石与磁铁矿趋向于共生,如海水温度进一步升高(如 $100^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$),即有海底高温热液的参与,

推测重晶石与磁铁矿在 $\text{pH}=7\sim 8$ 、 $\text{Eh}>0$ 的条件下是可以共生的。

综合研究表明,喀来子—叶里克一带硫酸盐(重晶石-硬石膏)-磁铁矿建造的形成与海底喷流沉积作用有关。其成矿过程大致为:在早寒武世断陷盆地内,海底热液沿同生断裂循环对流,淋滤大量下伏

SO_4^{2-} 结合形成重晶石,而 Fe 与 SO_4^{2-} 还原后形成的 S^{2-} 相结合形成黄铁矿,硬石膏则是成矿热液萃取围岩大理岩中的 Ca^{2+} ,并与 SO_4^{2-} 结合形成的。喷流沉积作用提供的大量铁质流体在海水中逐渐聚集,在相对较高的 Eh 和 pH 值条件下逐渐沉淀,形成硫酸盐-铁建造(图 7)。

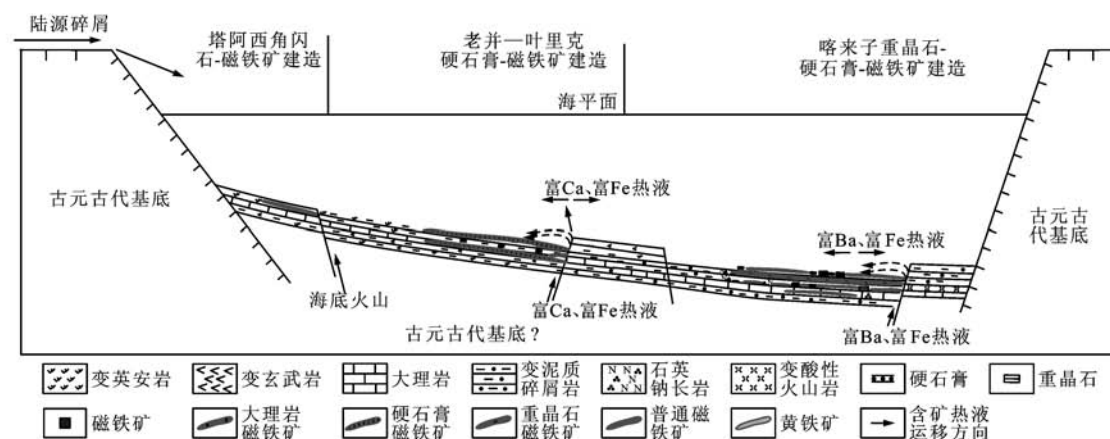


图7 喀来子—叶里克—老井铁矿成矿模式

Fig. 7 Metallogenic Model of Kalaizi-Yelike-Laobing Iron Deposits

4 区域铁矿带成矿规律

4.1 铁矿床的空间展布规律

(1)塔什库尔干地块铁矿床在空间上存在2个矿带(图2):一是受古元古代布伦阔勒群变质岩控制,沿近NNW向展布,分布有赞坎—莫喀尔铁矿、吉尔铁克沟铁矿等;二是受早寒武世裂陷盆地控制,沿喀来子—叶里克一线近EW向展布,分布有莫拉赫—喀来子铁矿、老井铁矿、叶里克铁矿和塔阿西铁矿等。

(2)铁矿体受地层岩性控制。研究区由于层位、岩性和构造位置的差异,矿石矿物组合、品位和矿体规模存在明显的差异。

古元古代布伦阔勒群中的铁矿主要受角闪斜长片岩控制,发育角闪磁铁矿石,含赞坎、莫喀尔、吉尔铁克沟等矿区。岩性从底部到顶部分别为黑云石英片岩夹角闪斜长片岩段、角闪斜长片岩-磁铁矿岩段、黑云石英片岩段。含矿岩性典型特征是以角闪片岩为主。而吉尔铁克矿区发育典型的条带状铁建造,其围岩岩性以黑云母石英片岩为主。

早寒武世变砂岩段发育石膏磁铁矿建造,含老井和叶里克铁矿区。岩性从底部到上部主要为大理岩、二云石英片岩、石英片岩-石膏-磁铁矿段、黑云石英片岩段。含矿岩性典型特征是石膏磁铁矿的出现。二云母石英片岩段中常发育喀来子式的重晶石

磁铁矿石。致密块状的富矿体主要产于含砂质成分较高的早寒武世地层中,岩性从底部到顶部主要为黑云石英片岩、重晶石-磁铁矿段、大理岩-磁铁矿段、黑云石英片岩段。含矿建造典型特征是重晶石-磁铁矿建造的出现,其中局部地段重晶石体积分数超过40%。从喀来子到叶里克矿区,总体来看,火山岩成分增多,喷流沉积减少,矿物组合从以重晶石-磁铁矿为主转变为以角闪石型磁铁矿为主。

(3)矿体走向与区域构造线方向基本一致。区域上,磁铁矿化沿走向连续性较好,延伸较为稳定,但工业矿体沿走向方向延伸不稳定,一般呈透镜状断续分布。在垂直方向,矿体受火山-沉积建造原始沉积旋回控制,出现多层磁铁矿化层,同时矿化类型和规模也具有明显的空间分带特征。以赞坎铁矿床为例,磁铁矿化在空间上具有明显的分带特征,自南向北依次可分为3个含矿带,出现了多层磁铁矿(化)体(层),但其矿化强度及矿体规模依次减弱。底部含矿带以磁铁矿化为主,矿体规模大,矿石品位相对较高;中、上部含矿层磁铁矿化程度较弱。

(4)局部富矿主要受构造和岩体接触带控制。早寒武世富矿体受后期褶皱构造控制,如老井矿区沿走向方向矿体往往会产生局部增厚、减薄或尖灭的特征,一般在背斜倾伏转折端虚脱部位和向斜核部处矿体厚度增大,品位也相对增高。而古元古代赞坎矿区富矿体主要出现在断裂构造的

转弯处(如Ⅰ号矿体)和后期岩体的接触部位(如Ⅲ号矿体)。

4.2 区域铁矿成矿时间演化规律

区内铁矿主要集中在古元古代、早古生代2个重要成矿期,且不同时期形成的矿产类型和组合各具特色,经历了不同的演化历史。

(1)古元古代为区内铁矿形成的主要时期,形成前寒武纪条带状铁建造,已知有赞坎、莫喀尔和吉尔铁克等铁矿。该时期塔什库尔干地块经受了强烈的海底火山作用,海底火山活动带来了大量的成矿物质,在一定地质条件下形成了含铁沉积建造。该含铁沉积建造在区内分布较为广泛且厚度巨大,为铁矿床的形成提供了丰富的物质基础和赋矿空间。

(2)晚元古代因塔什库尔干地块与明铁盖地块之间发生拼合,使区域发生强烈变质作用和抬升。

(3)早寒武世以塔什库尔干地块布伦阔勒群为基底,区域构造沿NWW—EW向形成断陷盆地,发育独特的膏铁建造及重晶石磁铁建造。同时,区域岩浆活动和成岩变质作用使得原硫酸盐-铁建造发生变质作用,其时代大致在510~540 Ma之间。在赞坎矿区,霏细斑岩常沿地层片理侵入,在其侵入附近常是磁铁矿的富矿部位。此时,硫化物相对较发育,常形成脉状或条带状黄铁矿,黄铁矿发育地段常是磁铁矿富集部位。

(4)海西期—三叠纪晚期,由于西昆仑构造带俯冲挤压,在东西两侧塔阿西、康西瓦大断裂带共同作用下,区域地层构造变形是以一系列宽缓褶皱构造变形为特征,这也使得区内磁铁矿体同样产生相应的变形,铁矿层和地层一起形成褶皱,但由于其具有一定的刚性特征,褶皱没有围岩强烈,矿体沿走向往往会产生局部的增厚、减薄或尖灭。一般在背斜倾伏转折端虚脱部位和向斜核部处,矿体厚度增大且品位也相对增高。

(5)燕山期—喜山期,本区域发育碱性岩侵入体,使得与岩体接触处发生稀土元素矿化或稀土元素含量增高的现象。如赞坎矿区Ⅳ号矿体相比Ⅰ号矿体远离碱性岩体,矿石轻稀土元素含量不高,而近碱性岩体的轻稀土元素含量增高。

5 结 语

(1)西昆仑塔什库尔干地块原“布伦阔勒群”实际上发育古元古代(2 100~2 500 Ma)、寒武纪早期(510~540 Ma)等两期沉积成矿事件,同时在中晚元古代(800~1 800 Ma)和海西期—印支期(200~

410 Ma)分别发生过强烈的变质和变形作用,而局部富矿的形成可能与区域次火山岩-侵入岩活动及后期构造-热液作用有关。不同层位的含铁建造有明显的区别:古元古代含铁岩系以黑云石英片岩、斜长角闪片岩为主,夹石英岩(硅质岩)和条带状铁矿,推测原岩为基性火山岩-细碎屑岩-硅质岩-条带状硅铁建造;寒武纪早期以变砂岩、黑云(二云)石英片岩夹大理岩、石膏及重晶石岩为主,原岩为火山沉积-碳酸盐岩-石膏层-重晶石-铁建造。

(2)通过典型铁矿地质、矿床地球化学研究,将研究区铁矿划分为2种类型。第一种为条带状铁建造受后期热液叠加改造的沉积变质型铁矿床。以赞坎、莫喀尔和吉尔铁克沟为例,其成矿主期的形成条件为早元古代岛弧背景的海相弱氧化—还原的海水沉积环境,成矿物质来源于海底热液对基性火山岩的淋滤及少量陆源物质。古元古代铁矿经历了沉积成岩、变质、热液改造和变质变形等4期成矿-热事件。第二种为早寒武世海相火山沉积和海底喷流沉积形成的沉积变质型铁矿。以喀来子、老井和叶里克为例,其形成环境为半深海—浅海相、弱氧化—半氧化的受局限断陷盆地。其成矿成岩物质主要来源于海底热水沉积及陆源碎屑。研究表明,早寒武世铁矿主要经历了沉积成岩、热液改造和变质变形等3期成矿-热事件。

(3)卡拉本—喀来子铁-多金属分布区是寻找与海底喷流成矿系统有关的多金属矿的有利地区,推测是喀来子矿区的延伸。该区岩浆活动和断裂发育,进一步工作有望在铁、铜、铅锌矿、重晶石及硫铁矿等方面取得找矿突破;吉尔铁克沟—赞坎北地区、莫喀尔及其以南地区是赞坎铁矿带的北延和南延,是寻找沉积变质型铁矿的最有利地区。

参考文献:

References:

- [1] 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 Lian-hui, FENG Jing, ZHUANG Dao-ze, et al. Discussion of Metallogenic Models, Mineralization Characteristic and Main Type of Rich Iron Ore of Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2011, 29(4): 416-422.
- [2] 冯昌荣,何立东,郝延海,等.新疆塔什库尔干县一带铁多金属矿床成矿地质特征及找矿潜力分析[J].大地构造与成矿学,2012,36(1): 102-110.
FENG Chang-rong, HE Li-dong, HAO Yan-hai, et al.

- Features and Potential Analysis of the Iron Polymetallic Deposits in the Taxkorgan Area, Xinjiang[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2012, 36(1): 102-110.
- [3] 陈俊魁, 燕长海, 张旺生, 等. 新疆塔什库尔干地区磁铁矿床地质特征与找矿方向[J]. *地质调查与研究*, 2011, 34(3): 179-189.
- CHEN Jun-kui, YAN Chang-hai, ZHANG Wang-sheng, et al. Geological Characteristics and Prospecting Direction of the Magnetite Iron Deposits in the Taxkorgan, Xinjiang[J]. *Geological Survey and Research*, 2011, 34(3): 179-189.
- [4] 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]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2011, 35(3): 404-409.
- [5] 李智泉, 张连昌, 薛春纪, 等. 西昆仑赞坎铁矿地质和地球化学特征及矿床类型探讨[J]. *地质科学*, 2015, 50(1): 100-117.
- LI Zhi-quan, ZHANG Lian-chang, XUE Chun-ji, et al. Geological and Geochemical Characteristics of Zankan Iron Deposit in the West Kunlun Mountains[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2015, 50(1): 100-117.
- [6] 燕长海, 陈曹军, 曹新志, 等. 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, et al. The Discovery of the “Pamir-type” Iron Deposits in Taxkorgan Area of Xinjiang and Its Geological Significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(4): 549-557.
- [7] 燕长海, 曹新志, 张旺生, 等. 帕米尔式铁矿[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
- YAN Chang-hai, CAO Xin-zhi, ZHANG Wang-sheng, et al. The Pamir-type Iron Deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012.
- [8] 陈曹军. 新疆塔什库尔干地区铁矿床成矿规律及找矿方向研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- CHEN Cao-jun. Study of Metallogenic Regularity and Prospecting Direction of Iron Deposits in Taxkorgan Area, Xinjiang Province[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2012.
- [9] 黄朝阳. 西昆仑布伦托勒群铁矿床地质特征及成因研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- HUANG Chao-yang. Geological Characteristics and Genesis of the Iron Ore Deposit in Bulunkuo Group, West Kunlun, Xinjiang[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [10] 毕华, 王中刚, 王元龙, 等. 西昆仑造山带构造-岩浆演化史[J]. *中国科学: D辑, 地球科学*, 1999, 29(5): 398-406.
- BI Hua, WANG Zhong-gang, WANG Yuan-long, et al. The Evolution History of Tectonic-magmatic Activity in West Kunlun Orogenic Belt[J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 1999, 29(5): 398-406.
- [11] 董永观, 郭坤一, 肖惠良, 等. 西昆仑地区成矿远景[J]. *中国地质*, 2003, 30(2): 173-178.
- DONG Yong-guan, GUO Kun-yi, XIAO Hui-liang, et al. Ore Prospects of the West Kunlun Area in Western China[J]. *Geology in China*, 2003, 30(2): 173-178.
- [12] 何国琦, 朱永峰. 中国新疆及其邻区地质矿产对比研究[J]. *中国地质*, 2006, 33(3): 451-460.
- HE Guo-qi, ZHU Yong-feng. Comparative Study of the Geology and Mineral Resources in Xinjiang, China, and Its Adjacent Regions[J]. *Geology in China*, 2006, 33(3): 451-460.
- [13] 计文化, 李荣社, 陈守建, 等. 甜水海地块古元古代火山岩的发现及其地质意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(9): 1268-1280.
- JI Wen-hua, LI Rong-she, CHEN Shou-jian, et al. The Discovery of Palaeoproterozoic Volcanic Rocks in the Tianshuihai Massif in Xinjiang of Northwest China and Its Geological Significance[J]. *Science in China: Earth Science*, 2011, 41(9): 1268-1280.
- [14] 杨文强. 西昆仑塔县—康西瓦构造带印支期变质、岩浆作用及布伦托勒岩群的形成时代[D]. 西安: 西北大学, 2013.
- YANG Wen-qiang. The Indosinian Metamorphism, Magmatism and Formation Age of Bulunkuo Rock Group in Taxkorgan-Kangxiwar Tectonic Belt, Western Kunlun[D]. Xi'an: Northwest University, 2013.
- [15] 张传林, 陆松年, 于海锋, 等. 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 测年证据[J]. *中国科学: D辑, 地球科学*, 2007, 37(2): 145-154.
- ZHANG Chuan-lin, LU Song-nian, YU Hai-feng, et al. Tectonic Evolution of the Western Kunlun Orogenic Belt in Northern Qinghai-Tibet Plateau: Evidence from Zircon SHRIMP and LA-ICP-MS U-Pb Geochronology[J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 2007, 37(2): 145-154.
- [16] 孙海田, 李纯杰, 吴海, 等. 西昆仑金属成矿省概论[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- SUN Hai-tian, LI Chun-jie, WU Hai, et al. Introduction

- tion to Metallogenic Province in Western Kunlun [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003.
- [17] 郑梦天, 张连昌, 朱明田, 等. 西昆仑喀来子钽-铁矿床地质特征、时代及成因探讨[J]. 地学前缘, 2016, 23(3): 531-542.
- ZHENG Meng-tian, ZHANG Lian-chang, ZHU Ming-tian, et al. Geological Characteristics, Formation Age and Genesis of the Kalaizi Ba-Fe Deposit in West Kunlun[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(3): 531-542.
- [18] 高晓峰, 校培喜, 康磊, 等. 新疆塔什库尔干塔阿西一带火山岩成因及地质意义[J]. 地球科学, 2013, 38(6): 1169-1182.
- GAO Xiao-feng, XIAO Pei-xi, KANG Lei, et al. Origin of the Volcanic Rocks from the Ta'axi Region, Taxkorgan Xinjiang and Its Geological Significance[J]. Earth Science, 2013, 38(6): 1169-1182.
- [19] 王世炎, 彭松民, 张彦启, 等. 新疆 1: 250 000 克克吐鲁克幅、塔什库尔干塔吉克自治县幅区域地质调查报告[R]. 郑州: 河南省地质调查院, 2004.
- WANG Shi-yan, PENG Song-min, ZHANG Yan-qi, et al. Report of Regional Geological Survey of 1: 250 000 Keketuluke and Taxkorgan Tajik Autonomous County in Xinjiang[R]. Zhengzhou: Henan Institute of Geological Survey, 2004.
- [20] 张连昌, 朱明田, 郝延海, 等. 新疆塔什库尔干铁矿带成矿环境及找矿预测[R]. 乌鲁木齐: 新疆地质矿产勘查开发局, 2015.
- ZHANG Lian-chang, ZHU Ming-tian, HAO Yan-hai, et al. Metallogenic Environments and Ore Prospecting of Taxkorgan Iron Ore Belt in Xinjiang[R]. Urumqi: Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, 2015.
- [21] 李红中, 翟明国, 张连昌, 等. 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, et al. Study on Geochemistry and Micro-area Characteristics of Paleoproterozoic Chemical Sedimentary Rocks from Zankan Area, West Kunlun, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(1): 233-250.
- [22] 何立东, 买买提明. 莫拉赫铁矿床地质特征及其成因的初步探讨[J]. 新疆有色金属, 2013, 36(增1): 19-22.
- HE Li-dong, MAIMAITIMING. Study on Geological Characteristics and Origin from Molahe Iron Deposit[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2013, 36(S1): 19-22.
- [23] 袁家铮, 张峰, 殷纯嘏, 等. 梅山铁矿矿浆成因的系统探讨[J]. 现代地质, 1997, 11(2): 170-176.
- YUAN Jia-zheng, ZHANG Feng, YIN Chun-gu, et al. Systematical Study on Ore-magma Genesis of Meishan Iron Ore Deposits[J]. Geoscience, 1997, 11(2): 170-176.
- [24] 张连昌, 代堰镨, 王长乐, 等. 鞍山—本溪地区前寒武纪条带状铁建造铁矿时代、物质来源与形成环境[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(4): 1-16.
- ZHANG Lian-chang, DAI Yan-pei, WANG Chang-le, et al. Age, Material Sources and Formation Setting of Proterozoic BIF Iron Deposits in Anshan-Benxi Area[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, 36(4): 1-16.
- [25] 张熹. 西天山智博和查岗诺尔铁矿成矿背景与成矿作用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- ZHANG Xi. The Metallogenic Tectonic Setting and Metallogenesis of the Zhibo and Chagangnuoer Iron Ore Deposits, Western Tianshan Mountains[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [26] 汪帮耀, 胡秀军, 王江涛, 等. 西天山查岗诺尔铁矿矿床地质特征及矿床成因研究[J]. 矿床地质, 2011, 30(3): 365-402.
- WANG Bang-yao, HU Xiu-jun, WANG Jiang-tao, et al. Geological Characteristics and Genesis of Chagannur Iron Deposit in Western Tianshan, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2011, 30(3): 365-402.
- [27] JAMES H L. Sedimentary Facies of Iron-formation[J]. Economic Geology, 1954, 49(3): 235-293.
- [28] 张连昌, 翟明国, 万渝生, 等. 华北克拉通前寒武纪BIF铁矿研究: 进展与问题[J]. 岩石学报, 2012, 28(11): 3431-3445.
- ZHANG Lian-chang, ZHAI Ming-guo, WAN Yu-sheng, et al. Study of the Precambrian BIF-iron Deposits in the North China Craton: Progresses and Questions[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(11): 3431-3445.
- [29] ZHANG L C, ZHAI M G, ZHANG X J, et al. Formation Age and Tectonic Setting of the Shirengou Neo-Archean Banded Iron Deposit in Eastern Hebei Province: Constraints from Geochemistry and SIMS Zircon U-Pb Dating[J]. Precambrian Research, 2012, 222/223: 325-338.
- [30] 王长乐, 张连昌, 刘利, 等. 国外前寒武纪铁建造的研究进展与有待深入探讨的问题[J]. 矿床地质, 2012, 31(6): 1311-1325.
- WANG Chang-le, ZHANG Lian-chang, LIU Li, et al. Research Progress of Precambrian Iron Formations

- Abroad and Some Problems Deserving Further Discussion[J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(6): 1311-1325.
- [31] BEKKER A, HOLLAND H D, WANG P L, et al. Dating the Rise of Atmospheric Oxygen[J]. *Nature*, 2004, 427: 117-120.
- [32] HOLLAND H D. Why the Atmosphere Became Oxygenated: A Proposal[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(18): 5241-5255.
- [33] ALIBO D S, NOZAKI Y. Rare Earth Elements in Seawater: Particle Association, Shale-normalization, and Ce Oxidation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(3/4): 363-372.
- [34] BAU M, DULSKI P. Comparing Yttrium and Rare Earth in Hydrothermal Fluids from the Mid-Atlantic Ridge: Implications for Y and REE Behaviour During Near-vent Mixing and for the Y/Ho Ratio of Proterozoic Seawater[J]. *Chemical Geology*, 1999, 155(1/2): 77-90.
- [35] BHATIA M R, TAYLOR S R. Trace-element Geochemistry and Sedimentary Provinces: A Study from the Tasman Geosyncline, Australia[J]. *Chemical Geology*, 1981, 33(1/2/3/4): 115-125.
- [36] 沈其韩, 宋会侠, 赵子然. 山东韩旺新太古代条带状铁矿的稀土和微量元素特征[J]. *地球学报*, 2009, 30(6): 693-699.
- SHEN Qi-han, SONG Hui-xia, ZHAO Zi-ran. Characteristics of Rare Earth Elements and Trace Elements in Hanwang Neo-Archaean Banded Iron Formations, Shandong Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 30(6): 693-699.
- [37] 沈其韩, 宋会侠, 杨崇辉, 等. 山西五台山和冀东迁安地区条带状铁矿的岩石化学特征及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2011, 30(2): 161-171.
- SHEN Qi-han, SONG Hui-xia, YANG Chong-hui, et al. Petrochemical Characteristics and Geological Significations of Banded Iron Formations in the Wutai Mountain of Shanxi and Qian'an of Eastern Hebei[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2011, 30(2): 161-171.
- [38] HUSTON D L, LOGAN G A. Barite, BIFs and Bugs: Evidence for the Evolution of the Earth's Early Hydrosphere[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 220(1/2): 41-55.

《地球科学与环境学报》荣获“陕西省高校名刊”荣誉称号

据陕西省高等学校学报研究会消息,《地球科学与环境学报》荣获“陕西省高校名刊”荣誉称号。这是本刊首次获此殊荣,充分说明本刊的学术质量和编辑出版质量已取得质的飞跃。

为了不断促进陕西省高校科技期刊的发展,扩大陕西省高校科技期刊在国内外的影响,陕西省高等学校学报研究会主办了这次评奖活动。期刊评比以中国科技信息研究所提供的《中国科技期刊引证报告》统计数据为依据,评价指标为影响因子、总被引频次、被重要检索系统收录情况、编辑出版质量等,评价结果客观公正。这一荣誉的取得与广大作者、审稿专家以及本刊编辑部的共同努力是分不开的,同时也为本刊今后发展打下良好基础。

此外,《地球科学与环境学报》编辑部荣获“陕西省高校优秀期刊编辑部”荣誉称号,马文军副编审荣获“陕西省高校学报优秀编辑”荣誉称号,马文军、程琴娟、赵文义、孙守增共同发表在《编辑学报》的论文“《地球科学与环境学报》应对芦山地震组稿的编辑策略”荣获陕西省高校学报优秀编辑学论著一等奖。