

新疆阿吾拉勒铁矿带成矿系列和找矿重大突破

李凤明¹⁾, 赵同阳^{1, 2, 3)*}, 高奇¹⁾, 范廷宾¹⁾, 张建收⁴⁾,
丁海波⁵⁾, 刘洋²⁾, 高永峰²⁾

1)新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局, 新疆乌鲁木齐 830099;

2)新疆维吾尔自治区地质调查院, 新疆乌鲁木齐 830092;

3)新疆自然资源与生态环境研究中心, 新疆乌鲁木齐 830099;

4)新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第十一地质大队, 新疆昌吉 831199;

5)新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第三地质大队, 新疆库尔勒 841099

摘要: 西天山阿吾拉勒铁矿带是新疆最重要的铁矿带之一。在伊犁地块前寒武纪基底上发育起来的阿吾拉勒石炭纪上叠裂谷, 形成了由一套海相双峰式火山岩建造组成的火山岩带, 伴随强烈火山活动和岩浆成矿作用, 形成以铁为主, 铜、锌、铅、金、银等共生的海相火山岩型矿床。按照矿床成矿系列理论, 建立了矿床成矿系列(组)、亚系列及矿床式(组), 随着火山活动强度由强到弱, 清晰表现出铁矿成矿强度由弱到强, 再变弱, 就位方式由火山喷发沉积到火山气液-矿浆贯入-喷溢充填, 再到火山喷流沉积, 最后结束于含矿次火山岩浆侵入, 成矿组分由单一的铁逐渐变成铁、铜、锌、铅、金、银的多元素组合的演化规律。进入新世纪, 特别是新疆“358”项目实施以来, 阿吾拉勒铁矿带勘查在资金、人员、技术、政策等方面得到加强, 首次在西天山高山地区实施铁矿整装勘查, 构建了由正确的技术路线、科学的成矿理论、先进的技术方法、有力的保障措施等关键要素组成的评价体系, 实现了阿吾拉勒铁矿带找矿重大突破, 使之成为新疆最大的富铁矿带, 形成了实现勘查突破的关键路径和经验范式。

关键词: 铁矿带; 成矿系列; 勘查评价体系; 找矿突破; 阿吾拉勒

中图分类号: P618.31 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2023.022802

Minerogenetic Series and Significant Prospecting Breakthrough of the Awulale Iron Metallogenic Belt in the Western Tianshan, Xinjiang

LI Feng-ming¹⁾, ZHAO Tong-yang^{1, 2, 3)*}, GAO Qi¹⁾, FAN Ting-bin¹⁾, ZHANG Jian-shou⁴⁾,
DING Hai-bo⁵⁾, LIU Yang²⁾, GAO Yong-feng²⁾

1) Xinjiang Bureau of Geo-exploration and Mineral Development, Urumqi, Xinjiang 830099;

2) Geological Survey Academy of Xinjiang, Urumqi, Xinjiang 830092;

3) Xinjiang Natural Resources and the Ecological Environment Research Center, Urumqi, Xinjiang 830099;

4) NO.11 Unit of Xinjiang Bureau of Geo-exploration and Mineral Development, Changji, Xinjiang 831199;

5) NO.3 Unit of Xinjiang Bureau of Geo-exploration and Mineral Development, Korla, Xinjiang 841099

Abstract: The Awulale iron metallogenic belt, located on the northern margin of the Yili block in Western Tianshan, is one of Xinjiang's most important iron belts. The Awulale volcanic rock belt, an Upper Carboniferous rift developed on the Precambrian basement, is composed of marine bimodal volcanic rock formations. Because of strong volcanic activities and magmatic mineralization, the contemporaneous marine volcanic rock-type deposits, including iron, copper, zinc, lead, gold, and silver, were formed. Metallogenic series (groups), sub-series, and ore deposit types (groups) have been established based on the minerogenetic series theory of mineral deposits. With the intensity of volcanic activity from strong to weak, the intensity of iron mineralization shows a pattern of weak to strong and then weak. The emplacement mode of iron deposits is from volcanic eruption sedimentation to volcanic

本文由中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20221695)和新疆重大科技专项项目(编号: 2022A03010)联合资助。

收稿日期: 2022-10-28; 改回日期: 2023-02-14; 网络首发日期: 2023-03-01。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 李凤明, 男, 1966年生。博士, 教授级高级工程师。主要从事地质矿产勘查及矿产评价。E-mail: 674642249@qq.com。

*通讯作者: 赵同阳, 男, 1983年生。博士, 教授级高级工程师。主要从事区域构造与成矿研究。E-mail: zhaotongyang@126.com。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

gas liquid-slurry penetration-overflow filling, to volcanic eruption sedimentation, and finally to subvolcanic slurry intrusion. As a result, the ore-forming composition of iron deposits gradually changes from a relatively single iron to a multi-element combination of iron, copper, zinc, lead, gold, and silver. Since the implementation of the “358” Projects in Xinjiang during this century, exploration of the Awulale iron metallogenic belt has been consolidated regarding funds, personnel, technology, and policies. For example, for the first deployment of integrated iron ore exploration in the Western Tianshan Mountains area, a systematic evaluation system has been established, including the correct technical route, scientific metallogenic theory, advanced technical methods, and robust safeguard measures. Implementing all these measures has facilitated a significant breakthrough in exploring the Awulale iron metallogenic belt, and this has become the largest iron ore-rich belt in Xinjiang, representing a critical path and empirical paradigm for further prospecting breakthroughs.

Key words: iron metallogenic belt; minerogenetic series; prospecting and evaluation system; prospecting breakthrough; Awulale

新疆阿吾拉勒铁矿带位于西天山的阿吾拉勒山。该铁矿带东西长约 380 km, 南北宽 20 ~ 30 km, 面积约 7 430 km²; 带内海拔 1 700 ~ 4 000 m, 多数地段海拔在 3 000 m 左右, 属中高山区。该带自 20 世纪 50 年代初至 2007 年, 再到 2015 年, 在大约 55 年间, 经历了常规的基础地物化调查-浅部矿产普查和系统性整装勘查评价两个主要时期。在这个过程中成矿理论, 特别是矿床成矿系列理论的运用, 为该带寻找海相火山岩型铁矿指明了方向。

程裕淇等(1979)首次提出“铁矿成矿系列”至今已有 43 年, 矿床成矿系列研究一直在不断深入、推广应用。陈毓川等(2022)在《八论矿床的成矿系列》中总结提出了成矿系列六个序次, 丰富了成矿系列思想内涵。对西天山铁矿的成矿系列问题, 程裕淇等(1983)在《再论矿床的成矿系列问题》一文中进行了论述。本文是在刘德权等(1996)初步建立阿吾拉勒铁矿带成矿亚系列的基础上, 结合新的找矿成果和矿床研究资料, 再次总结了该铁矿带矿床成矿系列演化规律, 为下一步铁矿找矿勘查评价提供新依据。

阿吾拉勒铁矿带找矿突破是一个“理论到实践, 再到理论”的过程, 也是矿产勘查与理论创新相互促进的结果。查岗诺尔、备战铁矿找矿运用了“就矿找矿”理论, 智博、敦德、尼新塔格、塔尔塔格铁矿是查证航磁异常的新发现。在取得这些找矿成果过程中, 提升成矿条件、成矿规律认识, 丰富深化成矿系列的理论研究与实践运用一直在进行, 借助技术创新和保障措施到位, 单个矿床找矿成果促成该铁矿带找矿的重大突破。总结该带矿床成矿系列, 研究与找矿突破相关的基本规律和经验范式, 对新疆战略性矿产勘查评价起到指导作用。

1 成矿地质背景

1.1 区域地质背景

阿吾拉勒铁矿带呈北西西—南东东向条带状

展布, 构造上位于中亚造山带西段南缘(图 1a), 哈萨克斯坦山弯构造南翼(Xiao et al., 2015)的伊犁地块内。伊犁地块是中国天山最西部的古大陆, 通常被认为是哈萨克斯坦—伊犁前寒武纪地块的东延部分, 其南侧以那拉提北缘断裂为界与中天山岩浆弧毗邻, 那拉提北缘断裂向西与吉尔吉斯斯坦境内的尼古拉耶夫线(Nikolaev Line)相连(Wang et al., 2008; Qian et al., 2009); 北侧以北天山断裂为界与新疆北天山增生楔相邻(Gao et al., 2009; Xiao et al., 2013)。因此, 伊犁地块可与哈萨克斯坦的南部天山、吉尔吉斯斯坦的北天山相连(Wang et al., 2008; Rojas-Agramonte et al., 2014), 文献上称之为“哈萨克斯坦—伊犁”或者“北天山—伊犁”地块(Charvet et al., 2007; Gao et al., 2009)。相关研究表明, 中国伊犁地块在古生代被卷入中亚造山带(Xiao et al., 2004; Gao et al., 2009; Huang et al., 2016)。

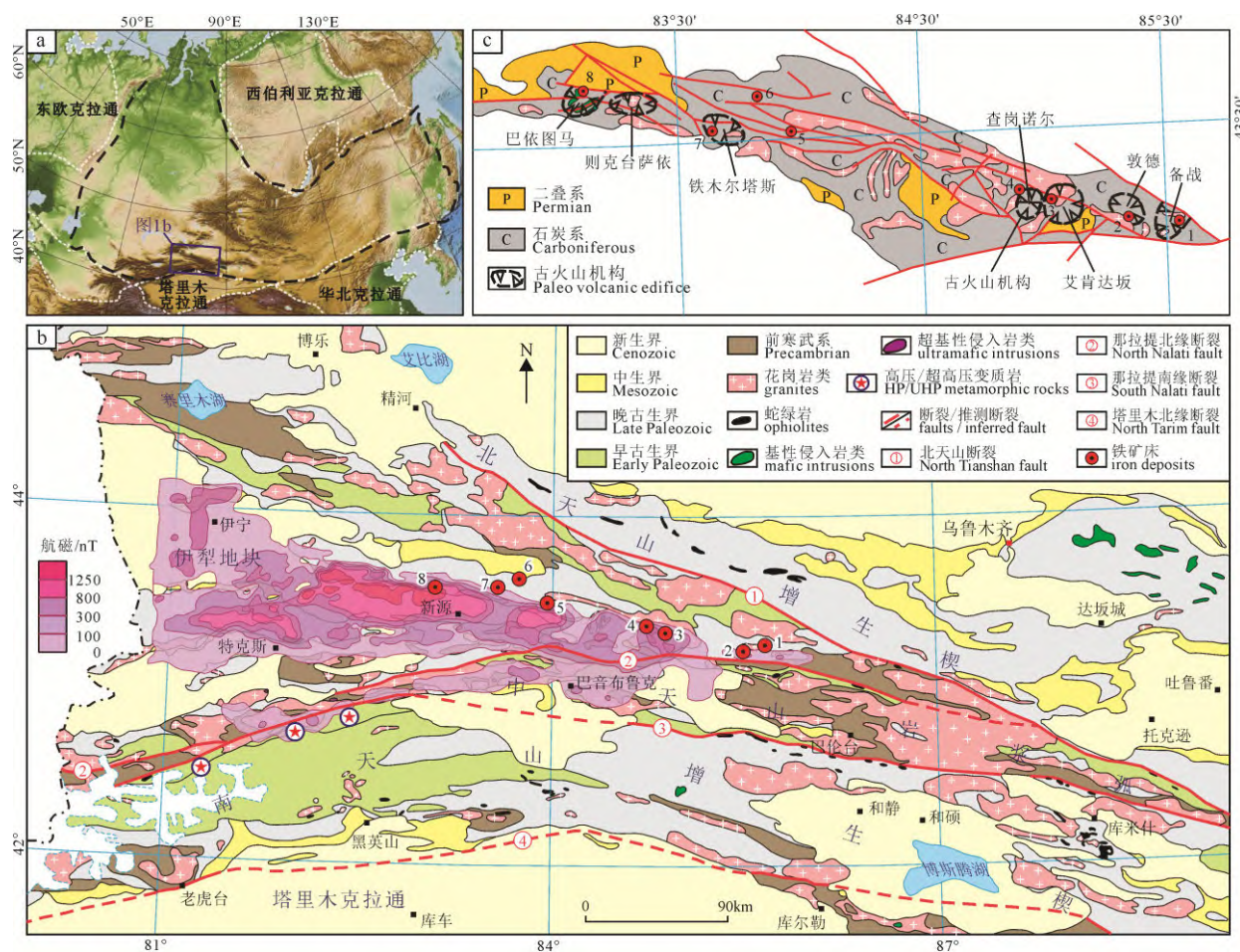
哈萨克斯坦—伊犁地块具有太古宙—古元古界结晶基底, 主要由分布于伊犁盆地南北缘的变质碳酸盐岩类、变质碎屑岩类及角闪岩相的变质岩组成(Hu et al., 2000; Wang et al., 2014; Zhou et al., 2018); 其中, 石英片岩中碎屑锆石 U-Pb 年龄集中分布在 2.0~1.1 Ga(Huang et al., 2019), 侵入至该套高级变质地体中的花岗岩年龄为 0.96~0.93 Ga(Zhu et al., 2019)。震旦纪至寒武纪, 在伊犁地块北部博罗霍洛—果子沟一带, 出露一套碳酸盐岩-陆缘碎屑岩建造, 局部发育冰碛沉积及板内碱性火山岩, 不发育或极少发育侵入岩, 认为其形成于被动大陆边缘(朱志新等, 2013), 且与罗迪尼亚超大陆的裂解相关(Lu et al., 2008; Huang et al., 2019)。自早古生代中期始, 由于受古亚洲洋盆俯冲消减的影响, 伊犁地块南北两侧分别形成了南天山、北天山古生代增生杂岩(Gao et al., 1998; Charvet et al., 2007; Windley et al., 2007; Xiao et al., 2013; 赵同阳和朱志新, 2021), 并在伊犁地块内部南北两缘发育强烈岩浆活动, 形成了独具特色的岩石建造(Long et al.,

2011; 李永军等, 2020)。其中, 分布最为广泛的即是石炭纪火山-沉积岩系(图 1b), 是阿吾拉勒铁矿带赋矿地层(李凤鸣等, 2011; 张作衡等, 2012; 董连慧等, 2015)。在阿吾拉勒地区自下而上可划分为下部的大哈拉军山组及阿克沙克组, 中部的艾肯达坂组, 上部的伊什基里克组。带内大哈拉军山组下部以火山碎屑岩、火山熔岩为主, 中部以火山熔岩、火山碎屑岩夹碳酸盐岩、正常碎屑岩, 上部以火山熔岩及同质火山碎屑沉积岩夹正常碎屑沉积岩为主; 阿克沙克组为一套浅海相碳酸盐岩和陆源碎屑岩; 艾肯达坂组以基性、中酸性火山熔岩、火山碎屑岩为主, 局部可见正常沉积碎屑岩和碳酸盐岩夹层; 伊什基里克组为一套火山碎屑岩、熔岩夹碳酸盐岩建造。

整体上, 阿吾拉勒铁矿带早石炭世火山岩浆作用较为强烈, 岩石组合以安山岩-英安岩-流纹岩为主, 次为玄武岩-安山岩-流纹岩, 有工业意义的铁、铜、金矿产的形成, 均与该期岩浆岩关系密切, 成矿专属性明显。在横向上, 西部以爆发沉积相为主,

东部以溢流-爆发相为主, 且自西向东依次分布有巴依图马、则克台萨依、塔木尔塔斯、查岗诺尔、艾肯达坂、敦德、备战等古火山机构(图 1c)。晚石炭世火山岩形成于海相和海陆交互相拉张环境, 主要为碱性玄武岩, 中酸性岩多为钙碱性系列, 以双峰式火山组合为主, 安山岩极少, 伴以玄武岩-安山岩-流纹岩组合; 铁、铜矿产赋存于该期火山岩中, 形成有价值的矿产地。

前人对于阿吾拉勒铁矿带石炭纪大地构造环境的认识存在分歧, 主要有: (1)大陆裂谷(左国朝等, 2008; 李凤鸣等, 2011; 董连慧等, 2015), (2)活动大陆边缘弧后盆地(钱青等, 2006; 李永军等, 2010)或岛弧/陆缘弧(蒋宗胜等, 2012; 张作衡等, 2012; Jiang et al., 2014; Wang et al., 2018; Han et al., 2020; Tao et al., 2022)等不同观点。本次研究工作, 根据自然岩石组合特征, 结合区域成矿特点, 认为伊犁地块晚古生代中晚期为大陆裂谷环境, 在石炭纪裂谷阶段早石炭世大哈拉军山组基-中-酸性火山岩-



图中铁矿床编号及名称: 1—备战; 2—敦德; 3—智博; 4—查岗诺尔; 5—尼新塔格; 6—松湖; 7—式可布台; 8—铁木里克。

Number and name of iron deposits in Fig: 1—Beizhan; 2—Dunde; 3—Zhibo; 4—Chagangnuoer; 5—Nixintage; 6—Songhu; 7—Shikebutai; 8—Tiemulike.

图 1 新疆西天山构造位置图(a, 据 Xiao et al., 2015 修改)、西天山地质构造略图(b, 据李凤鸣等, 2011 修改)及阿吾拉勒铁矿带古火山机构分布图(c)

Fig. 1 Tectonic framework of the Western Tianshan Mountain (a, after Xiao et al., 2015), geological map of western Tianshan Mountain (b, after LI et al., 2011) and the map of ancient volcanic agencies of the Awulale iron metallogenic belt (c)

火山沉积岩建造直接沉积在前寒武纪基底上,早石炭世后期开始向汇聚阶段转变,局部发育碳酸盐岩-碎屑岩建造。晚石炭世进入汇聚晚期,形成安山岩建造,伴有花岗岩类侵入岩。二叠纪上叠地堑阶段地壳再次裂开,但规模相对较小,主要为陆相偏碱性双峰式火山岩建造及火山磨拉石建造,伴随辉绿玢岩-石英斑岩序列及石英二长岩-正长斑岩序列侵入,总体表现为上叠火山地堑,较石炭纪裂谷范围小。

1.2 区域航磁特征

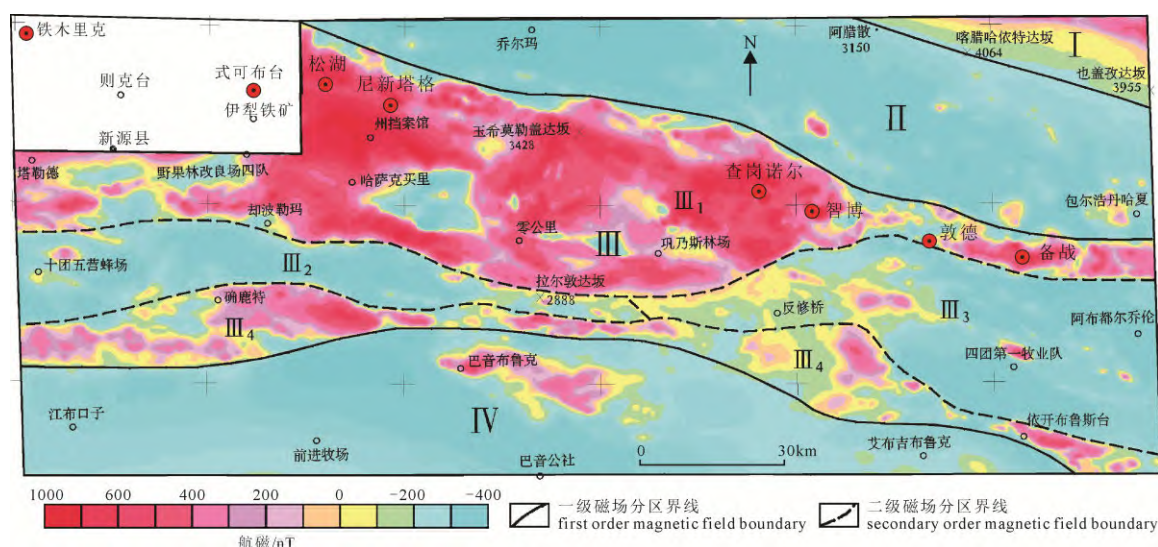
阿吾拉勒铁矿带在 1:100 万航磁异常平面图上(图 1b),航磁异常总体走向为北西—南东向,与阿吾拉勒山体走向基本一致,总体表现为由南部高磁区向北部负磁区变化的梯度带。由西向东在铁木里克、则克台、阿克萨依、松湖、查岗诺尔、卡扎克(备战)等地分布多处环形航磁异常和杂乱面状航磁异常带,反映阿吾拉勒石炭纪地层中岩浆岩侵入及火山活动发育。部分重要铁矿床如铁木里克、式可布台、查岗诺尔、备战等多分布在与线性构造和环形构造相关的航磁异常边缘。

该带 1:5 万高精度航磁自北向南分成 4 个磁场区(图 2),其中铁矿床均位于哈萨克买里—巩乃斯林场正磁场亚区(III₁)。区内异常特征明显,形态变化较大,主要以团块状、带状和条带状为主,异常带强度从东到西逐渐增高,宽度加大。在这些异常之间局部还有负值区分布。智博以西地区,以团块状强磁正异常为主要特征,异常走向定向性明显,

连续性较好,规律性较强;走向有一定变化,总体较为协调,既有北西走向,也有北东向和近东西向;异常的宽度和强度变化均较大,有的呈尖峰状,有的较宽缓,幅值多在 100~800 nT 之间,局部强者幅值可高达 1 000 nT 以上;在化极上延 1 km 等值线平面图上仍显示为几处较大的团块状升高正异常,最大强度高达 668 nT;上延 3 km 处理后,几处较大的团块状升高正异常基本连成一体,说明了该区磁异常所反映的地质体规模较大,磁性强,向下有一定的延深;区内团块状、带状和条带状强磁异常的分布方向与出露地层的走向及中酸性岩体的延伸方向基本一致,主要由下石炭统中基性火山岩和中酸性侵入岩引起,其中叠加的幅值大、梯度陡的尖峰状异常是已知铁矿和推断铁矿的反映;智博以东地区,主要为强磁异常带,总体走向近东西,其间由强度不等、大小不一的正异常组成,与西部异常具有相连的趋势,但强磁正异常带的宽度明显变窄,其异常特征与西部相似。

1.3 成矿区带划分

根据《中国矿产地质志·新疆卷》中新疆成矿区带划分方案(董连慧, 2021),该铁矿带归属古亚洲成矿域、伊犁成矿省之伊犁 Fe-Mn-Cu-Co 成矿带内,北与伊犁微板块北东缘 Au-Ag-Fe-Mn-Cu 成矿带相邻、南与塔里木成矿省之那拉提—巴伦台—卡瓦布拉克 Fe-Mn-Pb-Zn-Au 成矿带毗邻(图 3a)。



I—喀腊哈依特达坂—也盖孜达坂正磁场区; II—乔尔玛—包尔浩特哈夏负磁场区; III—塔勒德—阿布都尔乔伦正负变化磁场区;
III₁—哈萨克买里—巩乃斯林场正磁场亚区; III₂—拉尔敦达坂负异常亚区; III₃—反修桥负磁场亚区;
III₄—确鹿特—依开布鲁斯台正异常亚区; IV—江布口子—艾布吉布鲁克负磁场区。

I—Kalahayitedaban—Yegaizidaban positive magnetic field; II—Qiaorma—Baoerhaodanhaxia negative magnetic field;
III—Talede—Abudouerqiaolun positive and negative changing magnetic field; III₁—Hasakemali—Gongnaisilinchang subregion of positive magnetic field; III₂—Laerdundaban subregion of negative magnetic field; III₃—Fanxiuqiao subregion of negative magnetic field;
III₄—Quelute—Yikaibulusitai subregion of positive magnetic field; IV—Jiangbukouzi—Aibujibuluke negative magnetic field.

图 2 阿吾拉勒铁矿带 1:5 万航磁异常图

Fig. 2 1:50 000 aeromagnetic anomaly map of the Awulale iron metallogenic belt

阿吾拉勒铁矿带西段以铜矿为主, 主要为陆相火山岩型铜矿, 分布于群吉萨依一带, 大量铜矿化主要产于二叠纪火山岩、火山碎屑岩、碎屑岩及浅成中酸性侵入体和中基性岩脉中, 铜矿化常伴生有银。中段与东段以铁、铜、金等多金属矿化为主, 主要分布于铁木里克经查岗诺尔到备战一带, 矿化主要产于石炭纪一套中基性火山碎屑岩-火山岩夹碳酸盐岩建造中, 并与火山活动密切相关。

整体而言, 阿吾拉勒铁矿带以铁、铜、金矿为主, 并伴有铅、锌、银、硫铁矿及重晶石矿化, 已发现金属矿床点 50 余处。矿床点分布表现为东铁西铜、相对集中展布的特点, 呈东西向大致等间距展布的 3 个矿集区, 即东部的查岗诺尔—备战铁矿集区、中部的式可布台—塔尔塔格铁矿集区、西部的群吉铜银矿集区(图 3b)。分布有矿床点(小型规模以上) 29 处。其中, 铁矿床点 14 处, 包括 5 处大型矿床(备战、智博、查岗诺尔、敦德、尼新塔格—阿克萨依)、4 处中型矿床(塔尔塔格、松湖、式可布台、苏洛); 铜矿床 12 处, 其中, 中型矿床 1 处(群吉萨依); 锌矿有 1 处共生大型矿床(敦德)和 1 处小型矿床; 金矿仅有 1 处小型矿床(哈尔嘎嘎林恩); 银矿均为铜的共生矿种; 以及巴依图马小型富钴黄铁矿床。矿床规模表现出“铁大铜小、东大西小”的特点。大型铁矿床主要分布于古火山机构内部和旁侧, 中小型铁矿床主要在古火山机构外侧或远离其分布。

2 成矿系列及成矿规律

2.1 成矿系列划分及其特征

成矿系列是矿床地质科学中研究区域成矿规律的一种学术思想, 亦是地球系统四维成矿论, 用系统论、活动论观点研究在地质历史发展各阶段、各特定地质构造环境中成矿作用的过程及形成的矿床组合自然体(程裕淇等, 1979; 陈毓川等, 2007)。遵循“在一定的地质历史时期或构造运动阶段, 在一定的地质构造单元及构造部位, 与一定的地质成矿作用有关, 形成的一组具有成因联系的矿床的自然组合”(陈毓川等, 2022)这一内涵, 按照成矿系列组、成矿系列、成矿亚系列、矿床式的序次结构, 在伊犁成矿带建立了伊犁与华力西构造旋回上叠裂谷的岩浆、沉积作用有关的矿床成矿系列组和伊犁与石炭—二叠纪岩浆作用有关的成矿系列, 划分出 4 个成矿亚系列(董连慧等, 2015, 2021)(表 1)。其中, 阿吾拉勒铁矿带作为伊犁与石炭—二叠纪岩浆作用有关的矿床成矿系列的主体, 可划出 3 个成矿亚系列, 其中 2 个与铁矿成矿有关。

阿吾拉勒与石炭纪裂谷双峰式火山岩建造有关的铁、铜、锌、金、钴、硫铁矿矿床成矿亚系列 Pz_2-271a : 该亚系列铁成矿作用表现最强, 发育于铁矿带中东部, 与式可布台—塔尔塔格铁矿集区和查岗诺尔—备战矿集区的分布相套合, 发育 9 个矿床式。成矿作用开始于早石炭世晚期, 结束于晚石炭世晚期。成矿作用高峰期为晚石炭世早期。按照区域地质构造演化、矿产时空分布和成矿作用特征, 结合矿床式成矿类型和成矿时代研究新成果(荆德龙等, 2015; 荆德龙, 2016), 可归并为 3 个矿床式组。(1)早石炭世晚期火山沉积型铁矿床式组: 主要发育于铁矿带中部, 式可布台—塔尔塔格铁矿集区中东部, 主要有 2 个矿床式, 为海相火山-沉积喷发型铁矿, 成矿时代 343 ~ 334 Ma。查岗诺尔铁矿床深部第二层矿, 也属于此系列。(2)晚石炭世早期海相火山气液交代-矿浆充填型铁、铜、锌、金矿床式组: 集中发育于铁矿带东部, 与查岗诺尔—备战铁矿集区相套合, 有 4 个矿床式, 均为海相火山气液交代-矿浆贯入-喷溢型铁矿, 敦德式共生锌、伴生金, 成矿时代 322 ~ 310 Ma。(3)晚石炭世晚期火山喷流沉积型铁、铜、锌、铅、钴、硫铁矿矿床式组: 发育于铁矿带中部, 式可布台—塔尔塔格矿集区西段南侧, 主要发育有 3 个矿床式, 为海相火山喷流沉积型铁矿和海相火山喷发沉积(改造)型硫铁矿, 共伴生铜、铅、锌、钴, 成矿时代 313 ~ 301 Ma。

阿吾拉勒与晚石炭世—二叠纪次火山岩浆活动有关的铁、铜、钼、金、铅、锌、钨矿床成矿亚系列 Pz_2-271b : 该亚系列铁成矿作用相对较弱。也发育于铁矿带的中东部, 式可布台—塔尔塔格矿集区东端、查岗诺尔—备战铁矿集区西段及其两者的结合部位, 主要发育有 6 个矿床式, 多数为海相火山气液型铁铜、铜金、铅锌银矿床和斑岩型铜(钨)矿床, 出现了海相次火山岩(矿浆)侵入型铁矿(玢岩型铁矿?), 成矿时代 306 ~ 249 Ma。可归并为 2 个矿床式组: 晚石炭世末海相火山气液-次火山岩型铁、铜矿床式组和晚石炭世—二叠纪海相火山气液型铜、金、铅、锌、银、钨矿床式组, 前者与铁矿有关的岩浆作用较强。

2.2 主要铁矿床类型特征

阿吾拉勒铁矿带主要矿床类型有海相火山沉积型、海相火山气液交代充填型和海相次火山岩型三类(李凤鸣, 2013)(表 2), 其主要特征见表 3。

海相火山气液交代充填型: 该类型矿床主要有矿浆喷溢和贯入两个亚类型, 典型矿床特征见表 3。该类型铁矿床赋矿围岩主要为粗面质、钠质安山岩及其同质的凝灰岩, 赋矿围岩多为钠质、中高镁的火山岩-火山碎屑岩。容矿部位均围绕火山机构

附近岩浆上侵通道或岩浆溢流层面及空隙。岩浆贯入型亚类为火山机构内部和浅成岩体上部,而岩浆喷溢型亚类则多为火山机构外侧,距火山管道有一定的距离。围岩蚀变有石榴石化、绿帘石化、阳起石化、钾长石化、透辉石化、辉闪石化、钠长石化、绿泥石化、碳酸盐化、硅化等,多表现为类矽卡岩化。岩浆贯入亚类围岩蚀变以高温矿物为主,作用强烈,类矽卡岩化特征明显,石榴石化往往表现为多期特点;岩浆喷溢型亚类的蚀变弱,多具钾长石化、绿帘-绿泥石化、透闪石化以及与磁铁矿共生的碳酸盐化(方解石化)等。矿体形态总体为似层状、脉状、透镜状,岩浆喷溢型亚类的不规则程度要明显低于岩浆贯入型亚类,且与围岩的

接触界线较为清晰和平直(图 4)。矿石全铁平均品位在 35%~45%之间,喷溢型明显低于贯入型,后者能形成富矿体。矿石构造主要为块状、浸染状、角砾状、条带状、网脉状、类海绵陨铁状及蠕动-流动状等。矿石矿物组合主要为磁铁矿+赤铁矿+黄铁矿+闪锌矿(黄铜矿)+石榴石+绿帘石+透辉石+钾长石+阳起石+钠长石+方解石,铁矿物主要为磁铁矿,赤铁矿很少。矿石金属硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值集中在 $-7.8\text{‰} \sim 8\text{‰}$ 之间;磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}$ 值多在 $0.6\text{‰} \sim 9\text{‰}$ 之间;方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-0.6\text{‰} \sim 2\text{‰}$ 之间。共伴生有锌、金。

海相火山沉积型:该类型铁矿床主要有火山喷发沉积和火山喷流沉积两个亚类型。火山喷发沉积

表 1 伊犁成矿带矿床成矿系列表
Table 1 Division scheme of metallogenic series in the Yili metallogenic belt

矿床成矿系列(组)	矿床成矿亚系列	矿床式(组)	相关信息
伊犁与华力西构造旋回上叠裂谷的岩浆、沉积作用有关的铁、铜、镍、铅、锌、金、银、钼、钨、锰、硫铁矿矿床成矿系列组	Pz ₂ -27I 阿吾拉勒与石炭-二叠纪岩浆作用有关的铁、铜、镍、铅、锌、金、银、钼、钨、锰、硫铁矿矿床成矿系列	(1)早石炭世中晚期海相沉积型铁矿床式组 松湖式(海相火山-沉积型 Fe)、尼新塔格式(海相火山-喷发沉积型 Fe)	C _{1d} 大哈拉军山组安山岩 340~334 Ma (荆德龙, 2016)
		(2)晚石炭世早期海相火山气液交代-矿浆充填型铁、铜、锌、金矿床式组 查岗诺尔(海相火山气液-矿浆贯入型 Fe、Cu)、智博式(海相火山气液-矿浆喷溢型 Fe)、敦德式(海相火山气液-矿浆喷溢型 Fe、Zn、Au)、备战式(海相火山气液-矿浆贯入型 Fe)	
		(3)晚石炭世晚期火山喷流沉积型铁、铜、锌、铅、钴、硫铁矿床式组 式可布台式(海相火山喷流沉积型 Fe、Cu、Pb、Zn)、巴依图马式(海相火山喷流沉积型硫铁矿、Co)、苏洛式(海相火山喷流沉积-改造型 Fe)	
	Pz ₂ -27Ib 阿吾拉勒与晚石炭-二叠纪次火山岩浆活动有关的铁、铜、钼、金、铅、锌、钼矿床成矿亚系列	(1)晚石炭世末海相火山气液-次火山岩型铁、铜矿床式组 塔尔塔格式(海相次火山岩浆侵入型 Fe)、查岗诺尔胜利 I 号式(海相火山气液型 Fe、Cu)	阿吾拉勒地区 2752 高地、艾肯达坂、乌代肯达坂、阿日先等中酸性岩体 (249.1±2.2)~(306.6±2.0) Ma (黄栋, 2017)
		(2)晚石炭世一二叠纪海相火山气液型铜、金、铅、锌、银、钼矿床式组 玉希莫勒盖达坂式(海相火山气热型 Cu、Au)、哈尔嘎嘎林恩式(海相火山气液型 Au)、欠哈布代克式(海相火山气液型 Pb、Zn、Ag)、松树沟式(斑岩型 Cu、Mo)	
	Pz ₂ -27Ic 阿吾拉勒与二叠纪上叠裂谷双峰式火山-次火山岩建造有关的铜、银、铅、锌矿床成矿亚系列	群吉式(陆相火山气液型 Cu、Ag)、奴拉赛式(陆相火山气液型 Cu、Pb、Zn)、琼布拉克式(陆相火山沉积型 Cu、Ag)	奴拉赛铜矿体金属物 Sm-Nd 法 (242.9±14.4) Ma (李华芹等, 1998)
Pz ₂ -27Id 伊什基里克与石炭纪末基性-超基性岩建造有关的铜、镍矿床成矿亚系列			

表 2 阿吾拉勒铁矿带主要矿床类型表
Table 2 Characteristics of typical iron ore deposits in the Awulale iron ore belt

类	亚类	典型矿床
海相火山沉积型	火山喷流沉积型	式可布台、铁木里克
	火山喷发沉积型	松湖、尼新塔格、查岗诺尔铁矿“第二层矿”
海相火山气液交代充填型	矿浆喷溢-热液交代充填型	智博、敦德
	矿浆贯入-热液交代充填型	查岗诺尔、备战
海相次火山岩型	矿浆侵入-热液交代型	塔尔塔格

Table 3 Characteristics of typical iron ore deposits of the Awulale iron metallogenic belt (after LI et al., 2011)

矿床	查岗诺尔铁矿	智博铁矿	敦德铁矿	备战铁矿	尼新塔格铁矿	松湖铁矿	式可布台铁矿	塔尔塔格铁矿
成矿时间	321 Ma, 316 Ma (荆德龙, 2016)	322 ~ 320 Ma, 315 ~ 310 Ma (荆德龙, 2016)	~321 Ma (荆德龙, 2016)	320.6 Ma (荆德龙, 2016)	340 ~ 334 Ma (荆德龙, 2016)	343 ~ 340 Ma (荆德龙, 2016)	313 ~ 301 Ma (荆德龙, 2016)	~306 Ma (张振亮等, 2015)
成矿空间	火山机构外侧喷溢相-内侧喷溢相	火山机构外侧喷溢相	火山机构外侧喷溢相-通道相	火山通道相	火山机构外侧喷溢相	火山盆地边缘斜坡沉积凹地	火山盆地边缘斜坡或火山喷流(气)口附近沉积凹地	火山机构深部或边部潜火山岩相
赋矿围岩	灰绿色、灰褐色钠长斑岩质角砾凝灰岩、安山岩、英安质晶屑凝灰岩夹大理岩	浅灰绿色绿帘石化-阳起石化玄武岩和玄武质粗面安山岩	蚀变安山岩和硅化玄武质凝灰岩	灰色安山岩、石英霏细斑岩、安山质凝灰岩、安山质角砾凝灰岩、砂岩夹灰岩	灰色安山岩、石英霏细斑岩、安山质凝灰岩、安山质角砾凝灰岩	紫红-灰紫色晶屑玻屑凝灰岩、凝灰质粉砂岩、砂岩夹生物碎屑灰岩	安山质和英安质凝灰岩、火山灰凝灰岩、沉凝灰岩夹砂岩和少量灰岩	二长闪长玢岩
围岩蚀变	类砂卡岩化。早期石榴石±透辉石，晚期绿帘石-阳起石化	绿帘石化、绿帘石化、阳起石化	类砂卡岩化、硅化、绿帘石化、蛇纹石化、绿帘石化	类砂卡岩化、碳酸盐化、硅化	绿帘石化、绿帘石化	碳酸盐化、绿帘石化	绿帘石化、绢云母化、硅化、黄铁矿化、碳酸盐化	绿帘石化、钾化、硅化、方解石化
矿体特征及组合	存在浅部第一含矿层和深部第二含矿层。多呈似层状、透镜状。东段矿层多呈水平，近平行产出。长角缓。主矿体长 2 200 m，厚 3.65 ~ 218.04 m，全铁品位 35.61%。夹薄层铜矿层	多呈不规则似层状、脉状、透镜状。东段矿层多呈水平，近平行产出。长 200 ~ 600 m，宽 200 ~ 600 m，厚 5 ~ 110 m，全铁品位 27.78% ~ 64.73%	似层状、大透镜状、不规则状、条带状，长 19 ~ 931 m，厚 2 ~ 58 m，全铁品位 20% ~ 66.96%	主矿体呈透镜状，倾角 60° ~ 79°。长 920 m，厚 5.12 ~ 139.72 m，全铁品位 23.60% ~ 47.64%	形态简单，呈似层状、透镜状、脉状，平行产出。长 200 ~ 750 m，厚 5.7 ~ 27.79 m，全铁品位 21.56% ~ 28.48%	呈似层状，倾角陡。长 735 m，厚 0.82 ~ 67.22 m，全铁品位 22.23% ~ 52.16%。有草莓状黄铁矿	层状、似层状、透镜状、扁豆状，顺层，近平行产出。单个矿体长 100 ~ 400 m，最长 900 m，厚 3 ~ 15 m。全铁品位 56.66%	透镜状、脉状，局部分支，长 180 ~ 240 m，厚 5 ~ 78 m，全铁平均品位 26.85%
矿石构造	浸染状、角砾状、条带状、网脉状、海绵陨铁状	块状、角砾状、浸染状、条带状、网脉状、斑杂状、条带状、网脉状	块状、浸染状、条带状、网脉状、细脉浸染状、角砾状	块状、角砾状、浸染状	浸染状	浸染状、块状	厚层状-块状为主，少数为条带状、浸染状	稀疏-稠密浸染状、块状构造
矿物组合	磁铁矿+赤铁矿+黄铁矿+黄铜矿+闪锌矿+石榴石+阳起石+绿帘石	磁铁矿+磁黄铁矿+黄铁矿+透辉石+阳起石+绿帘石	磁铁矿+黄铁矿+磁黄铁矿+赤铁矿+闪锌矿+黄铜矿	磁铁矿+黄铁矿+磁黄铁矿+闪锌矿+透辉石+绿帘石	磁铁矿+赤铁矿+黄铁矿+绿泥石；磁铁矿多为凝灰岩的矿物晶屑	磁铁矿+(磁)赤铁矿+黄铁矿+黄铜矿+透闪石+阳起石+绿帘石+绿泥石+石榴石	赤铁矿+磁铁矿+菱铁矿+黄铜矿+黄铁矿+石英+碧玉+重晶石+绢云母+滑石+绿泥石	磁铁矿+黄铁矿+绿泥石+钾长石+石英；磁铁矿多呈岩石主要成矿物出现
同位素特征	黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 一般为 3.2‰ ~ 8.4‰； 磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}$ ‰=1.6~3.3； $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.053\sim18.336$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.466\sim15.553$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.716\sim37.968$ (新疆地矿局第三地质大队, 2011)	磁铁矿 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=19.958\sim20.014$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.457\sim15.571$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.608\sim39.158$	黄铁矿、磁黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}=3.8 \sim 7.6$ ，方解石 $^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 均值 0.76‰，磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}‰=6.8 \sim 7.8$	磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}‰=0.3 \sim 4.3$ ，(张博, 2016) $\delta^{57}\text{Fe}‰$ 均值为 -0.043±0.025 (王腾, 2014)	磁铁矿氧化安山岩 石氧同位素值为 2.95‰ ~ 3.17‰，杏仁状安山岩的氧同位素值 3.0‰ (新疆地矿局第九地质大队, 2006)	磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}‰=3.8\sim7.9$ (荆德龙, 2016)	黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 在 -6.1‰ ~ -3.7‰之间，变化范围窄；层纹状重晶石 $\delta^{34}\text{S}‰=0.61 \sim 9.37$, $\delta\text{D}‰=-104.3 \sim -68.9$, 成矿流体来源于岩浆水，有海水混入	岩体高钾、富碱，低 CaO 和 MgO (黄栋, 2017)

型的赋矿围岩主要为粗面质、钠质的安山质凝灰岩, 局部为凝灰质砂岩和安山岩; 火山喷流沉积型的赋矿围岩多为安山质和英安质凝灰岩、火山灰凝灰岩、沉凝灰岩, 以及细碎屑岩。容矿部位主要分布于火山口外侧边缘相或沉积洼地内, 火山喷流沉积型的沉积环境类似于 VMS 和 Sedex 矿床, 其距火山口的距离要远于火山喷发沉积型亚类, 而后者局部遭受到明显的火山期后热液的叠加改造。围岩蚀变以绿泥石化、绢云母化、硅化(铁碧玉化)、黄铁矿化、重晶石化、碳酸盐化为主, 其中硅化(铁碧玉化)、重晶石化是火山喷流沉积型亚类的典型蚀变; 火山喷

发沉积的围岩蚀变弱, 主要发育绿帘石化、绿泥石化。矿体形态为层状、似层状, 局部为脉状、条带状, 多与近矿围岩顺层平行产出(图 5), 而火山喷发沉积型矿体边界多呈渐变过渡。火山喷流沉积型矿石全铁平均品位总体偏高, 形成富矿体; 火山喷发沉积型亚类矿石全铁平均品位总体偏低, 略高于工业矿石标准。矿石构造主要为薄层状-纹层状, 局部为条带状、脉状、浸染状、块状。矿石矿物组合主要为磁铁矿+赤铁矿+黄铁矿+黄铜矿+(铁)碧玉+重晶石+菱铁矿+绢云母+绿泥石+方解石, 火山喷发沉积型亚类的矿石矿物主要为磁铁矿, 受赤铁矿

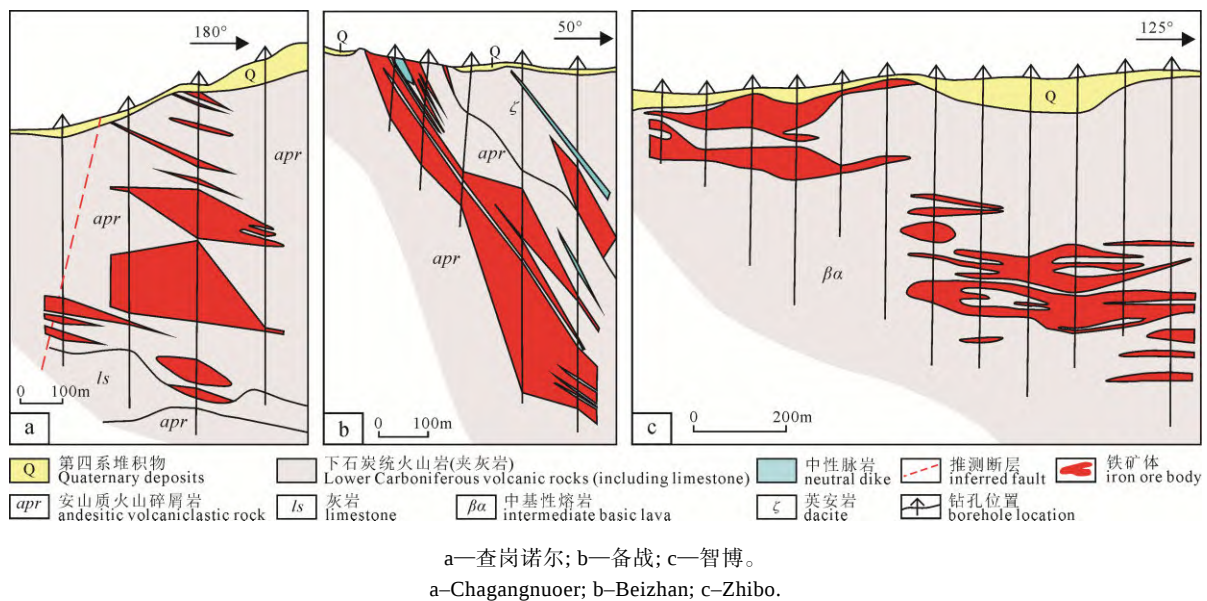


图 4 阿吾拉勒铁矿带海相火山气液(矿浆)型铁矿床典型勘探线剖面图
(王宗斌, 2011; 魏梦元等, 2012; 赵振刚等, 2012)

Fig. 4 Typical exploration line profile of marine volcanic gas-liquid (slurry) type iron deposits in the Awulale iron ore belt
(WANG, 2011; WEI et al., 2012; ZHAO et al., 2012)

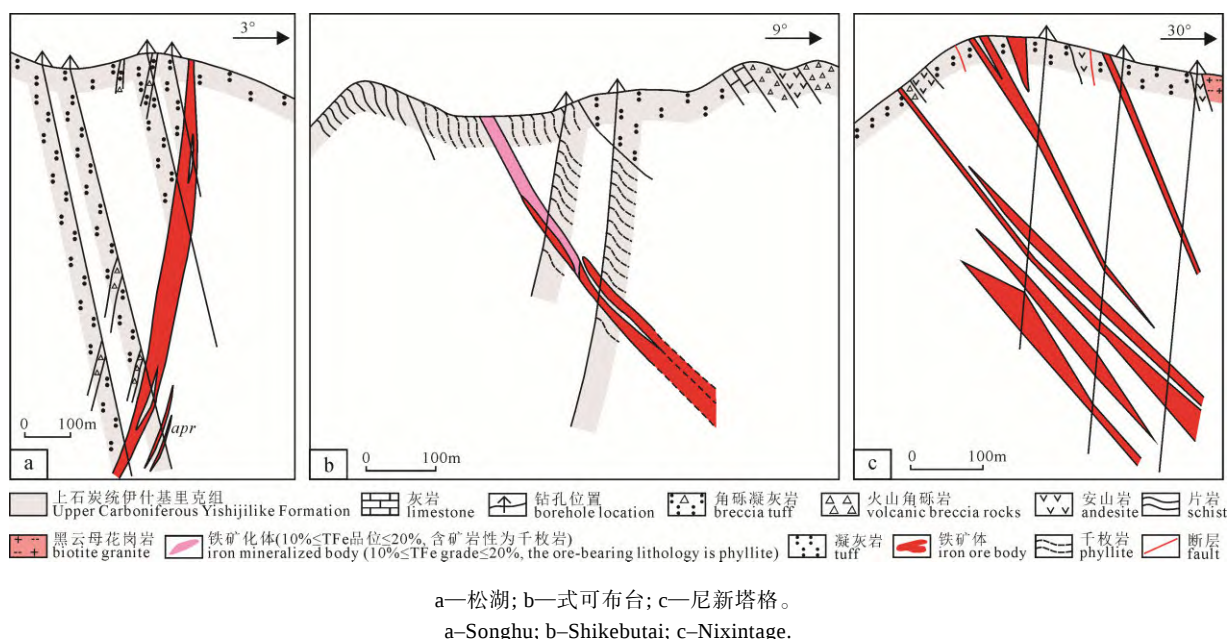


图 5 阿吾拉勒铁矿带海相火山沉积型铁矿床典型勘探线剖面图(程遂欣等, 2006; 任毅等, 2010; 李新光等, 2011)
Fig. 5 Typical section of marine volcanic sedimentary iron deposits in the Awulale iron ore belt
(CHENG et al., 2006; REN et al., 2010; LI et al., 2011)

交代明显,磁铁矿多呈凝灰岩的矿物晶屑;火山喷流沉积型亚类的矿石矿物绝大多数为赤铁矿,局部为磁铁矿,常伴生有黄铜矿、黄铁矿,(铁)碧玉、重晶石则是最为主要的脉石矿物。矿石金属硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值集中在 -2.9% ~ 10.73% 之间。这类铁矿床具有“内生外成”的特点,共伴生铜、铅、锌、金。

海相次火山岩型:该类型成矿就位方式为含矿次火山岩浆侵入-热液交代(玢岩型?),其赋矿围岩主要为与粗面质、钠质安山岩成分基本一致的二长闪长玢岩。容矿部位为火山机构附近或中浅部的浅成侵入体内侧。围岩蚀变以绿泥石化、钾化、硅化、方解石化为主。矿体形态总体为较规则透镜状(图6),与围岩的接触界线较为平直,并多呈渐变过渡。矿石构造主要为稀疏-稠密浸染状。矿石矿物组合主要为磁铁矿+黄铁矿+绿泥石+钾长石+石英,磁铁矿多呈岩石主要成岩副矿物出现,局部大量聚集成矿,矿石全铁平均品位总体偏低,略高于工业矿石标准。

2.3 成矿规律及成矿模式

阿吾拉勒铁矿带主要铁矿床均形成于石炭纪,成矿强度与火山活动强度的变化基本一致,并与石炭纪上叠裂谷发展及其发生火山活动旋回和样式及强度有着密切联系,在时空分布上,在成矿强度和成矿就位方式上均出现规律性变化。由早石炭世中晚期到晚石炭世早期,再到晚石炭世中晚期,铁矿床表现出三个明显的变化特征,大致划分为三个铁矿成矿阶段,这与阿吾拉勒铁矿带四个主要铁矿床式组基本对应。这个规律性特征是:火山活动及铁

矿成矿强度由强持续变弱;成矿就位方式由火山喷发沉积型转为火山气液(矿浆贯入-喷溢)型,再表现为火山喷流沉积型和次火山岩(侵入)型;矿床规模由中型变为大型,再变为中型;成矿空间迁移由中部迁移至东部,再转回中西部;共伴生矿产逐渐增多,由单一铁成矿增加为铁、铜、金、锌、铅、钴及黄铁矿成矿。在铁成矿第二阶段,火山活动强度相对有所减弱,铁矿物质未大规模喷出散发,而因大量聚集在含矿岩浆中表现出更强的铁矿成矿作用,在火山机构内部贯入或喷溢成矿,形成大型铁矿床。因此,晚石炭世早期是阿吾拉勒铁矿带大型矿床的最重要的成矿阶段。阿吾拉勒铁矿带成矿模式见图7。

2.4 成矿系列演化规律

在石炭—二叠纪岩浆作用背景下,阿吾拉勒铁矿带成矿系列、亚系列及其矿床式组受控不同时期火山活动的岩浆作用,表现为不同的成矿模式,呈现出与火山-构造成矿环境变化相匹配的铁成矿作用和与成矿时期相对应的演化规律(图8)。

阿吾拉勒与石炭纪裂谷双峰式火山岩建造有关的铁、铜、锌、金、钴、硫铁矿矿床成矿亚系列 Pz₂-271a:早石炭世早期,阿吾拉勒属博罗科努陆缘弧,局部拉张导致其成为火山活动中心,大哈拉军山组双峰式火山岩建造直接沉积在前寒武纪基底上。在早石炭世中晚期,火山活动强烈,火山沉积成矿作用使得铁质矿浆和含矿流体喷发并在火山斜坡位置沉积,以爆发、喷发形成大量火山碎屑岩及

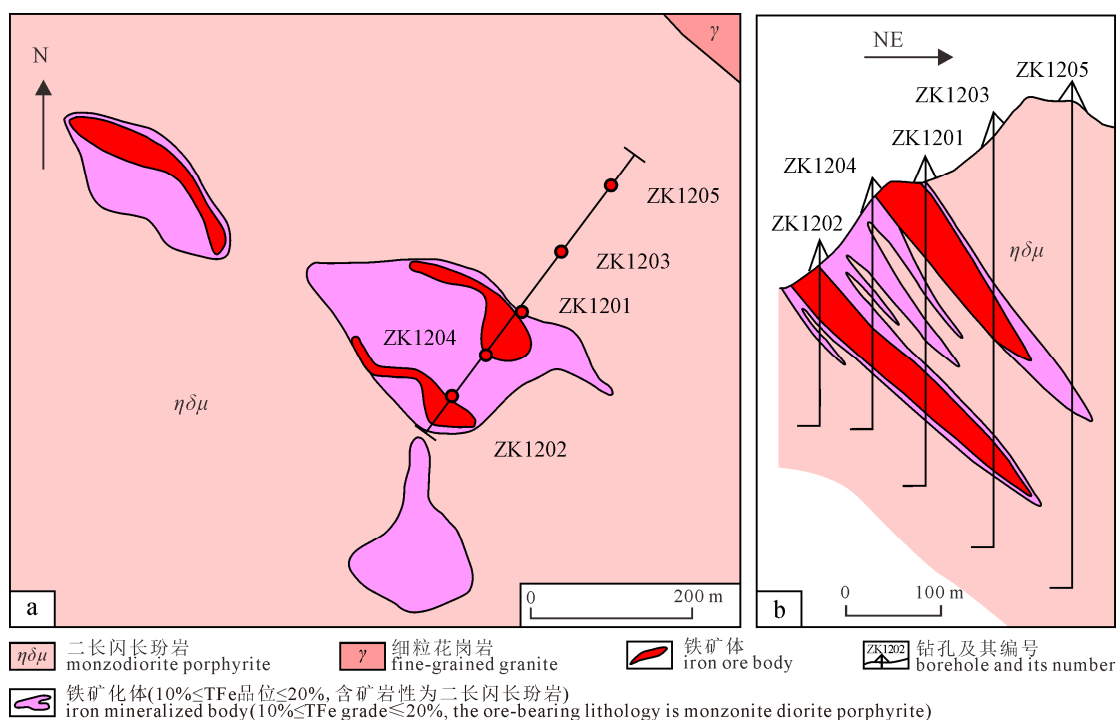


图6 塔尔塔格铁矿床矿区平面图(a)和12线勘探线剖面图(b)(倪建辉和陈友智, 2013)

Fig. 6 Geological map (a) and geological profile of line 12 (b) of Taertage iron deposit (NI and CHEN, 2013)

火山喷发沉积型铁矿。铁矿成矿作用较强, 磁铁矿或集合体(凝灰、角砾铁质“岩屑”)多呈凝灰岩“晶屑”、“岩屑”广泛分布, 分散沉积, 局部聚集形成矿床, 形成了松湖、尼新塔格铁矿床, 以及查岗诺尔铁矿“第二矿层”。构成海相沉积型铁矿床式组。

晚石炭世早期, 为火山间歇期, 火山活动减弱, 以岩浆贯入、喷溢、溢流形式在火山机构附近形成火山溢流相, 以及碳酸盐岩; 铁矿成矿作用以岩浆分异、气液交代为主, 铁矿物质大量聚集, 以岩浆贯入-喷溢形式在火山机构内部及附近交代充填(矿浆贯入-喷溢)成矿, 形成查岗诺尔、智博、敦德、备战 4 个大型铁矿床。同时, 在岩浆分异演化过程中,

锌、金成分得以聚集, 以共伴生形成敦德铁锌(金)矿床。构成海相火山气液交代-矿浆充填型铁、铜、锌、金矿床式组。

晚石炭世中晚期, 火山活动持续减弱, 间歇期后的火山再次活动, 在火山机构外侧洼地或火山喷流、喷气裂隙带、火山热泉附近, 形成火山沉积-喷流沉积细碎屑岩及火山喷流沉积形成矿床, 铁矿成矿作用主要为化学沉积-机械沉积, 局部热液交代成矿, 形成式可布台、苏洛、铁木里克铁矿床, 以及巴依图马含钴硫铁矿床。随着岩浆分异演化程度增强, 多共伴生铜、铅、锌、金。构成火山喷流沉积型铁、铜、锌、铅、钴、硫铁矿床式组。

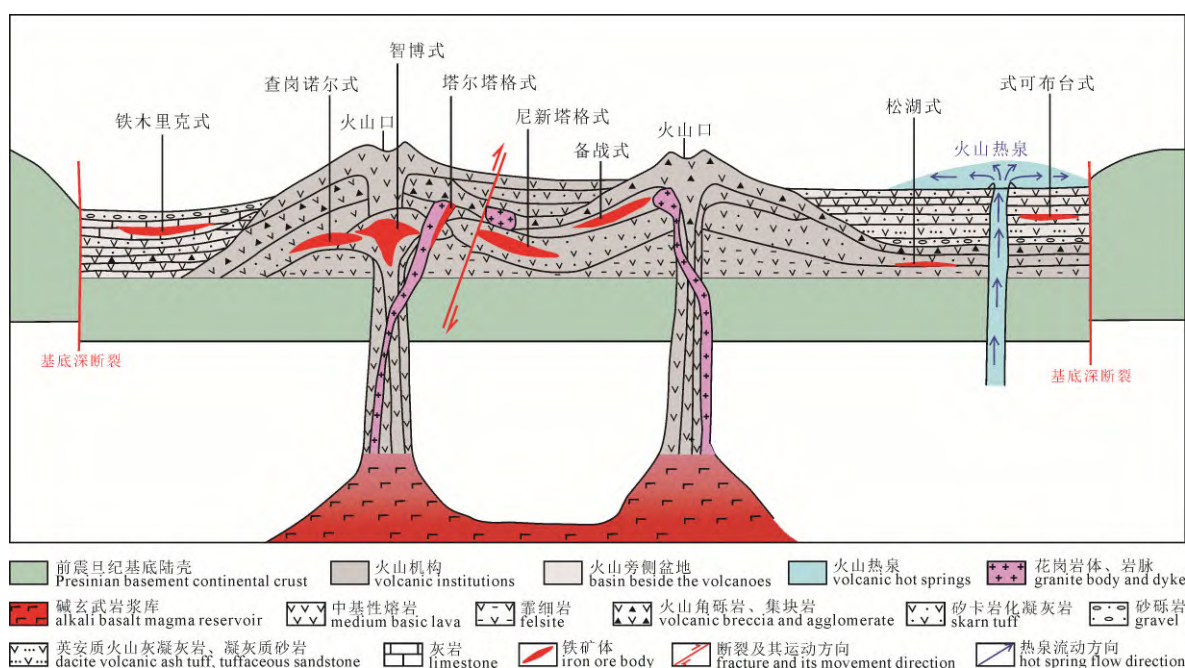


图 7 阿吾拉勒铁矿带区域成矿模式图(董连慧等, 2011)

Fig. 7 Regional metallogenetic model of the Awulale iron metallogenetic belt (DONG et al., 2011)

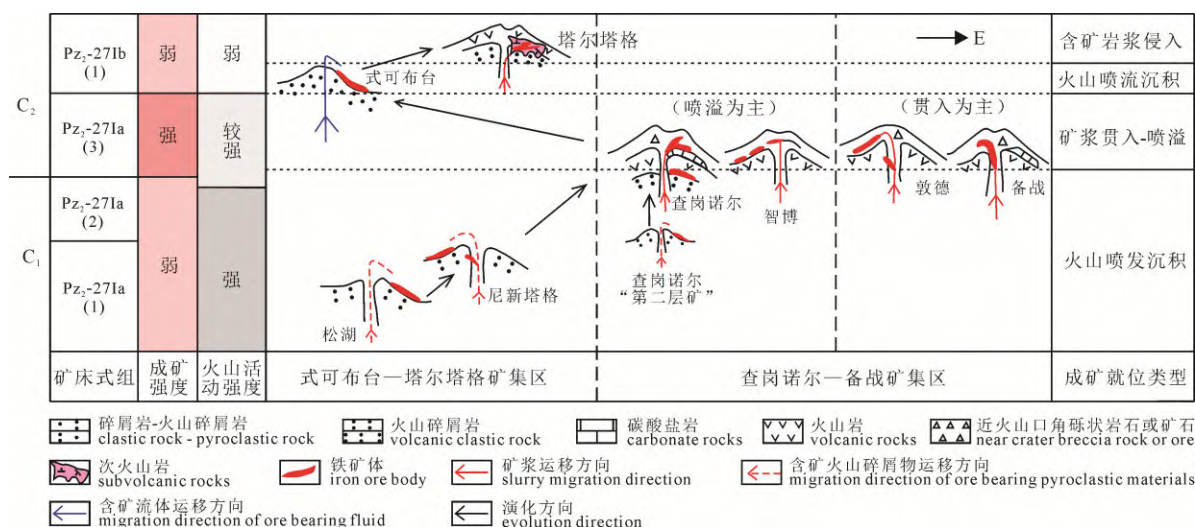


图 8 阿吾拉勒铁矿带铁成矿模式演化规律图(据李凤鸣, 2013 修改)

Fig. 8 Cartoon showing the multiple-episode metallogenetic models for the Awulale iron metallogenetic belt (after LI et al., 2013)

阿吾拉勒与晚石炭—二叠纪次火山岩浆活动有关的铁、铜、钼、金、铅、锌矿床成矿亚系列

Pz₂-27Ib: 晚石炭世晚期, 式可布台铁矿形成期间, 在火山岩带或火山机构中深部, 含矿岩浆分异, 铁矿物质局部聚集为富铁岩浆, 上侵就位成矿, 形成塔尔塔格铁矿床和查岗诺尔胜利 I 号铁铜矿; 二叠纪早期, 伴随辉绿玢岩-石英斑岩序列及石英二长岩-正长斑岩序列侵入, 火山-次火山岩成矿作用增强, 形成松树沟铜钼矿、玉西莫勒盖达坂铜金矿、哈尔嘎嘎林恩金矿、欠哈布代克铅锌银矿等小型独立矿床。

阿吾拉勒铁矿带成矿系列是以阿吾拉勒与二叠纪上叠裂谷双峰式火山-次火山岩建造有关的铜、银、铅、锌矿床成矿亚系列 Pz₂-27Ic 的发生而结束的。二叠纪中期, 裂谷演变为陆相环境, 次火山岩浆作用增强, 在铁矿带西段群吉一带表现为较强烈的铜、银成矿。

3 找矿重大突破

3.1 勘查评价

新疆铁矿勘查工作与国内一样, 经历了 20 世纪 50—60 年代铁矿大普查、70 年代末富铁矿大会战, 再到 80—90 年代铁矿勘查萎缩, 再到新世纪的评价高峰四个主要阶段。阿吾拉勒铁矿带较为系统的地质工作始于 20 世纪 50 年代初, 至 2007 年, 先后在该带及其邻近区域相继开展了不同比例尺的区域地质调查、普查找矿、矿产勘查、区域地球物理(1: 50 万 ~ 1: 100 万航空磁测)和地球化学勘查及综合研究等工作。由于交通条件较差、工作季节短、投入资金少等原因, 致使勘查程度低, 未取得突破。早期(1950—1979 年)主要对式可布台、查岗诺尔、备战铁矿进行普查; 后期(2000—2007 年)新疆地矿局先后发现并评价了松湖、查岗诺尔、备战、尼新塔格—阿克萨克等铁矿, 取得了明显勘查进展。同时, 自 20 世纪 80 年代开始, 新疆地矿局、国家“305”项目办公室以及国内有关科研单位, 相继完成了包括本区在内的新疆区域性成矿地质背景、成矿规律, 以及矿床成矿系列(刘德权等, 1996)和成矿模式等综合性科研工作, 为该带矿产资源评价奠定了基础(董连慧等, 2013)。1998 年陈毓川总结成矿系列理论时指出, 特别是 2003 年前后陈毓川、刘德权等专门到阿尔泰、东天山、西天山等地考察铁矿时进一步强调, 西天山石炭纪火山-沉积盆存在与海相火山-沉积作用有关的 Fe、Mn...矿床(陈毓川等, 2008), 为后期新疆“358”项目在西天山实施的铁矿找矿突破奠定了理论基础。

2008 年, 原国土资源部与自治区政府签订了“合作开展新疆公益性地质调查及重要矿产勘查的协议”(简称“新疆 358 项目”)(董连慧等, 2009), “全国找矿突破战略行动(2011—2020 年)”随后同步实施。阿吾拉勒铁矿带找矿前景巨大, 具备我国大型铁矿(富铁矿)接替基地建设需求的铁矿资源禀赋, 新疆“358”项目将该带作为新疆首批整装勘查区之一, 全面加强勘查评价力度。期间先后有中国地质大调查及地质矿产评价专项、自治区地勘基金、中央专项、自治区 1: 5 万区调项目和自治区深部找矿等部署各类与铁矿有关的重要项目多达 35 项, 包括 2007 年部署的铁矿资源潜力评价、1: 5 万航磁和 1: 5 万高光谱信息提取等重点项目。该带勘查投入资金近 3 亿元, 拉动社会资金近 12 亿元。

3.2 重大成果

阿吾拉勒铁矿带在 2008—2015 年期间快速勘查, 取得了发现大型铁矿床、探获巨大资源储量、提供大型勘查开发基地三项重大找矿成果和成矿理论应用、技术方法、勘查机制三项重大创新(董连慧等, 2011)。

- ①发现亿吨级大型铁矿 5 处、中型铁矿 4 处。特别是备战、智博两个大型富铁矿床, 探获富铁矿资源量约 3.91 亿吨, 为我国富铁矿保有资源储量的 45%;
- ②累计探获铁矿资源量 16.7 亿吨, 共伴生锌 107 万吨、金 30 吨(查岗诺尔 3.26 亿吨、智博 2.14 亿吨、敦德 1.44 亿吨、备战 5.40 亿吨), 预测资源潜力在 30 亿吨以上(董连慧等, 2015);
- ③随着智博、松湖、备战等铁矿山相继开发达产, 2015 年已实现 1 900 万吨铁矿石、1 150 万吨铁精粉的产能, 成为新疆最大的铁矿开发资源基地和国家级大型铁矿开发基地;
- ④重新厘定了伊犁成矿省的成矿系列及成矿谱系, 建立了“上叠裂谷式火山岩富铁矿床成矿模式”, 为寻找评价海相火山岩型铁矿提供了成矿理论依据, 实现成矿理论运用的突破;
- ⑤打破常规、突破规范, 先期采用 1: 5 万航磁测量和配套高光谱蚀变信息提取研究, 快速圈定异常和靶区; 后续安排小分队快速查证, 发现露头, 提出具体勘查建议, 在西天山高山区实现了“当年飞行, 当年查证, 当年见矿”的突出找矿效果;
- ⑥形成“公益先行、基金衔接、商业跟进、整装勘查、快速突破”的地质勘查新机制;
- ⑦已发现铁矿资源潜在经济价值达 3000 亿元以上。2015 年铁矿开发年产值达到 93.5 亿元, 利税 39 亿元左右, 矿床开发带来了重大经济效益与社会效益。目前, 备战、智博、松湖、敦德以及查岗诺尔铁矿均已开发。

3.3 典型案例

阿吾拉勒铁矿带重大找矿突破, 是东部查岗诺尔—备战矿集区备战、查岗诺尔、智博(诺尔湖)、敦

德 4 个大型铁矿床找矿勘查的集中体现, 可归纳为技术路线制定、成矿理论认识、勘查方案优化、技术方法选择、找矿机制保障等五个关键要素(表 4)。

3.4 经验总结

在矿床成矿系列和综合研究(铁矿资源潜力评价)以及 1:5 万航磁和高光谱信息提取的基础上, 结合典型案例经验作法, 总结提出了阿吾拉勒铁矿带实现找矿突破的勘查技术路线、关键环节和路径、基本规律和经验范式(董连慧等, 2011)。

(1) 定立明确的勘查目标 矿床成矿系列和矿产潜力评价与成矿预测的研究成果均反映阿吾拉勒铁矿带具有寻找大型-超大型铁矿前景, 国家和自治区对铁矿资源的需求日益强烈, 要实现找矿突破就要克服该区工作条件恶劣、技术手段有限、保障措施不足等瓶颈问题。为此, 在该带确定了“寻找大型矿床、开拓高山区新勘查区、创新高山区评价技术、创建新勘查机制”的勘查评价目标, 特别是寻找评价大型-超大型铁矿床的找矿目标。

(2) 制定正确的技术路线 “坚持创新思维+坚持科学评价体系+坚持整体评价”是该带勘查技术路线的核心。该带 4 个大型铁矿床发现历经 2~3 个阶段, 几上几下, 突破性进展都是基于对矿床成因认识的转变和提升。2006 年备战铁矿重启勘查后, 运用海相火山岩型铁矿成矿新认识, 将追索矽卡岩带的工作部署调整为探索火山岩层位、火山机构内的贯入-喷溢铁矿层, 进而实现突破; 2008 年智博铁矿勘查, 根据海相火山岩型铁矿“三位一体”找矿预测地质模型, 在矿区东段 48—60 线之间预测深部有铁矿体, 建议在未见矿的 ZK5203 和 ZK6003 之间布置 1000 m 以深的深孔 ZK5601 孔验证, 探获厚大隐伏矿体, 资源储量突破亿吨。科学评价体系就是在成矿理论和高新技术的支撑下, “区划部署+基础调查+物化遥感+矿产勘查+科学研究”五统一工作方法的集成。

(3) 运用科学的成矿理论 建立在板块构造理论基础上的矿床成矿系列理论、成矿模式理论、成矿预测理论, 以及“就矿找矿”理论, 对于阿吾拉勒铁矿带找矿突破起到关键基础作用。运用这些成矿和找矿理论, 分析确定石炭纪古火山机构为西天山铁矿床的主要控矿构造, 提出岩浆深部分异演化过程中富铁岩浆的富集过程及赋矿机理——“上叠裂谷式火山岩富铁矿床成矿模式”, 总结推断下石炭统大哈拉军山组第三亚组作为容矿空间是铁矿找矿的主要方向。按照成矿系列的“缺位找矿”理论, 推测查岗诺尔铁矿床深部存在火山喷发沉积型的“第二含矿层”, 经 2009 年实施的“深部找矿”项目钻探验证, 在 M4 异常揭露到深部的“第二矿层”。

依据成矿系列“全位成矿”理论, 敦德铁矿床顺便评价出了同体共生的大型锌矿、大型伴生金矿, 实现“一矿变三矿”找矿突破。

(4) 应用有效的技术方法 应用矿产资源潜力评价技术(综合研究)、1:5 万航磁+遥感技术、快速评价方法、探矿工程组合技术方法, 针对阿吾拉勒铁矿带地形条件极端困难、地质构造特殊复杂等特点, 通过不断找矿实践, 创建了“地质填图、磁法覆盖、钻探硐探评价、井中三分量磁测、X 荧光快速分析”一套高山区矿产高效快速勘查技术。其中, ①“高寒深切割地区 1:5 万航磁观测和异常识别技术”显著提高了铁矿示矿信息的识别能力和提取效果, 进而创建了高山区“空地结合”(航空物探与地面查证、物探与地质有机结合)异常快速查证评价新机制, 实现了“当年飞行、当年查证、当年见矿”的突出成果; ②磁异常剩余当量反演可预测矿床深部矿体延伸产状, 开辟第二找矿空间。如备战铁矿通过剩磁当量反演推测 0 线已知矿深部还存在厚大缓倾矿体, ZK005 孔验证成功探获厚 300 m 铁矿体, 当年资源量突破亿吨。

(5) 落实有力的保障措施 实现地质找矿突破, 政策机制、人才支持、资金到位等保障措施不可或缺。2008 年新疆“358”项目实施以来, 在该带勘查过程中首先发挥了公益性地质工作先行引领作用, 加强了基础性的地质调查、重点成矿区带矿产远景调查, 推进了与中央基金和地方基金衔接, 进而带动了企业跟进, 全面部署整装勘查, 取得快速突破, 形成“公益先行、基金衔接、商业跟进、整装勘查、快速突破”的勘查新机制。在对带中矿集区勘查, 按照“统一规划、统一部署、分片实施、整装勘查”的部署原则, 实行区域展开、点上突破、点面结合、有序推进, 实现“科学部署—持续投入—持续发现—持续突破”的良性循环。

在阿吾拉勒铁矿带实现找矿突破的过程中, 体现出“勘查目标是动力, 技术路线是核心, 成矿理论是关键, 技术方法是保证, 保障措施是基础”的经验范式。通过矿床成矿系列理论、成矿预测理论与矿产资源潜力评价(综合研究)相互印证, 研究指明找矿方向; 借助成矿预测理论和区域模式理论与矿产资源潜力评价、1:5 万航磁和遥感信息提取相互支持, 评估优选找矿靶区; 依照成矿模式理论和就矿找矿理论与快速评价方法相互配套, 发现确定矿床点; 采用就矿找矿理论支持工程勘查探求资源储量, 继而实现找矿重大突破, 构建了科学、全面、系统的找矿重大突破关键路径和勘查评价体系(图 9)。系统部署体现在技术路线正确与保障措施到位的相互支持, 科学实施表现在运用科学理论与创新

表 4 阿吾拉勒铁矿带 4 大典型铁矿床找矿突破关键要素表

Table 4 Table of key elements for prospecting breakthrough in four typical iron deposits of the Awulale iron metallogenic belt

关键要素	查岗诺尔铁矿	智博(诺尔湖)铁矿	备战铁矿	敦德铁(锌金)矿
技术路线制定	1. 前期以砂卡岩型为目标, 实施矿区填图、地面磁法; 2. 矿床成矿系列认识引领火山作用主导成矿的观点转变, 工作重点转向调查火山机构和火山岩地层; 3. 结合地面及井中磁测钻探验证获得高效率; 4. 结合地面及井中磁测资料精确预测定位磁体, 布置钻孔验证“M4”磁异常	1. 结合以往地质资料, 研究区域 1: 5 万航磁异常, 采用路线地质找矿对磁异常及铁矿转石进行追索检查, 缩小找矿靶区, 找到地表矿露头, 布置探槽揭露, 布置稀疏钻孔开展深部验证, 寻找铁矿体; 2. 对航磁+地磁测试成果反演目标体进行大深度钻孔验证, 发现深部铁矿层后, 进行大规模钻探控制评价	1. 20 世纪 60 年代, 采用路线找矿、磁法测量、槽探等传统找矿; 2. 2004 年重启普查采用地质填图-磁法剖面定位-槽探揭露-钻探验证进行评价; 3. 2006 年制定远景评价“航磁先行-地磁跟进-地质填图-综合研究-钻探验证”总体技术路线	1. 2007 年 5 月, 应用区域“火山岩型铁矿”成矿理论, 优选敦德找矿靶区检查找矿, 发现了矿点; 2. 从区域选靶区到发现矿体, 从地面磁测圈定高磁异常到钻探深部验证, 槽探、钻探并举发现巨大隐伏铁矿体, 再到化探原生晕圈定高品位金矿体; 3. 总结建立“航磁先行-地磁跟进-地质填图-钻探验证”技术路线。
成矿理论认识	1. 第一阶段(1968—1985 年)矿床发现、认为砂卡岩控矿; 2. 第二阶段(1985—2004 年)提出区域成矿系列认识。矿床成矿系列理论将铁成矿带划分为 1 个成矿系列, 2 个亚系列, 指导矿区三阶段勘查; 3. 成因类型属于火山气液交代-矿浆贯入型铁矿床	2006 年以后采用“三位一体”找矿预测地质模型新理论新认识, 指导开展勘查找矿。判断智博属以玄武质岩浆为母岩浆的火山矿浆喷溢(主要)和火山热液交代(次要)复合型矿床	1. 2006 年之前早期找矿, 主要瞄准磁卡岩带找矿探矿; 2. 2006 年后改变原有的接触交代型铁矿成因模式认识, 建立了海相火山岩型矿浆充填火山管道的成矿模型; 3. 2009 年确定属于火山机构控矿的矿浆贯入型铁矿床	1. 2015 年之前存在(岩)浆成矿、热液成矿及二者复合成因等多种观点; 2. 2016 年补充勘探, 认为玄武质母岩浆的矿浆贯入、热液叠加复合型矿床, 是多次隐爆成矿的产物, 因为与中基性火山岩有关的火山热液-矿浆充填型铁锌多金属矿
勘查方案优化	2004 年预普查工作, 原设计方案对矿体按工程网度钻探控制无法实施, 决定使用改装后的 XH-4 地表钻机塔架从山体内部坑道洞室内“一机多孔”倾斜角度实施钻探, 最终达到设计工程控制网度。在矿区 M4 磁异常 04 勘探线取得了较好的探矿效果, 证实“第二含矿层”	1. 采用 1: 1 万地质修测、磁法测量、槽探、钻探等方法组合实施综合评价; 2. 针对东段 52—60 线航磁+地磁异常, 及时调整实施深孔追索验证, 发现深部矿层	地质工作的重点是火山岩原岩恢复、寻找火山机构及相带。磁法由地表二维转向以井中三分量。钻探不再以大幅度斜孔追索砂卡岩带, 而是根据磁异常在远离矿体的北侧围岩区布置深孔深部深部矿体倾向延伸, 并安排井中物探	1. 补充勘探创建了“成矿理论推断靶区+高精度磁测确定靶点+立体探矿勘查模型圈定矿体+三期叠加成矿模式提高附加值”的找矿勘查评价体系; 2. 摸索建立了地、物、化、遥并重, 地表钻、洞探、多角度坑道钻、洞内深孔钻探多种探矿工程有机结合的立体探矿模式
技术方法选择	1. 2006 年后形成“火山机构控矿构造研究+地面高精度磁测及井中磁测+钻探验证”技术方法组合; 2. 经历年勘查以地表矿体露头及高磁异常区为突破口, 通过地质、物探、槽探、钻探、洞探等多种方法手段配套实施	以海相火山成矿理论为指导, 对高磁异常综合研究优选靶区(火山岩相、机构部位、构造等)+实地踏勘检查(发现铁矿体)+物探磁法剖面圈定磁异常判断断矿体产状规模及隐伏矿体, 部署钻探控制和验证	2006 年以前, 采用传统的地质填图-地面磁法-槽探-钻探的勘查手段组合, 之后形成“大比例尺地质填图+地面高精度磁测+磁法、电测剖面测量+成矿预测及靶区圈定+钻探验证+井中磁测+三维建模”的综合评价找矿方法	1. 2010—2011 年矿区勘探工作: 地质填图+水工环测量+1: 2000~1: 5000 磁法测量+钻探(含坑道钻 16 个)+平洞+样品; 2. 2013—2016 年补充勘探阶段: 主要采用洞探、多角度坑道钻、洞内深孔钻探有机结合“立体探矿”
找矿机制保障	1. 实力强、能打硬仗的专业队伍; 2. 国家、地方政府、企业三方投资促进找矿、开发突破; 3. 始终把创新型人才培养放在突出地位	1. 及时引入企业合作, 形成“技术+资金”模式的利益捆绑; 2. 2007 年铁矿发现之初, 前景不明的情况下, 公司出资 8 千万元修路和挖隧道, 解决矿区交通运输瓶颈, 极大推进勘查进程	1. 勘查资金保障程度高; 2. 落实地质找矿奖励激励机制; 3. 选择技术强、作风硬的国有地勘单位; 4. 地方政府大力支持配合	1. 找矿分队吃苦耐劳奉献、找矿激励机制是快速实现找矿突破的关键; 2. 矿业权人全力提供资金支持和后勤保障

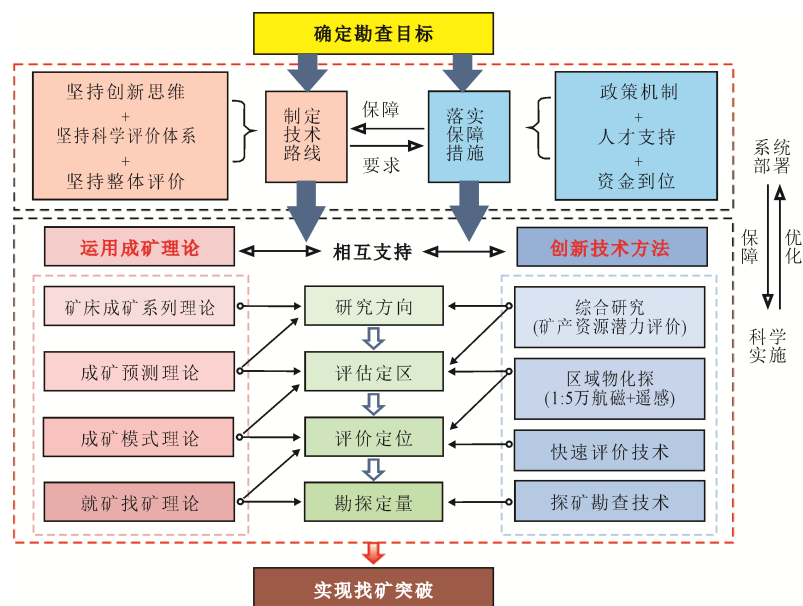


图9 阿吾拉勒铁矿带找矿重大突破关键路径和勘查评价体系图

Fig. 9 The key path and exploration of the evaluation system for breakthrough in prospecting the Awulale iron metallogenic belt

技术方法的有机结合。在系统部署保障科学实施,科学实施优化系统部署的体系内,技术路线的优化、成矿理论的应用和技术方法组合的创新是实现找矿突破的关键路径。

4 结论

矿床成矿系列理论学术思想是阿吾拉勒铁矿带成矿条件和成矿规律深入研究的基础。在新发现的铁矿床及矿床成矿年龄新数据支持下,进一步丰富了阿吾拉勒与石炭纪裂谷双峰式火山岩建造有关成矿亚系列的特征,总结了铁矿带成矿系列的时空演化和成矿组份变化及铁矿成矿类型演化的规律,为该区下一步以铁为主的矿产勘查指明方向。

科学的勘查评价体系支撑了阿吾拉勒铁矿带勘查目标的实现。首次在西天山高山地区对阿吾拉勒铁矿带铁矿集区进行整装勘查,实现找矿重大突破,评价出新疆最大的(富)铁矿带,为我国提供了新的大型铁矿资源开发接替基地,产生巨大的经济和社会效益。科学的勘查评价体系和成功的经验范式有助于推动新疆其他重要矿集区的勘查突破。

致谢: 本文在撰写过程中得到了新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局原总工程师董连慧、原副总工程师刘德权、唐延龄的悉心指导和大力帮助,在此深表感谢!

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (No. DD20221695), and Science and Technology Major Project of Xinjiang (No. 2022A03010).

参考文献:

- 陈毓川, 刘德权, 唐延龄, 王登红, 董连慧, 徐新, 王晓地. 2008. 中国天山矿产及成矿体系[M]. 北京: 地质出版社: 1-1063.
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红, 黄凡. 2022. 八论矿床的成矿系列[J]. 地质学报, 96(1): 123-130.
- 陈毓川, 王登红, 朱裕生, 徐志刚, 任纪舜, 翟裕生, 薛春纪. 2007. 中国成矿体系与区域成矿评价[M]. 北京: 地质出版社: 1-1005.
- 程遂欣, 苏画, 唐瑞彩, 何文劲. 2006. 新疆西天山察布查尔山一带 1: 5 万区域地质矿产调查报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆地矿局第九地质大队.
- 程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣, 宋天锐. 1983. 再论矿床的成矿系列问题[J]. 中国地质科学院院报, (6): 1-64.
- 程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣. 1979. 初论矿床的成矿系列问题[J]. 中国地质科学院院报, 1(1): 32-58.
- 董连慧, 庄道泽, 周坚鑫, 冯京, 冯金星, 石光辉, 李凤鸣, 郝延海, 屈迅, 石福品, 张建收, 宋云辉. 2011. 新疆西天山及昆仑—阿尔金地区三大成矿远景区铁矿勘查评价研究[R]. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局.
- 董连慧, 庄道泽, 周坚鑫, 冯京, 冯金星, 石光辉, 李凤鸣, 郝延海, 屈迅, 石福品, 张建收, 宋云辉. 2011. 新疆西天山及昆仑—阿尔金地区三大成矿远景区铁矿勘查评价研究[R]. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局.
- 董连慧, 冯京, 刘德权, 屈迅, 唐延龄, 庄道泽, 李凤鸣, 杨在峰, 涂其军. 2013. 新疆铁矿床成矿规律及成矿预测评价[M]. 北京: 地质出版社.
- 董连慧, 李凤鸣, 屈迅. 2009. 2008 年新疆地质矿产勘查主要成果及国土资源部与新疆维吾尔自治区“358 项目”工作部署[J]. 新疆地质, 27(1): 1-4.
- 董连慧, 刘德权, 唐延龄, 冯京, 屈迅, 李凤鸣, 田江涛, 徐仕琪. 2015. 试论新疆成矿体系与时空演化模式[J]. 矿床地质, 34(6): 1107-1129.
- 董连慧. 2021. 中国矿产地质志·新疆卷[R]. 乌鲁木齐: 新疆地

质调查院.

- 黄栋. 2017. 西天山阿吾拉勒地区晚石炭-中二叠世浅成酸性岩体的成因及地质意义[D]. 西安: 西北大学.
- 蒋宗胜, 张作衡, 侯可军, 洪为, 王志华, 李凤鸣, 田敬全. 2012. 西天山查岗诺尔和智博铁矿区火山岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 岩石学报, 28(7): 2074-2088.
- 荆德龙, 汪帮耀, 张博, 姜常义, 夏明哲, 李永军, 任毅. 2015. 西天山松湖铁矿区火山岩地球化学特征、成岩时代及其地质意义[J]. 地球学报, 36(6): 729-741.
- 荆德龙. 2016. 西天山阿吾拉勒成矿带铁矿成矿作用与成矿规律研究[D]. 西安: 长安大学: 1-205.
- 李凤鸣, 彭湘萍, 石福品, 周昌平, 陈建中. 2011. 西天山石炭纪火山-沉积盆地铁锰矿成矿规律浅析[J]. 新疆地质, 29(1): 55-60.
- 李凤鸣. 2013. 西天山石炭纪火山-沉积盆地铁锰矿成矿规律和找矿方向[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 1-110.
- 李华芹, 谢才富, 常海亮. 1998. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学[M]. 北京: 地质出版社: 202-221.
- 李新光, 付钟旗, 康小丁, 常东, 刘宗安, 侯国栋, 程雅军, 张波, 孙军军, 姚新桃. 2011. 新疆尼勒克县尼新塔格铜及多金属矿普查报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆地矿局第九地质大队.
- 李永军, 李注苍, 佟丽莉, 高占华, 佟黎明. 2010. 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, 26(10): 2905-2912.
- 李永军, 佟丽莉, 王祚鹏, 李卫东, 郭文杰, 李甘雨, 杨高学. 2020. 伊宁地块构造单元划分——来自火山岩浆作用的证据[J]. 岩石学报, 36(7): 1986-2000.
- 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 1996. 中国新疆矿床成矿系列[M]. 北京: 地质出版社.
- 倪建辉, 陈友智. 2013. 新疆新源县塔尔塔格铁多金属矿勘探地质报告[R]. 福州: 福建省第八地质大队.
- 钱青, 高俊, 熊贤明, 龙灵利, 黄德志. 2006. 西天山昭苏北部石炭纪火山岩的岩石地球化学特征、成因及形成环境[J]. 岩石学报, 22(5): 1307-1323.
- 任毅, 肖燕洪, 刘猛. 2010. 新疆尼勒克县松湖铁矿深部及外围普查报告[R]. 乌苏: 新疆地矿局第七地质大队.
- 王宗斌. 2011. 新疆和静县查岗诺尔铁矿资源储量核实报告[R]. 库尔勒: 新疆地矿局第三地质大队.
- 魏梦元, 杨晓飞, 刘建兵, 胡秀军, 王厚方, 华克强, 陈德本, 江长青, 唐廷, 郭安校, 杜金花, 杨海英, 张云, 肖刚, 谢万兵, 邵青红. 2012. 新疆和静县查岗诺尔铁矿深部找矿勘查报告[R]. 库尔勒: 新疆地矿局第三地质大队.
- 张作衡, 洪为, 蒋宗胜, 段士刚, 王志华, 李凤鸣, 石福品, 赵军, 郑仁乔. 2012. 新疆西天山晚古生代铁矿床的地质特征、矿化类型及形成环境[J]. 矿床地质, 31(5): 941-964.
- 赵同阳, 朱志新. 2021. 新疆蛇绿岩时空分布特征及对增生造山过程的制约[J]. 新疆地质, 39(1): 21-29.
- 赵振刚, 郭新成, 张建收, 冯宝童, 单凤翔, 李建平. 2012. 新疆和静县备战铁矿深部及外围普查[R]. 昌吉: 新疆地矿局第十一地质大队.
- 朱志新, 董连慧, 王克卓, 赵同阳, 徐仕琪, 陈邦学, 李平, 靳留圆. 2013. 西天山造山带构造单元划分与构造演化[J]. 地质通报, 32(2): 297-306.
- 左国朝, 张作衡, 王志良, 刘敏, 王龙生. 2008. 新疆西天山地区构造单元划分、地层系统及其构造演化[J]. 地质论评, 54(6): 731-750.

References:

- CHARVET J, SHU Liang-shu, LAURENT-CHARVET S. 2007. Paleozoic structural and geodynamic evolution of eastern Tianshan (NW China): Welding of the Tarim and Junggar plates[J]. Episodes Journal of International Geoscience, 30(3): 162-186.
- CHEN Yu-chuan, LIU De-quan, TANG Yan-ling, WANG Deng-hong, DONG Lian-hui, XU Xin, WANG Xiao-di. 2008. Minerals and Metallogenic System in Tianshan, China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-1063(in Chinese).
- CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, WANG Deng-hong, HUANG Fan. 2022. A discussion on minerogenetic series of mineral deposits(VIII)[J]. Acta Geologica Sinica, 96(1): 123-130(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, ZHU Yu-sheng, XU Zhi-gang, REN Ji-shun, ZHAI Yu-sheng, XUE Chun-ji. 2007. Metallogenic system and regional metallogenic evaluation in China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-1005(in Chinese).
- CHENG Sui-xin, SU Hua, TANG Rui-cai, HE Wen-jin. 2006. A survey report of 1:50000 regional geology and mineral resources in Chabuchaer Mountain, West Tianshan, Xinjiang[R]. Urumqi: NO.9 Unit of Xinjiang Bureau of Geo-exploration and Mineral Development (in Chinese).
- CHENG Yu-qi, CHEN Yu-chuan, ZHAO Yi-ming, SONG Tian-rui. 1983. Further discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, (6): 1-64(in Chinese with English abstract).
- CHENG Yu-qi, CHEN Yu-chuan, ZHAO Yi-ming. 1979. Preliminary discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1(1): 32-58(in Chinese with English abstract).
- DONG Lian-hui, FENG Jing, LIU De-quan, QU Xun, TANG Yan-ling, ZHUANG Dao-ze, LI Feng-ming, YANG Zai-feng, TU Qi-jun. 2013. Metallogenic regularity and metallogenic prediction evaluation of Xinjiang iron deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- DONG Lian-hui, LI Feng-ming, QU Xun. 2009. Geological exploration achievements of Xinjiang in 2008 and 'Project 358' arrangements by the ministry of land and resources and the people's government of the Xinjiang Uygur autonomous region[J]. Xinjiang Geology, 27(1): 1-4(in Chinese with English abstract).
- DONG Lian-hui, LIU De-quan, TANG Yan-ling, FENG Jing, QU Xun, LI Feng-ming, TIAN Jiang-tao, XU Shi-qi. 2015. Five-era metallogenic system of mineral deposits in Xinjiang and its spatial and temporal evolution mode[J]. Mineral Deposits, 34(6): 1107-1129(in Chinese with English abstract).
- DONG Lian-hui, ZHUANG Dao-ze, ZHOU Jian-xin, FENG Jing, FENG Jin-xing, SHI Guang-hui, LI Feng-ming, HAO Yan-hai, QU Xun, SHI Fu-pin, ZHANG Jian-shou, SONG Yun-hui. 2011. Study on the exploration and evaluation of iron ore in three metallogenic prospect areas of West Tianshan Mountain and Kunlun Altun Region of Xinjiang[R]. Urumqi: Xinjiang

- Bureau of Geo-exploration and Mineral Development (in Chinese).
- DONG Lian-hui. 2021. Geology of Mineral Resources in China Xinjiang Volume[R]. Urumqi: Geological Survey Academy of Xinjiang(in Chinese).
- GAO Jun, LI Mao-song, XIAO Xu-chang, TANG Yao-qing, HE Guo-qi. 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China[J]. Tectonophysics, 287(1-4): 213-231.
- GAO Jun, LONG Ling-li, KLEMD R, QIAN Qing, LIU Dun-yi, XIONG Xian-ming, SU Wen, LIU Wei, WANG Yi-tian, YANG Fu-qun. 2009. Tectonic evolution of the South Tianshan orogen and adjacent regions, NW China: Geochemical and age constraints of granitoid rocks[J]. International Journal of Earth Sciences, 98: 1221-1238.
- HAN Chun-ming, XIAO Wen-jiao, SU Ben-xun, SAKYI P A, AO Song-jian, ZHANG Ji-en, WAN Bo, SONG Dong-fang, ZHANG Zhi-yong, WANG Zhong-mei, XIE Ming-cai. 2020. Late Paleozoic metallogenesis and evolution of the Chinese Western Tianshan Collage, NW China, Central Asia orogenic belt[J]. Ore Geology Reviews, 124: 103643.
- HU Ai-qin, JAHN Bor-ming, ZHANG Guo-xin, CHEN Yi-bing, ZHANG Qian-feng. 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence. Part I: Isotopic characterization of basement rocks[J]. Tectonophysics, 328: 15-51.
- HUANG Dong. 2017. Origin and its geological significance of Carboniferous-Permian hypabyssal intermediate-acid plutons in the Awulale area, West Tianshan[D]. Xi'an: Northwest University(in Chinese with English abstract).
- HUANG Hu, CAWOOD P A, HOU Ming-cai, XIONG Fu-hao, NI Shi-jun, GONG Ting-ting. 2019. Provenance of latest Mesoproterozoic to early Neoproterozoic (meta)-sedimentary rocks and implications for paleogeographic reconstruction of the Yili Block[J]. Gondwana Research, 72: 120-138.
- HUANG Zong-ying, LONG Xiao-ping, YUAN Chao, SUN Min, WANG Yu-jing, ZHANG Yun-ying, CHEN Bei. 2016. Detrital zircons from Neoproterozoic sedimentary rocks in the Yili Block: Constraints on the affinity of microcontinents in the southern Central Asian Orogenic Belt[J]. Gondwana Research, 37: 39-52.
- JIANG Zong-sheng, ZHANG Zuo-heng, HOU Ke-jun, HONG Wei, WANG Zhi-hua, LI Feng-ming, TIAN Jing-quan. 2012. Geochemistry and zircon U-Pb age of volcanic rocks from the Chagangnuoer and Zhibo iron deposits, western Tianshan, and their geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(7): 2074-2088(in Chinese with English abstract).
- JIANG Zong-sheng, ZHANG Zuo-heng, WANG Zhi-hua, DUAN Shi-gang, LI Feng-ming, TIAN Jing-quan. 2014. Geology, geochemistry, and geochronology of the Zhibo iron deposit in the Western Tianshan, NW China: Constraints on metallogenesis and tectonic setting[J]. Ore Geology Reviews, 57: 406-424.
- JING De-long, WANG Bang-yao, ZHANG Bo, JIANG Chang-yi, XIA Ming-zhe, LI Yong-jun, REN Yi. 2015. Geochemistry and geochronology of the volcanic rocks in the Songhu iron deposit of Western Tianshan mountains and their geological significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 36(6): 729-741(in Chinese with English abstract).
- JING De-long. 2016. Mineralization and metallogenic regularity of Awulale metallogenic belt in western Tianshan mountain, Northwest China[D]. Xi'an: Chang'an University: 1-205(in Chinese with English abstract).
- LI Feng-ming, PENG Xiang-ping, SHI Fu-pin, ZHOU Chang-ping, CHEN Jian-zhong. 2011. Analysis on Fe-Mn mineralization regularity in Carboniferous volcanic-sedimentary basin of west Tianshan[J]. Xinjiang Geology, 29(1): 55-60(in Chinese with English abstract).
- LI Feng-ming. 2013. Metallogenic regularity and prospecting direction of Fe-Mn ore in the Carboniferous volcanic-sedimentary basin in Western Tianshan[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing): 1-110(in Chinese with English abstract).
- LI Hua-qin, XIE Cai-fu, CHANG Hai-liang. 1998. Metallogenic chronology of nonferrous metal deposits in northern Xinjiang[M]. Beijing: Geological Publishing House: 202-221(in Chinese).
- LI Xin-guang, FU Zhong-qi, KANG Xiao-ding, CHANG Dong, LIU Zong-an, HOU Guo-dong, CHENG Ya-jun, ZHANG Bo, SUN Jun-jun, YAO Xin-tao. 2011. Survey report of Nixintag copper and polymetallic deposits in Nilek County, Xinjiang[R]. Urumqi: NO.9 Unit of Xinjiang Bureau of Geo-exploration and Mineral Development(in Chinese).
- LI Yong-jun, LI Zhu-cang, TONG Li-li, GAO Zhan-hua, TONG Li-ming. 2010. Revisit the constraints on the closure of the Tianshan ancient oceanic basin: New evidence from Yining block of the Carboniferous[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(10): 2905-2912(in Chinese with English abstract).
- LI Yong-jun, TONG Li-li, WANG Zuo-peng, LI Wei-dong, GUO Wen-jie, LI Gan-yu, YANG Gao-xue. 2020. Division of tectonic units in Yining Block: Evidence from volcano-magmatism[J]. Acta Petrologica Sinica, 36(7): 1986-2000(in Chinese with English abstract).
- LIU De-quan, TANG Yan-ling, ZHOU Ru-hong. 1996. Metallogenic series of deposits in Xinjiang, China[J]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- LONG Ling-li, GAO Jun, KLEMD R, BEIER C, QIAN Qing, ZHANG Xi, WANG Jing-bin, JIANG Tuo. 2011. Geochemical and geochronological studies of granitoid rocks from the Western Tianshan Orogen: Implications for continental growth in the southwestern Central Asian Orogenic Belt[J]. Lithos, 126: 321-340.
- LU Song-nian, LI Huai-kun, ZHANG Chuan-lin, NIU Guang-hua. 2008. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments[J]. Precambrian Research, 160(1-2): 94-107.
- NI Jian-hui, CHEN You-zhi. 2013. Geological report of iron polymetallic ore exploration in Tartag, Xinyuan County, Xinjiang[R]. Fuzhou: NO.8 Unit of Fujian Bureau of Geo-exploration and Mineral Development (in Chinese).
- QIAN Qing, GAO Jun, KLEMD R, HE Guo-qi, SONG Biao, LIU Dun-yi, XU Rong-hua. 2009. Early Paleozoic tectonic evolution of the Chinese South Tianshan Orogen: Constraints from

- SHRIMP zircon U-Pb geochronology and geochemistry of basaltic and dioritic rocks from Xiata, NW China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98: 551-569.
- QIAN Qing, GAO Jun, XIONG Xian-ming, LONG Ling-li, HUANG De-zhi. 2006. Petrogenesis and tectonic settings of Carboniferous volcanic rocks from north Zhaosu, western Tianshan Mountains: Constraints from petrology and geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1307-1323(in Chinese with English abstract).
- REN Yi, XIAO Yan-hong, LIU Meng. 2010. Survey report on the deep and peripheral areas of Songhu Iron Mine, Nilek County, Xinjiang[R]. Wusu: NO.7 Unit of Xinjiang Bureau of Geo-exploration and Mineral Development(in Chinese).
- ROJAS-AGRAMONTE Y, KRÖNER A, ALEXEIEV D V, JEFFREYS T, KHUDDOLEY A K, WONG J, GENG H, SHU L, SEMILETKIN S A, MIKLAICHUK A V, KISELEV V V, YANG J, SELTMANN R. 2014. Detrital and igneous zircon ages for supracrustal rocks of the Kyrgyz Tianshan and palaeogeographic implications[J]. *Gondwana Research*, 26(3-4): 957-974.
- TAO Zai-li, YIN Ji-yuan, CHEN Wen, CHEN Yue-long, SUN Jing-bo, XU Zhi-hua. 2022. Zircon U-Pb Ages and Tectonic Implications of Late Paleozoic Volcanic Rocks in the Western Tianshan, North Xinjiang, China[J]. *Journal of Earth Science*, 33(3): 736-752.
- WANG Bo, FAURE M, SHU Liang-shu, CLUZEL D, CHARVET J, DE JONG K, CHEN Yan. 2008. Paleozoic tectonic evolution of the Yili Block, western Chinese Tianshan[J]. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 179(5): 483-490.
- WANG Xin-shui, ZHANG Xi, GAO Jun, LI Ji-lei, JIANG Tuo, XUE Sheng-chao. 2018. A slab break-off model for the submarine volcanic-hosted iron mineralization in the Chinese Western Tianshan: Insights from Paleozoic subduction-related to post-collisional magmatism[J]. *Ore Geology Reviews*, 92: 144-160.
- WANG Xin-song, BI Xian-wu, LENG Cheng-biao, ZHONG Hong, TANG Hong-feng, CHEN You-wei, YIN Guang-hou, HUANG Ding-zhu, ZHOU Mei-fu. 2014. Geochronology and geochemistry of Late Cretaceous igneous intrusions and Mo-Cu(W) mineralization in the southern Yidun Arc, SW China: Implications for metallogenesis and geodynamic setting[J]. *Ore Geology Reviews*, 61: 73-95.
- WANG Zong-bin. 2011. Verification report on resources and reserves of Chagangnur Iron Mine in Hejing County, Xinjiang[R]. Korla: NO.3 Unit of Xinjiang Bureau of Geo-exploration and Mineral Development(in Chinese).
- WEI Meng-yuan, YANG Xiao-fei, LIU Jian-bing, HU Xiu-jun, WANG Hou-fang, HUA Ke-qiang, CHEN De-ben, JIANG Chang-qing, TANG Ting, GUO An-xiao, DU Jin-hua, YANG Hai-ying, ZHANG Yun, XIAO Gang, XIE Wan-bing, SHAO Qing-hong. 2012. Deep ore exploration report of Chagangnur Iron mine, Hejing County, Xinjiang[R]. Korla: NO.3 Unit of Xinjiang Bureau of Geo-exploration and Mineral Development (in Chinese).
- WINDLEY B F, ALEXEIEV D, XIAO Wen-jiao, KRÖNER A, BADARCH G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 164(1): 31-47.
- XIAO Wen-jiao, WINDLEY B F, ALLEN M B, HAN Chun-ming. 2013. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1316-1341.
- XIAO Wen-jiao, WINDLEY B F, BADARCH G, SUN Shu, LI Ji-liang, QIN Ke-zhang, WANG Z. 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: Implications for the growth of Central Asia[J]. *Journal of the Geological Society*, 161(3): 339-342.
- XIAO Wen-jiao, WINDLEY B F, SUN Shu, LI Ji-liang, HUANG Bao-chun, HAN Chun-ming, YUAN Chao, SUN Min, CHEN Han-lin. 2015. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic collage systems in Central Asia: Oroclines, sutures, and terminal accretion[J]. *The Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43: 477-507.
- ZHANG Zuo-heng, HONG Wei, JIANG Zong-sheng, DUAN Shi-gang, WANG Zhi-hua, LI Feng-ming, SHI Fu-pin, ZHAO Jun, ZHENG Ren-qiao. 2012. Geological features, mineralization types and metallogenic setting of Late Paleozoic iron deposits in western Tianshan Mountains of Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 31(5): 941-964(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Tong-yang, ZHU Zhi-xin. 2021. Spatiotemporal distribution of ophiolite in Xinjiang and constraints on accretionary orogenic processes[J]. *Xinjiang Geology*, 39(1): 21-29(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Zhen-gang, GUO Xin-cheng, ZHANG Jian-shou, SHAN Feng-xiang, LI Jian-ping. 2012. Survey of the deep and peripheral areas of the Beizhan iron mine in Hejing County, Xinjiang[R]. Changji: NO.11 Unit of Xinjiang Bureau of Geo-exploration and Mineral Development (in Chinese).
- ZHOU Jian-bo, WILDE S A, ZHAO Guo-chun, HAN Jie. 2018. Nature and assembly of microcontinental blocks within the Paleo-Asian Ocean[J]. *Earth-Science Reviews*, 186: 76-93.
- ZHU Xiao-yan, WANG Bo, CLUZEL D, HE Zhi-yuan, ZHOU Yong, ZHONG Ling-lin. 2019. Early Neoproterozoic gneissic granitoids in the southern Yili Block (NW China): Constraints on microcontinent provenance and assembly in the SW Central Asian Orogenic Belt[J]. *Precambrian Research*, 325: 111-131.
- ZHU Zhi-xin, DONG Lian-hui, WANG Ke-zhuo, ZHAO Tong-yang, XU Shi-qi, CHEN Bang-xue, LI Ping, JIN Liu-yuan. 2013. Tectonic division and regional tectonic evolution of west Tianshan orogenic belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(2): 297-306(in Chinese with English abstract).
- ZUO Guo-chao, ZHANG Zuo-heng, WANG Zhi-liang, LIU Min, WANG Long-sheng. 2008. Tectonic division, stratigraphical system and the evolution of western Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Geological Review*, 54(6): 731-750(in Chinese with English abstract).