

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.222>



西天山构造演化与优势矿产成矿规律

张连昌^{1,2}, 冯京³, 李平³, 朱明田¹, 董志国¹, 高炳宇¹, 张新¹,
王长乐¹, 陈博⁴, 计文化⁴

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. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局, 新疆乌鲁木齐 830000

4. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西西安 710054

摘要: 西天山位于中亚增生型造山带的西南缘, 夹于准噶尔地块和塔里木克拉通之间。西天山造山带的构造演化与天山洋的俯冲-关闭过程密切相关。西天山地质构造复杂, 成矿作用独特, 既可形成与活动陆缘有关的斑岩铜金矿和火山-沉积岩型铁锰矿, 也可发育与伸展构造有关的海底热水沉积型铅锌矿和浅成低温热液型金矿等多个集中区。西天山地质构造演化和成矿作用一直是地质学家关注和研究的热点, 近年来的地质找矿和基础研究工作也取得一系列重大进展, 但同时也存在一些急待解决的问题。本文通过对区域地质背景、沉积建造、岩浆演化、成矿地质特征与物质来源、控矿因素等方面资料的综合研究, 认为西天山造山带从前寒武纪到晚古生代经历了古陆边缘裂解、洋-陆俯冲增生、陆-陆碰撞及后造山伸展等地质过程; 与此相应形成了多个成矿区带, 主要包括:(1) 哈尔达坂前寒武纪古陆边缘裂陷盆地环境的铅锌成矿带,(2) 与博罗科努古生代洋-陆俯冲、碰撞-碰撞后伸展环境有关的金铜铅锌多金属成矿带,(3) 与阿吾拉勒晚古生代岛弧-弧后盆地有关的铁多金属成矿带,(4) 那拉提古生代岛弧金铜多金属成矿带。在此基础上建立了西天山主要成矿区带的成矿模式, 厘定了与西天山沉积建造-构造活动-岩浆活动有关的成矿序列, 总结了西天山铁铜铅锌金等优势矿产时空结构模型。

关键词: 构造演化; 优势矿产; 成矿模式; 成矿规律; 西天山; 中亚造山带; 矿床学。

中图分类号: P611

文章编号: 1000-2383(2022)09-3127-20

收稿日期: 2021-11-24

Tectonic Evolution and Metallogenic Regularity of Dominant Deposits in the Western Tianshan

Zhang Lianchang^{1,2}, Feng Jing³, Li Ping³, Zhu Mingtian¹, Dong Zhiguo¹, Gao Bingyu¹, Zhang Xin¹,
Wang Changle¹, Chen Bo⁴, Ji Wenhua⁴

1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100029, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources and Development, Urumqi 830000, China

4. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, China

Abstract: The West Tianshan is located in the southwest margin of the Central Asian accretionary orogenic belt. It is sandwiched

基金项目: 国家重点研发计划深地专项(No. 2018YFC0604001); 国家自然科学基金项目(No. U1703242)。

作者简介: 张连昌(1959—), 男, 研究员, 博士生导师, 矿床地质专业。ORCID: 0000-0003-3509-1646. E-mail: lcchang@mail. iggcas. ac. cn

引用格式: 张连昌, 冯京, 李平, 朱明田, 董志国, 高炳宇, 张新, 王长乐, 陈博, 计文化, 2022. 西天山构造演化与优势矿产成矿规律. 地球科学, 47(9):3127—3146.

Citation: Zhang Lianchang, Feng Jing, Li Ping, Zhu Mingtian, Dong Zhiguo, Gao Bingyu, Zhang Xin, Wang Changle, Chen Bo, Ji Wenhua, 2022. Tectonic Evolution and Metallogenic Regularity of Dominant Deposits in the Western Tianshan. *Earth Science*, 47(9):3127—3146.

between Junggar Block and Tarim Craton. Its tectonic evolution is closely related to subduction-closed processes of Tianshan ocean. The geological structure of the West Tianshan is complex and its mineralization is unique. Some ore concentration areas were developed in West Tianshan orogen, such as porphyry gold-copper deposit and volcanic-sedimentary type ferromanganese deposit related to active continental margin, and submarine hydrothermal sedimentary lead-zinc deposit and epithermal hydrothermal gold deposit related to extensional tectonics setting. The tectonic evolution and mineralization of the West Tianshan have always been the focus of geological research. In recent years, significant progress has been made in geological prospecting and basic research. However, there are still some major geological and ore-forming problems to be solved urgently. Based on comprehensive study of the regional geological background, sedimentary formation, magmatic evolution, metallogenic geological characteristics, ore-forming material sources and ore-controlling factors, it is shown that West Tianshan orogen has experienced some geodynamic processes, namely the formation of Precambrian continent, ocean-continent subduction accretion, continent-continent collision orogen. Some main metallogenic belts were formed in the West Tianshan from Precambrian to Late Paleozoic, such as (1) Haldaban Precambrian Pb-Zn metallogenic belt, (2) Borokonu Paleozoic gold-copper-lead-zinc polymetallic metallogenic belt, (3) Awulake Late Paleozoic iron manganese polymetallic metallogenic belt, (4) Nalati Paleozoic gold-copper polymetallic metallogenic belt. And on that basis, some the ore-forming models of the main metallogenic belts were established, the metallogenic sequences related to sedimentary formation-tectonic-magmatic activity were determined, the spatiotemporal structural models of the regional dominant resources such as iron, copper, lead, zinc and gold were summarized.

Key words: tectonic evolution; dominant minerals; metallogenic model; metallogenic regularity; western Tianshan; Central Asian Orogenic Belt; mineral deposits.

0 引言

西天山造山带为中亚造山区的重要组成部分,主要由古生代陆缘岩系、洋壳残片、前寒武纪微陆块结晶基底等拼贴增生而成,其构造特征与天山洋盆演化密切相关(Windley *et al.*, 1990, 2007; Allen *et al.*, 1993; 高俊等, 1997, 2009; 肖文交等, 2006, 2019; 朱志新等, 2013; 王涛等, 2020; Wan *et al.*, 2021). 西天山地区洋陆转换构造发育、岩浆活动强烈、成矿条件优越,是斑岩型铜金矿、浅成低温热液型金矿、造山带型金矿、火山-沉积岩型铁锰矿和海底喷流沉积型铅锌矿床等优势矿产的集中产区(Pirajno *et al.*, 2011; 张作衡等, 2012; 董连慧等, 2011; 李凤鸣等, 2011; 李凤鸣, 2013; 薛春纪等, 2011, 2014a, 2014b; 顾雪祥等, 2014a, 2014b, 2016; Yang *et al.*, 2019). 近 20 年来,西天山地质构造演化和成矿作用受到地质学家的广泛重视,区域构造演化、岩浆活动和找矿预测方面已取得了一系列重大进展,但同时也存在一些急待解决的问题. 如晚古生代西天山的构造背景是裂谷(车自成等, 1996; 夏林圻等, 2004, 2008, 董连慧等, 2011; Wang *et al.*, 2014)还是活动陆缘(姜常义等, 1993; Xiao, 2004; 高俊等, 2009; 肖文交等, 2019; Han *et al.*, 2020; 李永军等, 2020; Xing *et al.*, 2021)一直存在争议. 最近有学者提出天山地区在 400~330 Ma 期间记录了一个海山改造的造山过程, 330 Ma 后

转变为正常俯冲并伴随有大规模岩浆活动和高压岩石折返的新认识(Wan *et al.*, 2021). 同时在成矿作用方面也存在一些不同的认识,如卡特巴阿苏金矿是造山带型(薛春纪等, 2014a)还是斑岩型(Dong *et al.*, 2018a, 2018b),式可布台铁矿是火山沉积(张新等, 2020)还是化学沉积成因(Yang *et al.*, 2019)等均存在不同的认识.

综上所述,整体研究西天山地区铁锰铅锌铜等大宗优势矿产的成矿条件及展布规律、深化区域构造演化与大宗优势矿产成矿规律的认识,是一项十分紧迫的任务. 本文通过区域成矿地质背景、沉积建造、岩浆演化、成矿地质特征、物质来源及控矿因素等方面的综合研究,总结了西天山各主要成矿区带的成矿规律和成矿模式,建立了西天山造山带铁铜铅锌金等优势矿产时空结构模型和区域成矿演化模式,为进一步总结区域矿产成矿规律与深部预测提供依据.

1 区域地质与矿产概况

西天山造山带位于中亚增生型造山带的西南缘,夹于准噶尔地块和塔里木克拉通之间,自北向南大致可划分为伊犁地块、中天山地块和塔里木克拉通北部陆缘,各地块之间分别被那拉提北缘断裂和中天山南缘断裂分割(图 1; 高俊等, 2009; 董连慧等, 2011).

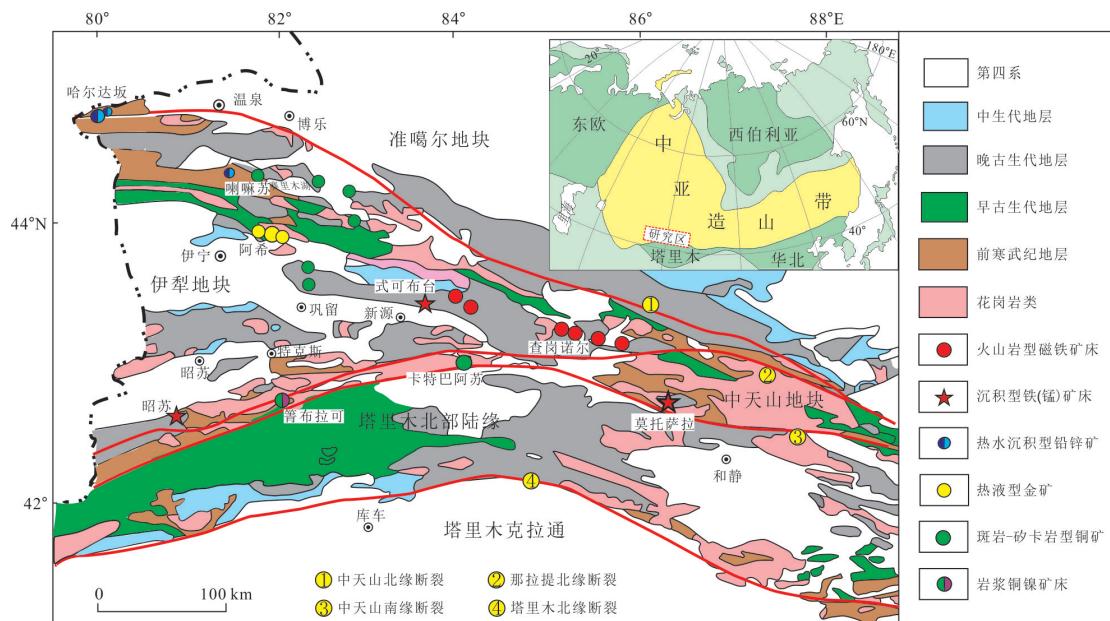


图1 西天山区域构造地质和主要矿床分布简图(据高俊等, 2009; Xiao *et al.*, 2013修改)

Fig.1 Sketch map of regional tectonic geology and distributions of main deposit in the western Tianshan(after Gao *et al.*, 2009; Xiao *et al.*, 2013)

伊犁地块可进一步划分为伊犁地块北缘活动陆缘、伊犁地块、伊犁地块南缘活动陆缘；中天山地块可划分为中天山复合弧地体和西天山(高压)增生楔(高俊等, 2009)。

(1)伊犁地块北缘由不同岩性特征的前寒武纪变质岩系组成,主要包括元古代的温泉群、哈尔达坂群浅变质碎屑岩,新元古界开尔塔斯群、库松木切克群碳酸盐岩夹少量碎屑岩和震旦系凯拉克提群冰碛岩。主要出露于赛里木湖以北、科古琴山一带,区内广泛发育沉积型铅锌矿,已知矿床有哈尔达坂、托克赛和四台海泉铅锌矿等。

(2)伊犁地块的主体相当于伊犁盆地范围,被中新生代沉积物覆盖。该地块东段阿吾拉勒山一带出露石炭纪、二叠纪火山岩和沉积岩,以火山岩-火山沉积相铁多金属矿为特征。矿床与火山机构相对位置不同常表现出不同的成矿作用特征,可形成火山沉积型、火山热液型和矿浆喷溢型矿床。远离火山机构的沉积型铁锰矿形成于石炭纪的碎屑岩-碳酸盐岩建造中,属浅海陆棚相沉积,已知矿床有西天山的莫托沙拉铁锰矿床等。

(3)伊犁地块南缘,主要沿伊什基里克山、那拉提山北坡、阿吾拉勒山南缘一带分布。浅成低温热液型金矿主要形成于晚古生代,受破火山机构控制,多产于环形断裂中,代表性矿床有阿希、博古图。矽卡岩型铁铜矿为近年发

现并被评价的西天山哈拉尕提铁铜多金属矿体,产于大瓦布拉克二长花岗杂岩体与上奥陶统呼独克达坂组粉-泥晶灰岩接触带矽卡岩中,形态不规则,严格受接触带矽卡岩控制。

(4)中天山复合地块夹持于那拉提北缘断裂-尼古拉耶夫线和中天山南缘断裂之间,具前寒武纪变质结晶基底,并广泛叠加了古生代侵入岩、火山岩和沉积岩。

(5)西天山矿种较丰富,金属矿产主要有金、铜(镍)、铁、铅锌、锰等(图1)。其中大型金矿4处(阿希、卡特巴阿苏、博古图、双泉),中型铜矿5处(嘛喇苏、群吉、哈勒尕提、博斯坦北、乔霍特),大型铁矿4处(查岗诺尔、智博、敦德、备战)、中型铁矿7处(松湖、尼新塔格、阿克萨依、塔尔塔格、式可布台、阔拉萨依),中型锰矿2处(昭苏、莫托萨拉),大-中型铅锌矿2处(哈尔达坂、托克赛)。在西天山金、铁、锰、铜、铅锌矿是优势矿种。

西天山的矿床类型主要包括火山岩型、沉积型、浅成低温热液型、矽卡岩型、岩浆岩型等(表1)。金矿类型主要有斑岩型和浅成低温热液型,铜矿类型主要为火山岩型、矽卡岩型和斑岩型,铅锌矿类型主要为热水沉积(SEDEX)型和热液型,铁矿主要为海相火山岩型、海相火山-沉积岩型,锰矿主要为海相沉积型,钼矿主要为斑岩型和矽卡岩型,铜镍矿为岩浆熔离型。还有几个多金属矿床(如嘛喇苏、莱历斯高尓等)具有斑

表 1 西天山成矿带主要矿床类型简表
Table 1 Types of main deposits in the western Tianshan metallogenic belt

含矿建造	成矿机制	主要矿种	矿床类型	代表矿床
镁铁质-超基性岩	熔离、分异结晶作用	铜、镍	岩浆型	箐布拉克
矽卡岩	接触交代作用	铁、铜	矽卡岩型	哈勒尕提、可克萨拉、肯登高尓、阔库确科、喇嘛苏、
陆相火山-次火山岩	陆相火山热液作用	金	浅成低温热液型	阿希、京希-伊尔曼得、博古图
陆相次火山岩-斑岩	陆相次火山热液作用	铜、钼、金	斑岩型	莱历斯高尓、喇嘛苏、北达巴特、奥尔塔克、恰尔巴赫特、卡特巴阿苏
海相火山岩-次火山岩	海相火山-火山热液作用、岩浆贯入作用	铁、铜、锌	海相火山岩型	智博、松湖、备战、查岗诺尔、尼新塔格
火山沉积-沉积岩类	海相沉积作用	铁、锰	海相火山-沉积岩型	式可台布、莫托萨拉
海相细碎屑岩-碳酸盐岩	热水沉积(海底喷流)作用	铅、锌	热水沉积型	哈尔达坂、托克赛、四台海泉

岩-矽卡岩复合型矿床的特征。

2 主要成矿带地质特征

西天山主要成矿带包括哈尔达坂前寒武纪铅锌成矿带、博罗科努古生代金铜铅锌多金属成矿带、阿吾拉勒晚古生代铁锰多金属成矿带、那拉提古生代金铜多金属成矿带等。

2.1 哈尔达坂前寒武纪铅锌成矿带

2.1.1 矿带基本概况 哈尔达坂前寒武纪铅锌成矿带是新疆有色地质矿产勘查院 2010 年前后在西天山开展 1:5 万水系沉积物测量及异常查证时在前寒武纪地层中新发现的热水沉积型铅锌矿床, 经初步勘探目前已达大型规模(成勇等, 2012)。该矿带构造位置位于哈萨克斯坦-伊犁地块北缘, 容矿岩系由元古代变质沉积岩系构成。其中最老地层是元古界温泉群, 主要由角闪片岩、二云母片岩、斜长角闪岩、黑云母斜长片麻岩、云母石英片岩、眼球状片麻岩等组成。这套变质岩过去被认为形成于古元古代(成勇等, 2012, 2013)。最近, Liu *et al.* (2014) 和 Huang *et al.* (2016) 依据碎屑锆石研究, 认为伊犁地块温泉群变质碎屑沉积岩主要沉积于新元古代。长城系主要由变粒岩、石英岩夹变质砂岩、板岩和千枚岩夹基性火山岩组成; 蓼县系为一套含镁质较高的碳酸盐岩夹中基性火山岩; 青白口系和震旦系具稳定型沉积特征, 前者为浅海相镁、硅质碳酸盐岩夹碎屑岩建造, 后者不整合于其上, 为冰碛成因的碎屑岩(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993)。该成矿带主要包括哈萨克斯坦一侧的捷克利(Tekeli)超大型铅锌矿床和亚布洛诺沃耶(Yablonovoye)中型铅锌矿床、中国境内的哈尔达坂大型铅锌矿、科

克赛和四台海泉中型铅锌矿(图 2)。

2.1.2 典型矿床 该成矿带代表性矿床有我国境内的托克赛、哈尔达坂和哈萨克斯坦的捷克利铅锌矿。

(1) 托克赛铅锌矿床位于新疆温泉县西近国界处, 矿区出露地层为元古界温泉群中等变质的浅海陆棚相-深海相碳酸盐岩夹碎屑岩建造(成勇等, 2013; 薛春纪等, 2014a)。主要岩性有透闪石石英岩、大理岩、二云石英片岩和片岩等, 铅锌矿化主要赋存于中部的薄层状大理岩中。矿区地层呈单斜产出, 总体走向近 EW 向, 倾向南, 倾角 55°~67°。矿区可见华力西中晚期细粒石英闪长岩和花岗闪长岩脉, 脉体长一般几十至百余米, 宽一般几十厘米至数米, 顺层或斜切地层产出, 在矿化体上下盘或矿化体内常可见到此类岩脉, 岩脉中未见铅锌矿化。区内发现 2 个含矿层, I 号含矿层出露长度大于 3.4 km, 宽 20~40 m, 最宽处可达 140 m; II 号含矿层宽 20~50 m, 断续出露长约 1.4 km。含矿层为薄层状大理岩或大理岩化灰岩, 走向近东西, 倾向南, 倾角 60°~70°。含矿层延伸稳定, 但其中的铅锌矿化不均匀, 可见星点状或稠密浸染状分布的闪锌矿及少量呈条纹或条带状的方铅矿, 闪锌矿和方铅矿条纹或条带密集分布区构成铅锌矿体。条纹或条带一般宽 0.3~0.5 cm, 局部宽可达 1~3 cm, 条纹或条带平直, 延伸较稳定。矿区内圈出 11 个铅锌矿体, 其中主矿体 I-6 呈层状、似层状产出, 长 1 680 余米, 宽 7.08~15.74 m, 最宽处可达 25.61 m, 铅+锌平均含量 1.28%。矿石呈粒状变晶结构、半自形-他形粒状结构, 条纹或条带状、细脉浸染状、块状构造等。矿石中主要金属矿物有闪锌矿和方铅矿, 含少量黄铁矿、磁黄铁矿和黄铜矿, 脉石矿物主要为方解石, 含

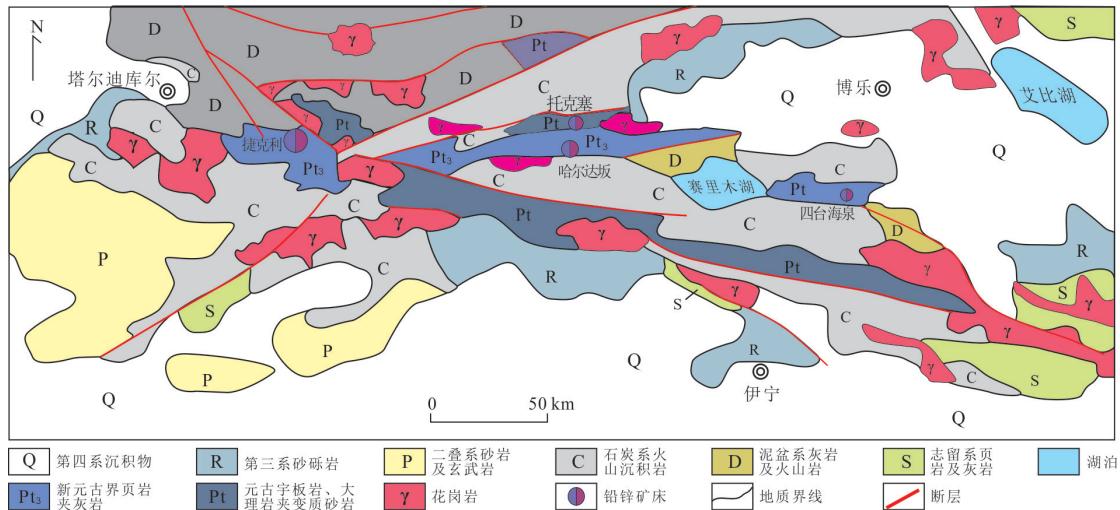


图2 哈尔达坂铅锌矿与捷克利大型铅锌矿对比示意

Fig.2 Comparison diagram between Hardaban and Jiekeli Pb-Zn deposit

表2 哈尔达坂与捷克利大型铅锌矿对比

Table 2 Comparison table between Hardaban and Tekeli Pb-Zn deposit

矿床	矿种 (品位/储量)	成矿 背景	赋矿 地层	主要金 属矿物	成因 类型	成矿 时代	备注
捷克利铅锌矿 (哈萨克斯坦)	Pb+Zn (6.99%/7 Mt)	哈萨克斯坦-伊犁板 块北部被动陆 缘裂陷盆地	新元古界细碎 屑岩-碳酸盐岩	闪锌矿、方铅矿、 黄铁矿	SEDEX 型	新元 古代	薛春纪 (2014a)
哈尔达坂铅锌矿 (中国)	Pb+Zn (9.84%/0.61 Mt)	哈萨克斯坦-伊犁板 块北部被动陆 缘裂陷盆地	新元古界细碎 屑岩-碳酸盐岩	闪锌矿、方铅矿、 黄铁矿	SEDEX 型	新元 古代	本研究

少量石英和白云石.初步地质勘查表明托克赛铅锌矿床具中等规模.

(2)哈尔达坂铅锌矿床位于新疆温泉县赛里木湖西北一带,矿区容矿围岩为一套元古代浅变质的沉积碎屑岩夹碳酸盐岩建造(新疆维吾尔自治区地质矿产局,1993),主要岩性为灰岩、含碳灰岩、白云质灰岩、大理岩化灰岩、大理岩、碳质板岩、变砂岩、变粉砂岩和硅质岩以及它们的韵律互层.矿区地层呈近东西走向、倾向为南、倾角70°~85°的单斜构造.矿区断裂不发育、多见海西中晚期闪长岩脉.目前矿区已圈出63条铅锌矿体(含20条盲矿体),单矿体长几十至几百米,最长可达800 m,厚几米至十余米,最厚处可达30余米,这些矿体均呈透镜状或似层状,近东西走向,与地层整合产出.铅锌矿体的直接容矿岩石包括含碳灰岩、白云质灰岩、细碎屑岩和碳质板岩等,空间上表现出与哈尔达坂群海相沉积岩有密切关系.矿体下盘发育硅化、绿泥石化等热液蚀变,而上盘不发育.原生矿石中金属矿物

主要为闪锌矿,少量方铅矿、磁黄铁矿和黄铁矿,非金属矿物包括石英、长石、方解石、绢云母等.矿石呈条带状、致密块状、浸染状、角砾状等构造和微晶-细晶、半自形-他形粒状等结构.矿石品位Zn+Pb为5%~25%,最高可达30%.段士刚(2011)、薛春纪等(2014a)认为该矿床与一般的热水沉积型铅锌矿床地质特征比较相似、围岩蚀变不对称发育,近矿围岩硅质岩为热水沉积成因,S和Pb稳定同位素组成指示成矿物质来自基底和元古宇盖层.

本课题组新近获得哈尔达坂铅锌矿赋矿围岩含碳细碎屑岩的Re-Os同位素年龄为574 Ma(未发表),与顾雪祥等(未发表)获得的围岩碎屑锆石U-Pb年龄基本一致,代表围岩及矿层的形成时代,即哈尔达坂赋矿地层及沉积成矿时代为新元古代.通过将哈尔达坂与哈萨克斯坦捷克利(Tekeli)铅锌矿床进行对比,发现二者地质背景、容矿岩性、沉积环境和形成时代等均具有相似性(表2),据此推测哈尔达坂铅锌矿的成矿条件十分有利.

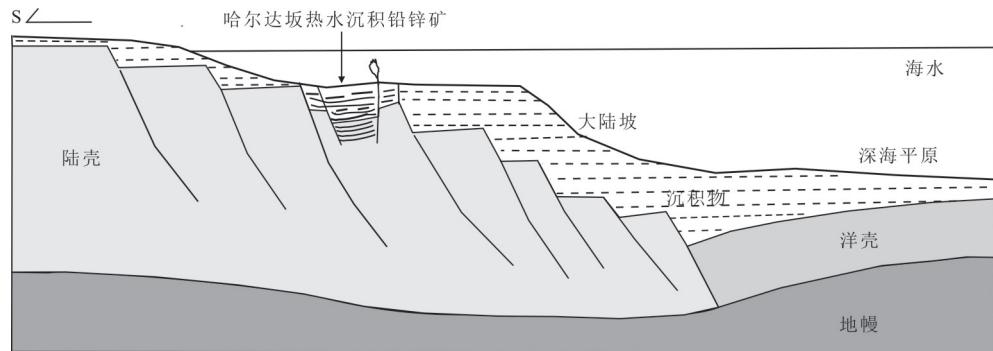


图3 哈尔达坂元古代铅锌矿构造背景与沉积环境

Fig.3 Tectonic setting and sedimentary environment of Hardaban Proterozoic Pb-Zn deposit

(3)捷克利(Tekeli)超大型铅锌矿床位于哈萨克斯坦-伊犁地块北缘,已探明铅锌金属储量 700×10^4 t。矿区大面积出露前寒武纪变质基底,其上覆地层有里霏系捷克利群海相碎屑岩-碳酸盐岩、泥盆系碳酸盐岩和中性火山岩、二叠纪基性火山岩建造。里霏系捷克利群下部主要为碳质页岩、硅质页岩、灰岩的水平互层,有机质含量较高(6%~15%),普遍发育浸染状黄铁矿和局部大量浸染状闪锌矿、方铅矿,是区域铅锌矿床(点)的主要赋矿层位。矿床由捷克利、捷克利西和亚布洛沃耶(Yablonovoye)等矿段组成,矿体多呈透镜状或似层状,EW向延伸,整合产于里霏系捷克利群底部黑色碳质页岩和硅质页岩中。矿体地表出露长度为几百米至几千米,厚度为2~60 m不等。矿石可分为铅锌硫化物矿石和黄铁矿矿石两类,前者主要呈层状、韵律层状和纹层状,而后者多呈致密块状。金属硫化物主要为黄铁矿、闪锌矿、方铅矿,其次为硫锑铅矿和车轮矿,含少量黄铜矿、黝铜矿、砷黄铁矿、磁黄铁矿和斜辉锑铅矿,多呈显微细晶结构。矿石平均品位较高,Pb平均品位为2.8%,Zn为4.19%,Ag为 42.6×10^{-6} ,伴有多元素,可供综合利用。综合考虑矿床铅锌成矿背景和纹层状矿化特征,薛春纪等(2014a)认为捷克利铅锌矿床属于典型的SEDEX型。

2.1.3 成矿模式 西天山地区,在元古代哈尔达坂岩群细碎屑岩-碳酸盐岩建造中,形成了以哈尔达坂、托克赛、四台海泉为代表的铅锌矿床,成矿构造背景为Rodinia超大陆裂解期间哈萨克斯坦-伊犁地块边缘裂陷盆地系统(图3),具体沉积环境为一套浅海陆棚-台地相碎屑岩-碳酸盐岩建造。区域沉积韵律、岩石组合与地球化学特征,反映其属于被动陆缘裂陷盆地中的沉积建造,在这种伸展背景下的

古陆边缘盆地裂陷过程导致了强烈的海底热液活动和热水沉积,为区域热水沉积型铅锌矿床的形成创造了有利的地质环境。同时哈尔达坂群沉积地层具有高Pb、Zn等成矿金属背景值,为铅锌成矿提供了重要的物质基础。

2.2 博罗科努古生代金铜铅锌多金属成矿带

2.2.1 矿带地质概况 博罗科努金铜铅锌多金属成矿带位于西天山造山带的中部,与博罗科努古生代岛弧带范围吻合,区域岩性主要为古生代火山-沉积岩和古生代侵入岩。该成矿带是西天山地区最重要的浅成低温热液型金矿床、斑岩型铜钼矿床、矽卡岩型铁铜钼铅锌矿床的产出地。

该成矿带金属矿床主要分布于两个地区或矿集区(顾雪祥等,2014a,2014b),其中博罗科努山北坡的莱历斯高尓矿集区发育与中酸性侵入岩有关的斑岩型钼铜矿床及热液脉型铅锌银矿床,以莱历斯高尓斑岩型钼铜矿床、哈勒尕提矽卡岩型铁铜矿床、七兴热液脉型铅锌银矿床为代表;南坡的阿希矿集区发育与中酸性火山岩-次火山岩有关的浅成低温热液型金矿、斑岩-热液型金、铅、锌、铜成矿系统,代表性矿床有阿希、京希-伊尔曼得、塔吾尔别克-阿庇因迪金矿床,塔北和吐拉苏铅锌矿床,以及克峡希铜(钼)矿床等(据安芳和朱永峰,2010;图4)。

近期该成矿带的斑岩铜矿勘探有重要进展,在伊宁县发现的恰尔巴赫特铜钼矿,是与中性浅成侵入岩有关的斑岩型铜钼金矿床,成矿作用发生在海西中期;矿化组合具渐变的分带现象,即地表浅部表现出热液脉型铜金矿化,向深部渐变为规模较大的细脉浸染型铜(金)矿化、往下铜矿化渐弱并趋于消失,钼矿化渐强,呈稀疏的细脉浸染状。因此,博罗科努地区是西天山最有希望找到大型斑岩型铜钼矿床的地区(顾雪祥等,2014a)。

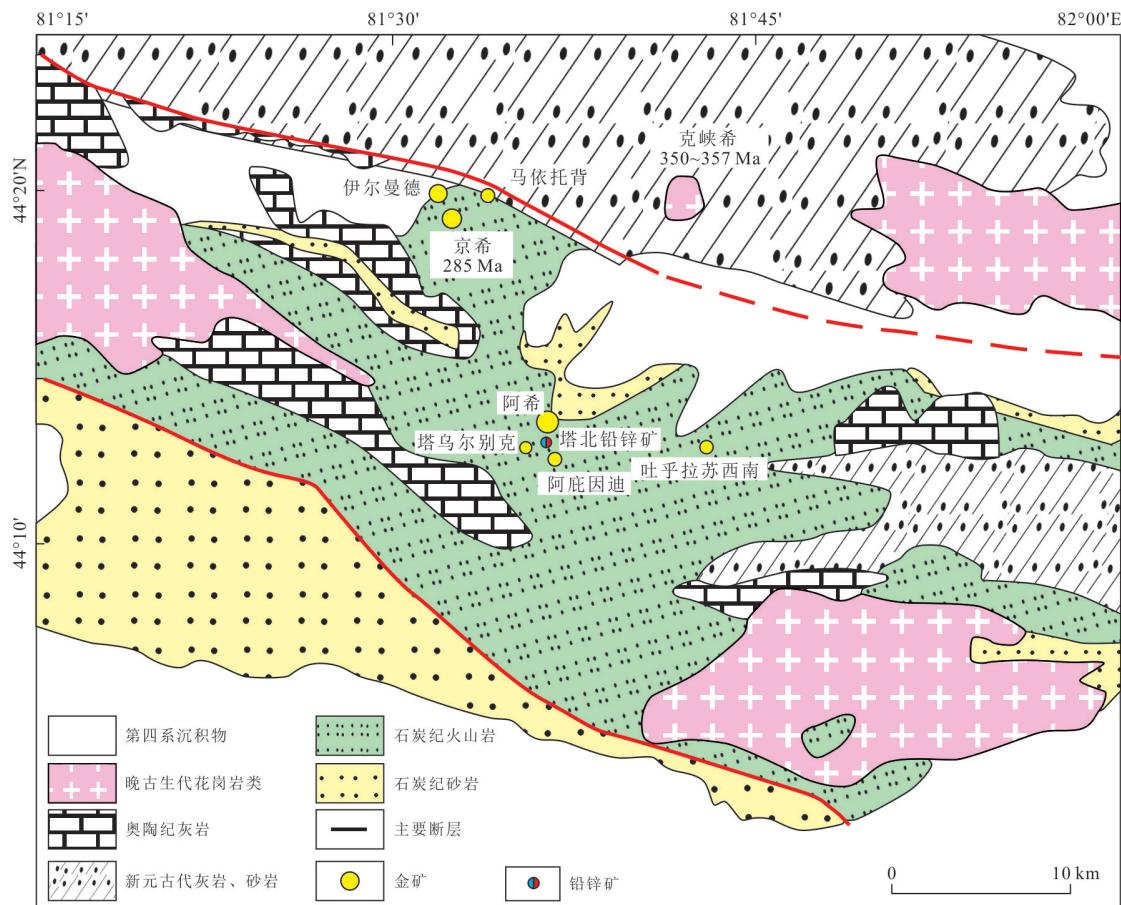


图4 阿希金矿集中区地质图(据安芳和朱永峰,2010)

Fig.4 Sketch map of geology and gold deposit of Tulasu basin (after An and Zhu, 2010)

2.2.2 典型矿床 该成矿带代表性矿床有莱尔斯高爾和3571斑岩型铜钼矿床、哈勒尕提和肯登高爾矽卡岩型铁铜钼矿床、阿希和伊尔曼得浅成低温热液金矿等。

(1) 莱尔斯高爾斑岩型铜钼矿床,位于精河县城东南约120 km的博罗霍洛山一带。出露地层主要为上志留统博罗霍洛山组一段和二段,少量上奥陶统呼独克达坂组。博罗霍洛山组是矿区主要赋矿和容矿地层,主要岩性为灰黑色泥岩夹粉砂岩,矿区地层构成一个总体倾向NNW的单斜构造;侵入岩发育,主要岩性为石英二长闪长岩、二长花岗斑岩、花岗闪长斑岩和斜长花岗斑岩。莱尔斯高爾地表共圈定以钼为主的工业矿体39个。钼矿体产于花岗闪长斑岩及外接触带角岩化粉砂岩中,地表矿体呈脉状,长22.0~194.5 m,厚1.55~60.00 m,Cu品位0.1%~0.2%,Mo品位0.062%~0.32%。矿床成因与岩浆活动有直接关系,矿化程度受中酸性侵入体及其派生的节理、裂隙控制,矿床类型属斑岩型铜钼矿。朱明田等(2010, 2011)

测得5件辉钼矿的Re-Os同位素等时线年龄为 (379.9 ± 8.3) Ma,与斑岩体锆石U-Pb年龄362.1~383.7 Ma在误差范围内基本一致。因此可认为莱尔斯高爾铜钼矿床的成岩、成矿时代为晚泥盆世。该年龄与处于同一构造背景的喇嘛苏花岗闪长斑岩体(366 Ma)和恰尔巴赫特闪长岩体(368 Ma)的年龄也基本一致(Zhu et al., 2012)。

(2) 哈勒尕提铁铜多金属矿床是博罗科努多金属成矿带上的一个典型矽卡岩矿床。顾雪祥等(2014b)通过对与成矿相关的二长花岗岩和花岗闪长岩中锆石U-Pb同位素的测定,获得其加权平均年龄分别为 (376.4 ± 3.2) Ma和 (365.6 ± 3.5) Ma,表明其侵入时代为晚泥盆世。矽卡岩矿石中辉钼矿Re-Os等时线年龄为 (368.9 ± 3.1) Ma,与成岩时代在误差范围内一致。可见,哈勒尕提矿床与同一成矿带上的可克萨拉铁铜矿床、莱尔斯高爾和3571铜钼矿床等一起,构成了一个与晚泥盆世-早石炭世中酸性侵入岩有关的矽卡岩-斑岩型铁铜钼多金属成矿系统。

(3) 阿希金矿是 20 世纪 80 年代末前人在新疆西天山发现的一个大型低硫型浅成低温热液(冰长石-绢云母型)金矿床,也是目前国内同类型矿床中储量最大且最为典型的金矿(翟伟等,2010).该金矿位于吐拉苏盆地西段的火山-沉积岩中,火山岩剖面顶部的安山质岩石是主要的赋矿围岩.矿区发育与火山活动密切相关的爆发相、溢流相、火山通道相和次火山岩相岩石构成的一个古火山机构.火山机构中的放射状和环状断裂控制着矿体的分布,其中弧形断裂是主要的控矿断裂,控制着阿希金矿绝大多数矿体.阿希金矿体呈脉状沿走向延伸达上千米,厚度在数米到数十米不等,沿倾向延伸至地下 300~400 m,向深部逐渐变薄并出现分叉尖灭.矿体以石英脉型为主,少量蚀变岩型.矿石金品位为 3~8 g/t,常发育微晶结构、包含结构、交代结构,角砾状构造、细脉浸染状构造和梳状构造等.近矿围岩蚀变包括硅化、绢云母化、绿泥石化、黄铁矿化和碳酸盐化,其中硅化和黄铁矿化与金矿化关系密切(安芳和朱永峰,2010).

(4) 京希-伊尔曼得金矿,是阿希之后在其外围同一地层中发现的浅成低温热液金矿床.矿区特征和阿希金矿类似,主要岩性为大哈拉军山组安山质火山岩、熔岩、粉砂岩和砾岩,以及奥陶纪的灰岩.矿化通常发育在大哈拉军山组火山岩底部与灰岩接触的部位,矿体呈层状和透镜状.京希-伊尔曼得矿区蚀变矿化基本相似,都发育有孔状石英、硅质交代、泥化、碳酸盐化等.孔状石英是经过蚀变的围岩,残留有大量孔洞,也是京希-伊尔曼得最显著的特征.在孔状石英形成之后,后续的热液流体经过孔洞时,会沉淀出次生石英并伴有金矿化,会形成致密块状的硅质矿石.

人们对于阿希金矿的成矿时代和矿床类型等方面还存在不同的认识,早期多认为阿希金矿形成于晚泥盆世-早石炭世(安芳和朱永峰,2010;翟伟等,2010),属低硫型浅成低温热液矿床.但近期董磊磊(2018)提出与前人不尽相同的认识,认为阿希、京希-伊尔曼得两个金矿分别属于中硫型、高硫型浅成低温热液矿床;同时利用原位分析技术分析了流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 和黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值,结果表明阿希金矿成矿流体具有岩浆来源的属性.使用同样的方法,揭示出京希-伊尔曼得金矿流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值落在岩浆水的氧同位素区间,矿床普遍发育孔状石英,代表流体的强酸性.这一系列特征说明京希-伊尔曼得

金矿为高硫型浅成低温热液矿床.在硅化强的矿石中存在锆石包裹体,锆石高 Th/U 比值指示其可能是岩浆来源,锆石的 SIMS 年龄为 $\sim 297\text{ Ma}$,这限定了金矿成矿时代的上限.结合京希矿体南部流纹岩的 SIMS 锆石 U-Pb 年龄,再考虑到京希-伊尔曼得、阿希金矿两者的成矿时代和流体属性,董磊磊(2018)建立了早二叠世岩浆活动和两个矿床的成因联系.这与 An and Zhu (2018) 报道的阿希含金黄铁矿 Re-Os 年龄 ($299 \pm 35\text{ Ma}$) 基本一致,进一步表明阿希金矿成矿时代为早二叠世,形成于后碰撞伸展环境.

2.2.3 成矿模式

奥陶纪-晚石炭世,北天山洋经历了南向俯冲消减和洋盆收缩过程.博罗科努山地区中奥陶世奈楞格勒达坂组火山岩发育,火山喷发以玄武岩为主;晚奥陶世温泉岩体的侵入活动表明北天山洋盆已经开始向南部的伊犁板块之下俯冲消减,形成博罗科努大陆弧;而大规模持续的洋-陆俯冲事件发生在泥盆纪-石炭纪(图 5a),引发了一系列钙碱性岩浆侵入及火山喷发活动,形成了喇嘛苏、莱历斯高岩体及大哈拉军山组火山岩(王新利等,2013;顾雪祥等,2016),以及与侵入岩浆活动有关的矽卡岩-斑岩-热液脉型铁、铜、钼、金、铅、锌成矿系统;该大陆弧的南侧在石炭纪末-早二叠世进入后造山伸展环境,形成了吐拉苏上叠火山断陷盆地,以及与次火山热液活动有关的浅成低温热液-斑岩型金、铅、铜成矿系统(图 5b).

2.3 阿吾拉勒晚古生代铁多金属成矿带

2.3.1 矿带基本特征

阿吾拉勒铁多金属成矿带位于古生代伊犁地块东北缘活动带内(图 6).区域地层有元古界、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系和侏罗系,但以石炭系和二叠系为主.阿吾拉勒铁多金属矿赋矿地层为下石炭统大哈拉军山组基性-酸性火山岩和上石炭统伊什基里克组火山沉积岩.石炭纪次火山岩体一般沿大哈拉军山组与伊什基里克组接触部位侵入,呈东西向带状展布,岩性为中性和碱性的过渡类型.区域断裂构造发育,主要有位于北缘的依连哈比尔尕断裂(中天山北缘断裂)、南缘的尼古拉耶夫线-那拉提北坡断裂和长阿吾子-乌瓦门断裂(中天山南缘断裂).区域内岩浆侵入活动强烈且分布范围广泛,侵入活动自志留纪开始,于泥盆纪变强,在石炭纪达到顶峰,至二叠纪结束,侵入岩主要为花岗岩类,多呈带状东西向展布的岩基、岩株及岩脉等(张作衡等,2012).

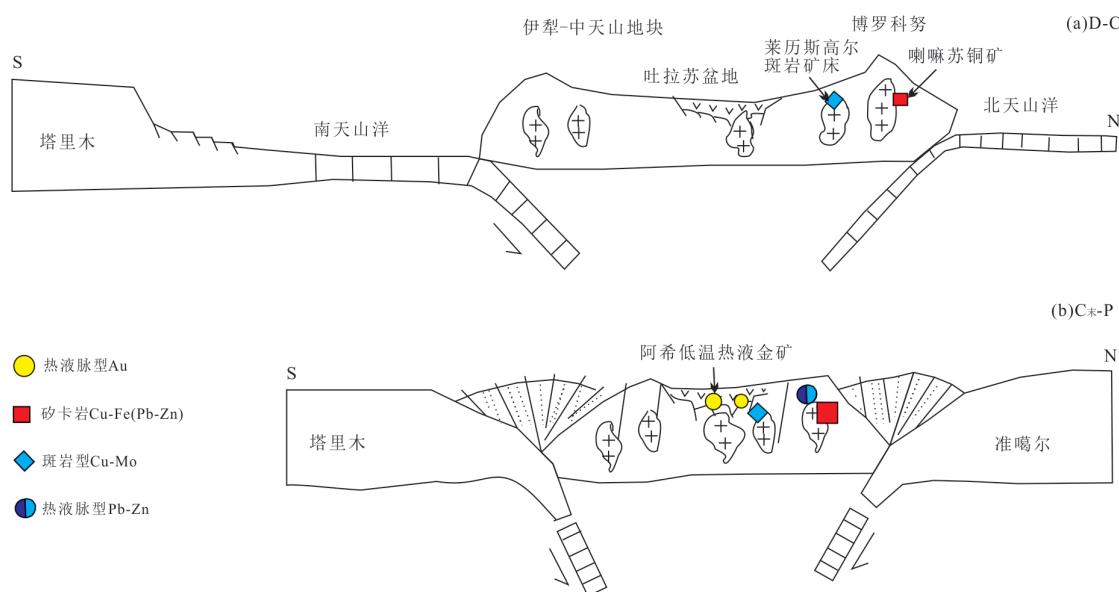


图5 博罗科努岛弧与阿希矿集区构造演化与成矿系统示意(顾雪祥等,2014a修改)

Fig.5 Sketch map showing tectonic evolution and mineralization system in the Tulasu basin (after Gu et al., 2014a)

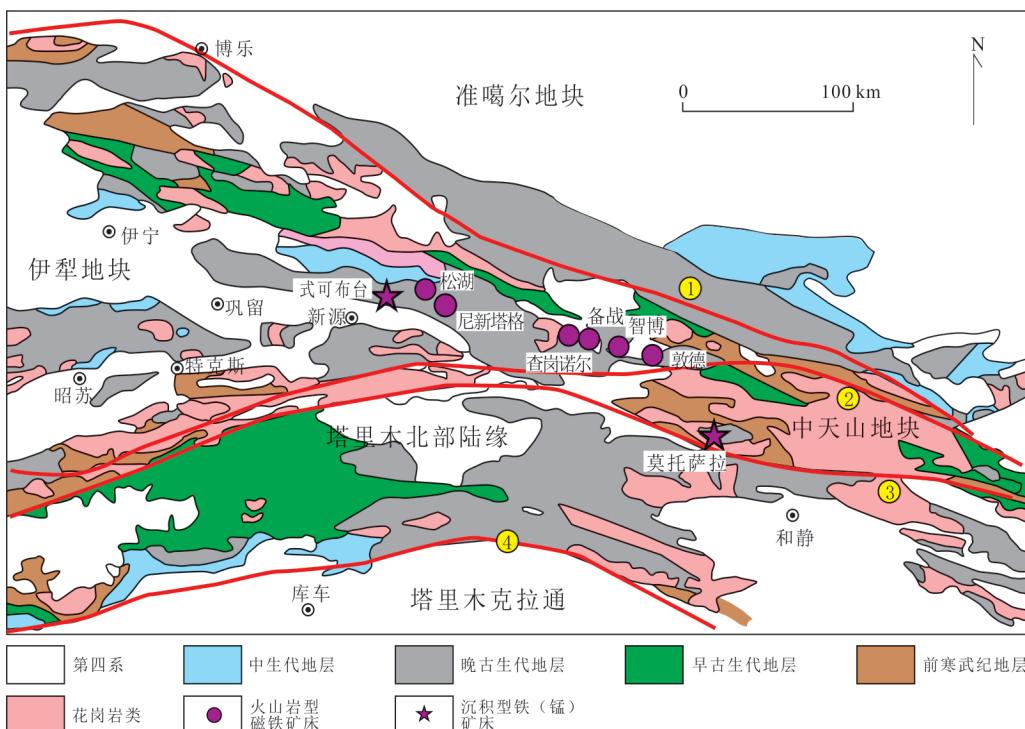


图6 阿吾拉勒铁多金属成矿带地质简图

Fig.6 Geological sketch of iron polymetallic metallogenic belt in Awulale area

阿吾拉勒铁多金属成矿带是近年来西天山地区发现的最重要的矿产集中地。带内以铁为主,伴生锰、铜、锌、金等矿产(李凤鸣等,2011),这些铁多金属矿床形成了一条长约250 km、宽约20 m,沿着阿吾拉勒山主脊断裂带延展的大型成矿带。

2.3.2 典型矿床 区内铁多金属矿床类型主要有

海相火山岩型、火山热液型、矽卡岩型和海相沉积型,以海相火山岩型和沉积型最重要。

海相火山岩型铁矿赋矿地层为下石炭统大哈拉军山组,典型矿床为智博铁矿(大型)、查岗诺尔铁矿(大型)、敦德铁矿(大型)、备战铁矿(大型)。初步研究表明这些大型铁矿床均受火山机构控制(董

连慧等, 2011; 李凤鸣等, 2011; 张作衡, 2012). 主要赋矿围岩为中基性火山岩-火山碎屑岩建造, 赋矿岩石为玄武岩和安山质凝灰岩, 矿体多呈似层状和透镜状. 金属矿物以磁铁矿为主, 其次有黄铁矿、磁赤铁矿和黄铜矿等. 矿石呈他形-半自形微粒结构及自形-半自形粒状结构, 矿石构造有块状、浸染状和角砾状等. 这些铁矿均具有岩浆矿床、火山热液型矿床及矽卡岩型矿床的一些特征.

智博铁矿床矿化带东西长 4.5 km, 分为东、中、西和 Fe 13 四个含矿段, 共圈定 24 条磁铁矿体. 矿体的形态呈层状、似层状和透镜状, 从形态变化和产状来看, 矿体与围岩地层呈不整合的侵入关系. 主矿体东西长 800 m, 南北宽 600 m, 倾向南西, 铁品位 35%~60%, 平均品位 38%. 矿体产于石炭系大哈拉军山组第二亚组的安山岩、蚀变安山岩、粗面安山岩和玄武安山岩中, 顶底板多为蚀变安山岩, 同时发育钾化、绿帘石化和阳起石化等, 与矿体呈渐变的接触关系. 金属矿物主要为磁铁矿, 次为赤铁矿和黄铁矿, 偶见黄铜矿; 非金属矿物有辉石、角闪石、斜长石和绿帘石等. 矿石呈浸染状、致密块状、条带状、角砾状和斑杂状等构造; 矿石结构以中-粗粒、半自形-自形板状和他形粒状等为主. 王志华等 (2012) 据矿物共生组合和矿石结构特征, 将矿床划分为岩浆期和热液期; 冯金星等 (2010) 认为智博铁矿床是岩浆型和热液型的复合矿床; 蒋宗胜等 (2012) 获得矿区大哈拉军山组英安岩和闪长岩锆石 U-Pb 年龄分别为 305 Ma 和 300 Ma, 指示该地区的构造格架从晚石炭世开始, 由汇聚转向后碰撞伸展, 是铁成矿的有利构造环境. 蒋宗胜等 (2012)、王志华等 (2012) 认为智博铁矿与火山活动有密切的成因联系, 由晚石炭世大陆岛弧岩浆活动分异的富铁岩浆流体形成, 铁矿化与火山活动的岩浆-热液交代作用有关. 申萍等 (2020) 将阿吾拉勒成矿带海相火山岩型铁矿床进一步划分为两个亚类, 即火山通道型铁多金属矿床 (敦德) 和火山边缘型铁矿床 (查岗诺尔、智博、备战), 并建立了火山通道相热液富集铁多金属成矿模式和火山边缘相沉积-热液富集铁成矿模式.

海相沉积岩型铁锰矿赋矿地层为下石炭统阿克沙克组和上石炭统伊什基里克组沉积岩, 典型矿床有莫托萨拉铁锰矿、式可布台铁矿和昭苏锰矿等.

其中, 莫托萨拉铁锰矿床位于西天山阿吾拉勒成矿带东端, 下石炭统阿克沙克组为赋矿地层, 主

要岩性包括底部火山角砾岩和凝灰岩, 中部砂岩、粉砂岩、铁矿层、铁碧玉及硅质岩及锰矿层, 上部细晶灰岩和砾状灰岩等. 莫托萨拉铁锰矿床的铁矿层在下, 锰矿层在上, 两者中间为厚 2~62 m 的含铁、锰条带粉砂岩, 矿层与围岩整合产出. 铁矿层主体呈一巨厚的单层近东西向展布, 东西长约 1.6 km, 南北宽 300~500 m, 矿体中间厚, 边部薄, 呈透镜体. 铁矿层的主要夹层为硅质岩, 其次为铁质粉砂岩和铁碧玉. 锰矿层可细分为下、中、上 3 层锰矿, 下层矿较稳定, 呈层状, 东西长约 1 km, 南北宽约 400 m, 最厚约 11 m, 平均厚度为 4.7 m; 中层矿呈似层状, 不稳定, 分布范围小于下层矿, 厚度变化大, 最厚约 18 m, 平均厚度为 4.9 m, 中下两层矿相距 1~12 m; 最上层矿不稳定, 断续呈透镜体产出, 厚度很薄, 多在 0.2~2.0 m 之间, 与中层矿相距约 20 m. 莫托萨拉的铁矿石铁品位在 45%~54% 之间, 平均为 47.21%; 矿石构造类型主要为致密块状和条带状, 常见显微鳞片结构、鲕状结构和半自形粒状结构; 主要金属矿物为赤铁矿, 次为磁铁矿、镜铁矿以及少量黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等; 非金属矿物主要为碧玉, 次为重晶石、石英以及少量的绿泥石、阳起石等. 锰矿石锰品位在 9.59%~29.07% 之间, 平均为 18.77%; 矿石构造类型主要为致密块状和条带状, 常见显微球粒结构和自形-半自形粒状结构. 锰矿石矿物组合可分为两种类型: 一种以菱锰矿为主, 次为赤铁矿、石英、水铁矿、方解石、玉髓等; 另一种以锰硅酸盐为主, 次为重晶石、石英、蒙脱石、云母和黑锰矿等. 该矿床在成因方面存在热水沉积、沉积-热液改造和胶体化学沉积等争论. 董志国等 (2021) 在莫托萨拉矿区发现了热液长石岩, 其主要由钠长石、钾长石以及少量重晶石、霓石、锌铁黄长石等矿物组成, 发育隐晶-微晶结构, 与“白烟型”海相热水沉积岩特征相似. 莫托萨拉锰矿层的主微量元素和稀土元素具有海底热液成因的特征, 典型的热水内碎屑结构指示锰矿层沉积于海底热液喷流口附近. 而铁锰共存但独立成矿是莫托萨拉铁锰矿床的一大特色, 笔者推测其铁锰分离过程不仅与古地理环境和氧化还原条件变化有关, 还可能受控于微生物的选择性氧化沉淀作用.

其中式可布台铁矿赋矿建造为海相火山喷发-沉积建造, 赋矿岩石为绿泥绢云千枚岩、绢云千枚岩, 矿体多呈层状、似层状、透镜状, 矿层严格受层位控制. 式可布台铁矿区域面积约 11 km², 矿区矿

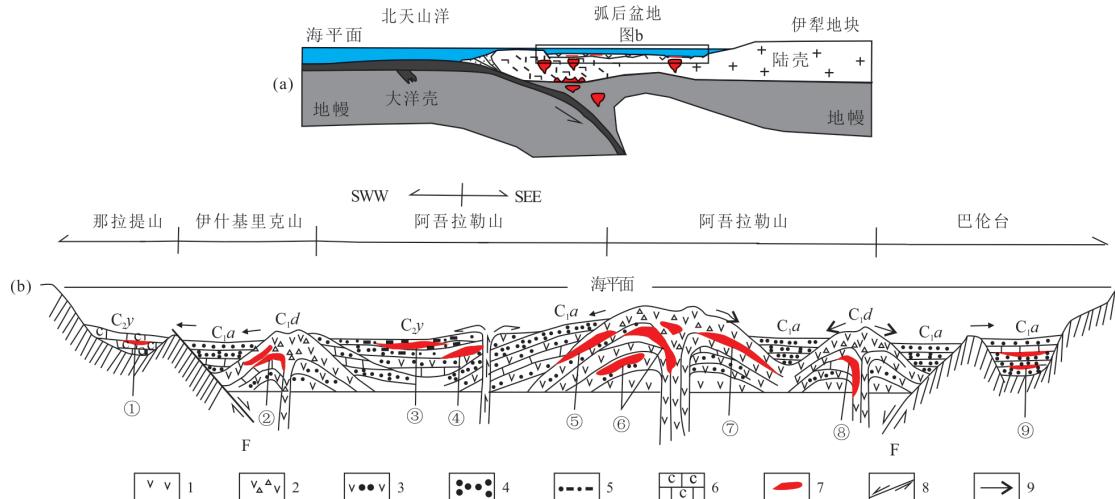


图7 西天山阿吾拉勒铁石炭纪多金属成矿带构造动力学背景及成矿模式

Fig.7 Tectonic dynamic setting and ore-forming model of Awulale iron polymetallic metallogenic belt in the western Tianshan
 a. 成矿带构造背景; b. 成矿带成矿系列,据李凤鸣等(2011)修改; 1. 火山熔岩; 2. 含火山角砾熔岩、火山角砾岩; 3. 凝灰岩; 4. 凝灰质砂岩; 5. 砂岩; 6. 灰岩; 7. 铁锰矿体; 8. 断裂; 9. 火山物质运移方向. 地层代号:C₂y.上石炭统伊什基里克组; C₁a.下石炭统艾肯达坂组; C₁d.下石炭统大哈拉军山组. 代表矿区:①昭苏锰矿;②阔拉萨依铁矿;③式可布台铁矿;④松湖铁矿;⑤查岗诺尔铁矿;⑥智博铁矿;⑦备战铁矿;⑧敦德铁矿;⑨莫托萨拉铁锰矿

带东西方向长4.6 km,南北方向宽1.3 km,主要由3个主要矿段所组成,分别为位于中部的主矿段、位于西侧的西矿段及东侧的东矿段.主矿段矿体范围最大,近E-W向延展,长约1.3 km,南北向宽约100~120 m,共计14层铁矿体,其中3层较厚,长度一般400~600 m.单个矿体厚约2~6 m,矿层累计最厚约41 m,长约100~400 m,最长约900 m.该矿段多为含铁碧玉及重晶石夹层的似层状、层状及透镜状矿体,在绢云母千枚岩中顺层发育.矿石矿物以赤铁矿为主含少量菱铁矿,脉石矿物主要为铁碧玉和石英,含少量绢云母、重晶石.矿石呈自形-半自形粒状、细晶质结构,致密块状和条带状构造.张新等(2020)通过对矿石中赤铁矿和菱铁矿电子探针分析、矿石主量元素和微量元素测试,结合地质调查及显微镜观察,发现式可布台铁矿床中赤铁矿为氧化-低氧过渡环境海水条件下的化学沉积成因,其物质来源主要与海底热水喷流沉积作用有关,菱铁矿为在有机质参与下成岩、由赤铁矿转换形成.

2.3.3 成矿模式 阿吾拉勒铁多金属成矿带形成于晚古生代北天山洋南向俯冲过程形成的岛弧和弧后盆地环境(李凤鸣等,2011;张作衡,2012;董志国等,2021;图7a).依据西天山阿吾拉勒铁矿及周围铁锰矿的研究,表明火山机构的不同部位控制不同类型的矿床(图7b):赋存在火山通道

相的有敦德和阔拉萨依铁矿、在火山口附近形成与火山-次火山热液活动有关的包括查岗诺尔铁矿和智博铁矿、受火山环状和放射状断裂控制的是松湖铁矿,在远离火山口主要受沉积细碎屑岩控制的矿床有式可布台铁矿和莫托萨拉铁锰矿,更远处则为化学沉积型昭苏锰矿.后面几类沉积矿床同时受海底热液和有机质参与成矿作用的影响(董志国等,2021).

2.4 那拉提晚古生代金铜多金属成矿带

2.4.1 矿带基本概况 那拉提晚古生代金铜多金属成矿带位于西天山造山带的南部,为中亚“金腰带”在中国境内的延伸(薛春纪等,2014b).该成矿带构造上属伊犁地块南缘的增生杂岩带.那拉提南、北缘断裂是成矿带的主要构造,其次级平行断裂纵贯整个成矿带,带内岩浆岩发育.

矿带已知矿化以金、铜、镍为主,近年来的地质找矿工作取得重要突破.在石炭纪花岗岩破碎蚀变岩带中发现了卡特巴阿苏特大型金矿床,同时在距卡特巴阿苏南西西约70 km处找到一处中型泥牙子铁克协金矿、距卡特巴阿苏东部约200 km处找到阿腊斯托金矿.

目前矿带内已发现有金、银、铜、镍、铂族金属、铁等矿种,但以金、铜、镍为主,矿带内各类矿产地计31处,其中特大型矿床1处、大型矿床1处、中型矿床7处、小型矿床22处(图8).

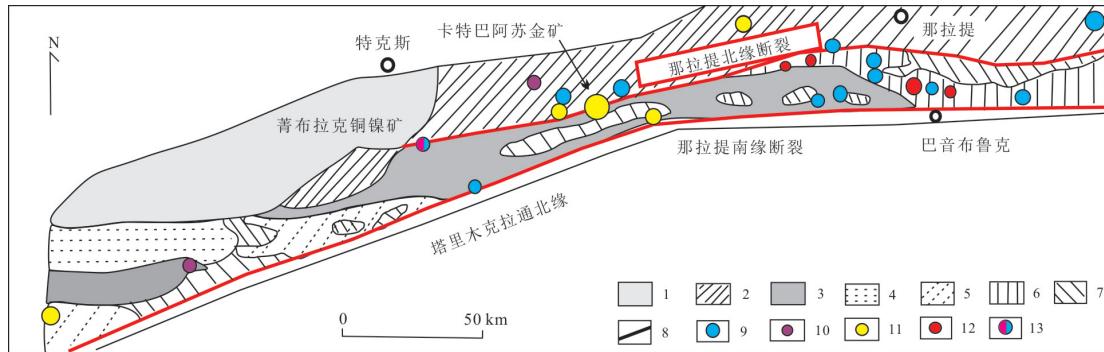


图 8 那拉提成矿带构造分区、矿床分布略图

Fig.8 Skech map showing the tectonic division and distribution of mineral deposits in the Nalati mineralization belt

图据王海涛等(2007);1.新生代凹陷盆地;2.石炭纪火山岛弧;3.晚古生代岩浆弧;4.石炭纪沉积盆地;5.早古生代岩浆弧;6.志留纪火山岛弧;7.前寒武纪结晶基底;8.断裂;9.铜矿;10.钨矿;11.金矿;12.铁矿;13.铜镍矿

2.4.2 典型矿床 那拉提成矿带包括斑岩型(或造山带型)金矿、矽卡岩型铁铜多金属矿、破碎蚀变岩型金铜矿及铜镍硫化物矿床等。

卡特巴阿苏金铜矿位于伊犁-中天山地块南缘活动陆缘,距新源县南直线距离大约30 km。该矿于2008年由新疆地矿局第一地质大队发现,目前探明储量约76 t,平均品位3.84 g/t(杨维忠等,2013)。矿体呈厚板状和透镜状,南倾,倾角20°~70°不等。矿体厚度从几米到几十米,走向上延伸将近2 km。矿体产在两个矿化蚀变带内,包括有金、铜及金铜3种不同工业矿体。矿体与围岩之间呈渐变过渡关系,表现为断裂破碎带内的二长花岗岩、少部分为花岗闪长岩及闪长玢岩发生热液蚀变所形成的含金铜地质体。矿体受矿区断裂构造控制,产状与断裂构造基本一致。矿体部分出露地表,铜矿体或金铜矿体多为隐伏矿体。

卡特巴阿苏金矿为近年来发现的大型金矿,是我国境内南天山找矿的一大突破。然而对于这一新发现的矿床,研究工作还处于初级阶段,研究者对其矿床类型和成矿时代存在颇多争议。薛春纪等(2014b)认为卡特巴阿苏是造山型金矿,与境外南天山穆龙套等相似;而杨维忠等(2013)则认为其是岩浆期后热液改造型金矿。Liu et al. (2017)认为卡特巴阿苏金矿与岩浆活动有关。赵树铭等(2012)则根据花岗岩和花岗闪长岩的性质,推测卡特巴阿苏是斑岩型铜金矿床。总体看卡特巴阿苏金矿的成矿时代、流体性质和成因类型有待深入研究。

董磊磊(2018)通过对卡特巴阿苏金矿地表、深部蚀变填图,获得了较全面的围岩蚀变和矿化空间展布情况,发现卡特巴阿苏金矿发育有钾长

石化、绢英岩化和绿泥绿帘石化;矿化呈浸染状、细脉状,并且矿化和钾长石化、绢英岩化密切相关,这种蚀变矿化样式与斑岩型相似,以此判断卡特巴阿苏金矿与斑岩型矿床类似,应为岩浆热液型矿床;流体的氧同位素组成也说明热液主要来源于岩浆热液;利用黄铁矿单颗粒进行 TIMS Rb-Sr 等时线定年,得到 322.5 ± 6.8 Ma 成矿年龄;依据 S 同位素组成,认为卡特巴阿苏金矿中的 S 来源于晚石炭世与俯冲有关的古老板片。

与基性-超基性岩有关的铜镍硫化物矿床的代表为费布拉克矿床。含矿超镁铁杂岩体沿那拉提南缘深断裂北侧的次级断裂侵位于下元古界那拉提岩群变质岩中。研究表明含铜镍岩体为同源深源岩浆多次分异、多期侵入形成;岩体在深部分异较强,岩相分带明显,呈环带构造;矿体产于橄榄岩相带和辉石岩相带中,矿床成因类型属岩浆熔离型;那拉提南缘深断裂属岩石圈断裂,控制着一系列超基性杂岩体的空间分布。倪守斌等(1994)通过 Sm-Nd 等时线测定该岩体的年龄为 320 Ma,并认为该矿形成于造山晚期的伸展环境。

2.4.3 成矿模式 基于卡特巴阿苏斑岩型金矿的成矿时代(~ 323 Ma; Dong et al., 2018b)及卡特巴阿苏矿区东南 ~ 332 Ma 蛇绿岩的发现等证据,笔者推测晚石炭世伊犁-中天山地块南缘的构造环境还是一个由南天山洋北向俯冲形成的陆缘弧(Gao et al., 1998; Xiao et al., 2013)。因此推断,卡特巴阿苏金矿赋矿岩体二长花岗岩、花岗岩和花岗闪长岩形成于与洋壳俯冲有关的岛弧环境(图9)。实际上早期形成的粗粒花岗闪长岩-二长花岗岩复式岩体富含较多金属硫化物,初步富集了成矿有用元素,

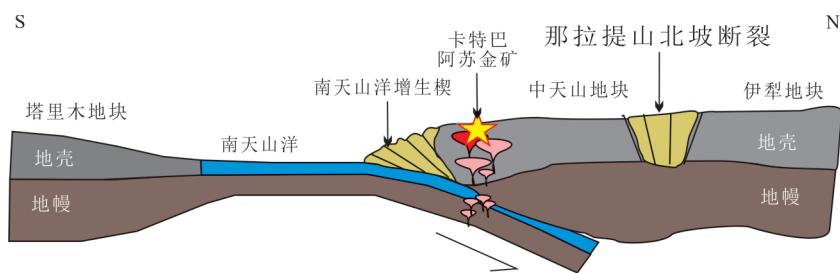


图9 那拉提成矿带石炭纪成矿动力学模式

Fig.9 Tectonic dynamic model of the Nalati mineralization belt

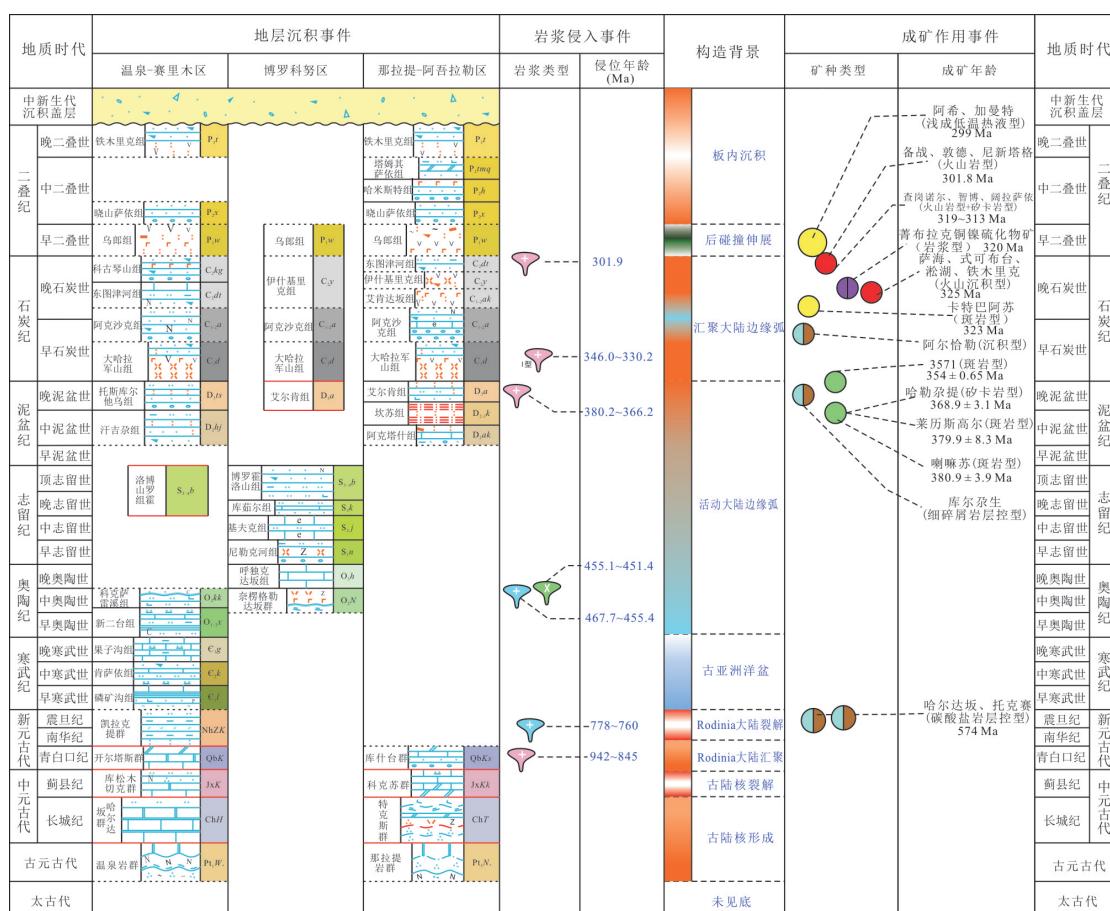


图 10 西天山地区沉积建造-构造-岩浆活动及其成矿序列

Fig.10 Sedimentary formation-tectonic-magmatic activity and metallogenetic sequence in the West Tianshan

伴随岩体侵位后的区域断裂活动，在岩体内形成具一定规模的断裂破碎带，该构造带不仅为成矿热液活动提供了矿液运移通道，还提供了储矿空间。进一步研究表明，卡特巴阿苏金矿与东天山的土屋-延东斑岩铜矿($\sim 340\sim 320$ Ma；张连昌等，2004，2006，2021)，以及西部境外的Almalyk 斑岩铜金矿(~ 315 Ma；Seltmann *et al.*，2014)的形成环境与成矿时代均具有相似性。

3 西天山区域构造演化与成矿规律

3.1 区域沉积建造-构造-岩浆活动及其成矿序列

西天山造山带区域沉积-构造及岩浆活动具有时代古老、构造及岩浆活动强烈，成矿多期多阶段发育等特点(图 10)。

西天山伊犁地块的南北缘,因 Rodinia 超大陆裂解作用形成中新元古代裂陷盆地,在北部温泉-赛里木地区接受哈爾达坂群和温泉沟群海相沉积岩

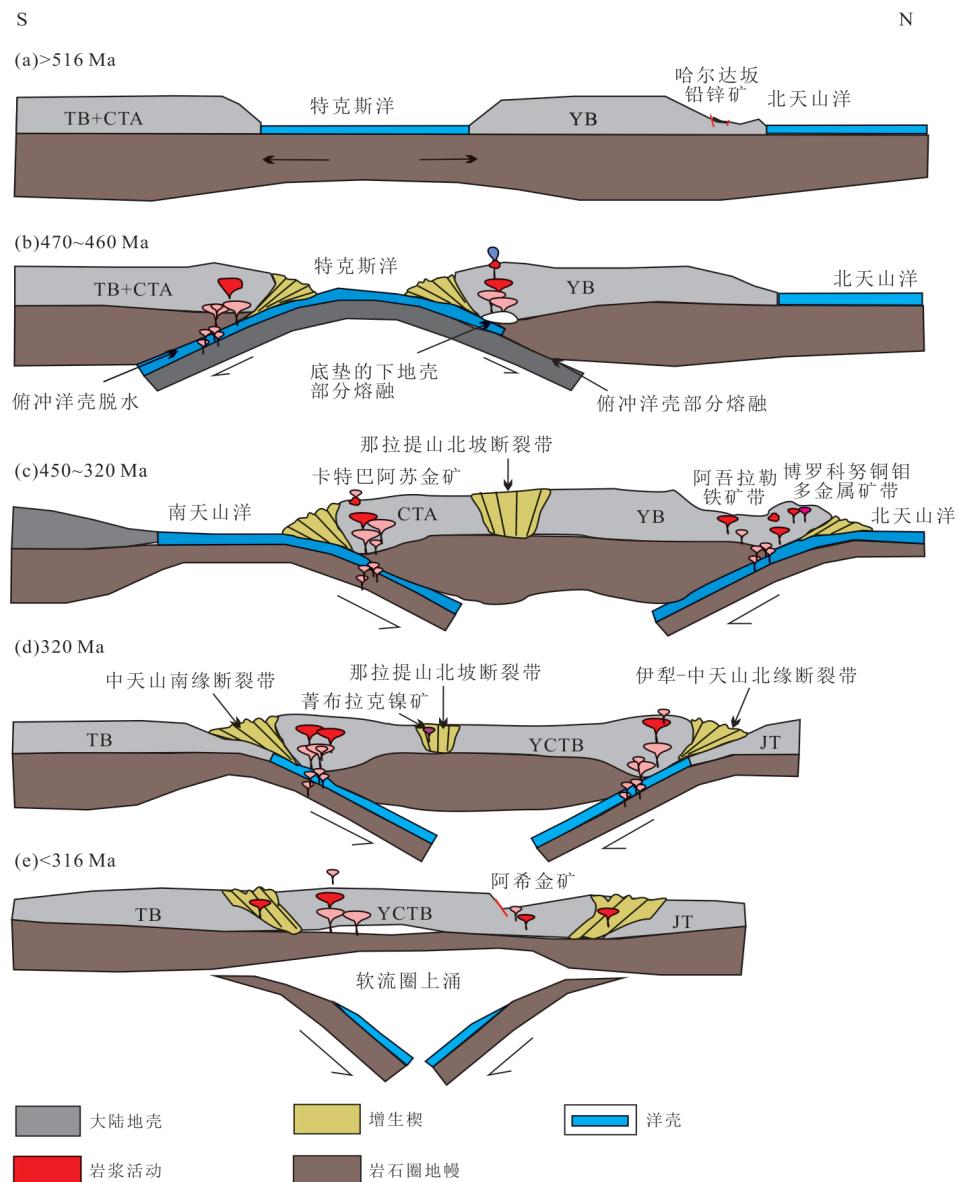


图 11 西天山区域成矿演化

Fig.11 Regional metallogenic evolution sketch of the western Tianshan

构造演化据高俊等(2009)

系，并伴生海底热液活动和热水沉积，形成哈尔达坂等 SEDEX 型铅锌矿床，该矿床可与境外哈萨克斯坦东南部的捷克利超大型铅锌矿进行对比（薛春纪等，2014a）。

西天山地区在古生代，因特克斯洋（Turkes）、北天山洋和南天山洋的先后打开，在岛弧与弧后盆地广泛发育火山-火山沉积建造。但是什么时候开始洋壳俯冲，尚存在争议。近期曹胜楠和王博（2021）在伊犁北缘果子沟地区奥陶系黑色硅质页岩中发现多层斑脱岩，其锆石 U-Pb 年龄为 458~460 Ma，表明存在中-晚奥陶世古洋壳向伊犁地块之下俯冲的证据；而晚古生代石炭纪火山-沉积岩

系最为发育，是西天山铁、锰沉积矿床的主要赋矿层位，下石炭统大哈拉军山组为基性-中酸性火山岩夹少量细碎屑岩，阿吾拉勒火山岩型铁矿产于其中，下石炭统阿克沙克组由碎屑岩、灰岩、硅质岩和少量火山岩组成，赋存有莫托沙拉铁锰矿床和昭苏沉积碳酸锰矿床；而上石炭统伊什基里克组主要见于西段，主要岩性为中酸性火山岩-沉凝灰岩、硅质岩和少量碳酸盐岩，赋存有式可布台沉积型矿床。

西天山地区的岩浆活动具有长期性和多阶段性的特征，主要与古陆裂解和俯冲造山构造活动有关。与成矿有关的中酸性岩浆活动主要出现在晚古生代与洋-陆俯冲有关的岛弧区，并形成一系列斑

岩和矽卡岩金、铜、钼、铁矿床,如著名的博罗科努和那拉提多金属成矿带。一些基性-超基性岩体主要侵入于晚古生代造山晚期的伸展环境,一般沿深大断裂展布,并伴生菁布拉克等铜镍矿化。石炭纪末到早二叠世,西天山进入后造山或陆内伸展环境,形成多个陆内断陷盆地,陆相火山-次火山岩发育,形成阿希等浅成低温热液型金矿。

3.2 区域构造演化对区域成矿的控制

西天山造山带形成于特克斯洋(中新元古代-奥陶纪,图11a,11b)、南天山洋(奥陶纪-石炭纪,图11c)、北天山洋(早古生代-石炭纪,图11a~11c)的打开、发展及消亡等演化过程,先后经历了陆缘裂陷、增生岛弧、碰撞造山等成矿环境(Gao et al., 1998; 高俊等, 2009; 薛春纪等, 2014a)。西天山成矿时代跨度较大,较老的成矿时期是新元古代铅锌矿,早古生代仅出现少数铁、铜矿床,晚古生代区内铁矿、金矿和铜矿基本都与下石炭统大哈拉军山组有关,具有集中爆发成矿的特点。

新元古代伊犁地块为边缘裂陷盆地环境,在长城纪哈尔达坂岩群和蓟县纪库松木切克岩群的细碎屑岩-碳酸盐岩建造中,形成了以哈尔达坂、托克赛、四台海泉为代表的热水沉积铅锌矿床(图11a)。

晚古生代伊犁地块北部为与北天山洋俯冲有关的岛弧和弧后盆地环境,即北天山洋向南部的伊犁地块俯冲,在其北部岛弧区形成了中酸性岩浆侵入活动,形成了喇嘛苏、莱历斯高尓等斑岩型铜钼矿,同时在弧后盆地形成阿吾拉勒铁多金属成矿带。而位于西天山南部的晚古生代那拉提金铜成矿带与南天山洋的俯冲与碰撞环境有关(图11c,11d)。

石炭纪末到早二叠世,西天山进入后造山或陆内伸展环境,形成多个陆内断陷盆地,陆相火山-次火山岩发育,形成阿希等多个浅成低温热液型金矿床(图11e)。

4 总结

本文综合研究了前人及笔者有关西天山区域地质构造、矿床地质和地球化等成果,探讨了西天山地区构造演化与成矿规律之间的关系。取得以下主要认识:

(1) 西天山造山带位于中亚增生型造山带的西南缘,其构造特征与天山洋演化密切相关。西天山地质构造复杂,成矿独特,是斑岩铜金矿、浅成低温热液型金矿、火山-沉积岩型铁锰

矿和热水沉积型铅锌矿的集中区。

(2) 西天山从前寒武纪到晚古生代大致形成4个重要的成矿区带,主要包括:①哈尔达坂前寒武纪铅锌成矿带,②博罗科努古生代金铜铅锌多金属成矿带,③阿吾拉勒晚古生代铁锰多金属成矿带,④那拉提古生代金铜多金属成矿带。

(3) 通过对区域地质背景、沉积建造、岩浆演化、成矿地质特征/物质来源及区域控矿因素等方面的综合研究,建立了西天山地区主要成矿区带的成矿模式,厘定了西天山地区沉积建造-构造-岩浆活动及其成矿序列,总结了西天山地区铁铜铅锌金等优势矿产区域分布规律和时空结构模型。

致谢:本文得到国家重点研发计划深地专项和国家自然科学基金项目的资助,以及新疆地矿局地质调查院的大力支持;同时新疆305项目办公室对本研究工作提供了各种帮助,肖文交、高俊和马华东研究员等对本文研究进行了具体指导,在此一并表示衷心感谢!

References

- Allen, M. B., Windley, B. F., Zhang, C., 1993. Palaeozoic Collisional Tectonics and Magmatism of the Chinese Tien Shan, Central Asia. *Tectonophysics*, 220 (1-4): 89–115. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90225-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90225-9)
- An, F., Zhu, Y. F., 2010. Geology and Geochemistry of Jingxi-Yelmand Gold Deposit in Tulasu Basin, North Tianshan, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2275–2286 (in Chinese with English abstract).
- An, F., Zhu, Y. F., 2018. Geology and Geochemistry of the Early Permian Axi Low-Sulfidation Epithermal Gold Deposit in North Tianshan (NW China). *Ore Geology Reviews*, 100: 12–30. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.03.021>
- Bureau of Geology and Mineral Resources Xinjiang Uygur Autonomous Regions, 1993, Regional Geology Records. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Cao, S. N., Wang, B., 2021. Age, Origin and Geological Implications of Early Paleozoic Marine Bentonites, Northern Yili Block of Central Asian Orogenic Belt. *Earth Science*, 46(8): 2804–2818 (in Chinese with English abstract).
- Che, Z. C., Liu, L., Liu, H. F., et al., 1996. Review on the Ancient Yili Rift, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 12(3): 478–490 (in Chinese with English abstract).

- Cheng, Y., Li, W. P., Yu, Y. L., et al., 2013. Comprehensive Prospecting Model of Tuokesai Lead-Zinc Deposit in Wenquan County, Xinjiang. *Geoscience*, 27(1): 91–98 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Y., Yan, C. X., Zhu, S. S., et al., 2012. Discovery of Haerdaban Stratabound Lead-Zinc Deposit and Its Prospecting Significance, Wenquan, Xinjiang. *Northwestern Geology*, 45(3): 116–122 (in Chinese with English abstract).
- Dong, L. H., Feng, J., Zhuang, D. Z., et al., 2011. Discussion of Metallogenic Models, Mineralization Characteristic and Main Type of Rich Iron Ore of Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 29(4): 416–422 (in Chinese with English abstract).
- Dong, L. L., 2018. Fingerprinting the Source of Gold in Gold Deposits: Insights from Two Types of Gold Deposits in Chinese Western Tianshan (Dissertation). Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Dong, L. L., Wan, B., Deng, C., et al., 2018a. An Early Permian Epithermal Gold System in the Tulasu Basin in North Xinjiang, NW China: Constraints from In Situ Oxygen-Sulfur Isotopes and Geochronology. *Journal of Asian Earth Sciences*, 153: 412–424. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2017.07.044>
- Dong, L. L., Wan, B., Yang, W. Z., et al., 2018b. Rb-Sr Geochronology of Single Gold-Bearing Pyrite Grains from the Katbasu Gold Deposit in the South Tianshan, China and Its Geological Significance. *Ore Geology Reviews*, 100: 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.030>
- Dong, Z. G., Zhang, B. L., Shi, F. P., et al., 2021. Mineralogical and Geochemical Characteristics of Moutousala Exhalative Sedimentary Fe-Mn Deposit in the West Tianshan, Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 37(4): 1099–1121 (in Chinese with English abstract).
- Duan, S. G., 2011. Regional Metallogenic Regularity and Prospecting Direction of Sailimu Micro-Massif, Western Tianshan, China (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Feng, J. X., Shi, F. P., Wang, B. Y., 2010. The Volcanic Rock Type Iron Deposits in Awulale Metallogenic Belt, Western Tianshan. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Gao, J., He, G. Q., Li, M. S., 1997. Paleozoic Orogenic Processes of Western Tianshan Orogeny. *Earth Science*, 22(1): 27–32 (in Chinese with English abstract).
- Gao, J., Li, M. S., Xiao, X. C., et al., 1998. Paleozoic Tectonic Evolution of the Tianshan Orogen, Northwestern China. *Tectonophysics*, 287(1–4): 213–231. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)80070-X](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)80070-X)
- Gao, J., Qian, Q., Long, L. L., et al., 2009. Accretionary Orogenic Process of Western Tianshan, China. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1804–1816 (in Chinese with English abstract).
- Gu, X. X., Dong, L. H., Peng, Y. W., et al., 2016. Formation and Evolution of the Epithermal-Porphyry Au Polymetallic Mineralization System in the Tulasu Volcanic Basin of the West Tianshan, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 32(5): 1283–1300 (in Chinese with English abstract).
- Gu, X. X., Zhang, Y. M., Peng, Y. W., et al., 2014a. The Fe-Cu-Mo Polymetallic Mineralization System Related to Intermediate-acid Intrusions in the Boluokenu Metallogenic Belt of the West Tianshan, Xinjiang: Rock-and-Ore-Forming Geochemistry and Tectonomagmatic Evolution. *Earth Science Frontiers*, 21(5): 156–175 (in Chinese with English abstract).
- Gu, X. X., Zhang, Y. M., Zhou, C., et al., 2014b. Intrusive and Mineralization Ages of the Halegati Fe-Cu Polymetallic Deposit in the West Tianshan: Evidence from Zircon U-Pb and Molybdenite Re-Os Geochronology. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(5): 614–623 (in Chinese with English abstract).
- Han, C. M., Xiao, W. J., Su, B. X., et al., 2020. Late Paleozoic Metallogenesis and Evolution of the Chinese Western Tianshan Collage, NW China, Central Asia Orogenic Belt. *Ore Geology Reviews*, 124: 103643. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103643>
- Huang, Z. Y., Long, X. P., Yuan, C., et al., 2016. Detrital Zircons from Neoproterozoic Sedimentary Rocks in the Yili Block: Constraints on the Affinity of Microcontinents in the Southern Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 37: 39–52. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.05.009>
- Jiang, C. Y., Wu, W. K., Xie, G. C., et al., 1993. Characteristics of Carboniferous Volcanic Rocks and the Trench-Arc Basin System in the Northern Part of West Tianshan Mountains. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 12(3): 224–231 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z. S., Zhang, Z. H., Hou, K. J., et al., 2012. Geochemistry and Zircon U-Pb Age of Volcanic Rocks from the Chagangnuoer and Zhibo Iron Deposits, Western Tianshan, and Their Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2074–2088 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Li, F. M., 2013. Metallogenic Regularity and Prospecting Direction of Fe-Mn Ore in the Carboniferous Volcanic-Sedimentary Basin in Western Tianshan (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Li, F. M., Peng, X. P., Shi, F. P., et al., 2011. Analysis on Fe-Mn Mineralization Regularity in Carboniferous Volcanic-Sedimentary Basin of West Tianshan. *Xinjiang Geology*, 29(1): 55—60 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. J., Wang, Z. P., Zhou, J. B., 2020. Carboniferous Volcanic Rocks in Yi-Ning Block. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Liu, H. S., Wang, B., Shu, L. S., et al., 2014. Detrital Zircon Ages of Proterozoic Meta-Sedimentary Rocks and Paleozoic Sedimentary Cover of the Northern Yili Block: Implications for the Tectonics of Microcontinents in the Central Asian Orogenic Belt. *Precambrian Research*, 252: 209—222. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.07.018>
- Liu, Y., Han, Y., Li, Z., et al., 2017. Geological Characteristics, Deposit Type, and Metallogenic Epoch of the Katabas Gold-Copper Deposit in Western Tianshan. *Geological Journal*, 53: 263—277.
- Ni, S. B., Man, F. S., Chen, J. F., 1994. Sm-Nd Isotope Ages of Basic and Ultrabasic Rocks from the Qingbulak Belt, Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 13(3): 227—231 (in Chinese with English abstract).
- Pirajno, F., Seltmann, R., Yang, Y. Q., 2011. A Review of Mineral Systems and Associated Tectonic Settings of Northern Xinjiang, NW China. *Geoscience Frontiers*, 2(2): 157—185. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.03.006>
- Seltmann, R., Porter, T. M., Pirajno, F., 2014. Geodynamics and Metallogeny of the Central Eurasian Porphyry and Related Epithermal Mineral Systems: A Review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 810—841. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2013.03.030>
- Shen, P., Pan, H. D., Li, C. H., et al., 2020. Carboniferous Ore-Controlling Volcanic Apparatus and Metallogenic Models for the Large-Scale Iron Deposits in the Western Tianshan, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 36(9): 2845—2868 (in Chinese with English abstract).
- Wan, B., Wang, X. S., Liu, X. J., et al., 2021. Long-Lived Seamount Subduction in Ancient Orogens: Evidence from the Paleozoic South Tianshan. *Geology*, 49(5): 531—535. <https://doi.org/10.1130/g48547.1>
- Wang, B., Shu, L. S., Liu, H. S., et al., 2014. First Evidence for Ca. 780 Ma Intra-Plate Magmatism and Its Implications for Neoproterozoic Rifting of the North Yili Block and Tectonic Origin of the Continental Blocks in SW of Central Asia. *Precambrian Research*, 254: 258—272. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.09.005>
- Wang, H. T., Gao, W., Ma, H. J., 2007. Types of Major Ore Deposit, Ore-Controlling Factors in Nalati Mineralization Belt and Study on Mineralization Regularity. *Xinjiang Geology*, 25(3): 253—257 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T., Huang, H., Song, P., et al., 2020. Studies of Crustal Growth and Deep Lithospheric Architecture and New Issues: Exemplified by the Central Asian Orogenic Belt (Northern Xinjiang). *Earth Science*, 45(7): 2326—2344 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. L., Gu, X. X., Zhang, Y. M., et al., 2013. Temporal-Spatial Distribution, Tectonic Evolution and Metallogenic Response of the Magmatic Rocks in the Boluokenu Metallogenic Belt, West Tianshan, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 32(5): 774—783 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. H., Zhang, Z. H., Jiang, Z. S., et al., 2012. Magnetite Composition of Zhibo Iron Deposit in Western Tianshan Mountains and Its Genetic Significance. *Mineral Deposits*, 31(5): 983—998 (in Chinese with English abstract).
- Windley, B. F., Alexeiev, D., Xiao, W. J., et al., 2007. Tectonic Models for Accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31—47. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-022>
- Windley, B. F., Allen, M. B., Zhang, C., et al., 1990. Paleozoic Accretion and Cenozoic Redefinition of the Chinese Tien Shan Range, Central Asia. *Geology*, 18(2): 128—131. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)0180128:paacro>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)0180128:paacro>2.3.co;2)
- Xia, L. Q., Xia, Z. C., Xu, X. Y., et al., 2004. Carboniferous Tianshan Igneous Megaprovince and Mantle Plume. *Regional Geology of China*, 23(Z2): 903—910 (in Chinese with English abstract).
- Xia, L. Q., Xia, Z. C., Xu, X. Y., et al., 2008. Petrogenesis of Carboniferous-Early Permian Rift-Related Volcanic Rocks in the Tianshan and Its Neighboring Areas, Northwestern China. *Northwestern Geology*, 41(4): 1—68 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., 2004. Paleozoic Accretionary and Collisional Tectonics of the Eastern Tianshan (China): Implications for the Continental Growth of Central Asia. *American*

- Journal of Science*, 304(4): 370–395. <https://doi.org/10.2475/ajs.304.4.370>
- Xiao, W. J., Han, C. M., Yuan, C., et al., 2006. Unique Carboniferous - Permian Tectonic - Metallogenic Framework of Northern Xinjiang (NW China): Constraints for the Tectonics of the Southern Paleoasian Domain. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1062–1076 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Song, D. F., Windley, B. F., et al., 2019. Research Progresses of the Accretionary Processes and Metallogenesis of the Central Asian Orogenic Belt. *Science in China (Series D)*, 49(10): 1512–1545 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Allen, M. B., et al., 2013. Paleozoic Multiple Accretionary and Collisional Tectonics of the Chinese Tianshan Orogenic Collage. *Gondwana Research*, 23(4): 1316–1341. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.01.012>
- Xing, H., Xue, C. J., Chi, G. X., et al., 2021. Petrogenesis of Volcanic Rocks of the Devonian-Carboniferous Dalaishan Formation, Western Tianshan: Implications for Crustal Growth in an Accretionary Orogen. *Lithos*, 386/387: 106003. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106003>
- Xue, C. J., Chen, P., Jia, Z. Y., et al., 2011. Geology, Geochemistry and Chronology of Lailisigao'er-3571 Porphyry Cu-Mo Ore-Field, Western Tianshan, Xinjiang. *Earth Science Frontiers*, 18(1): 149–165 (in Chinese with English abstract).
- Xue, C. J., Zhao, X. B., Mo, X. X., 2014a. Tectonic - Metallogenic Evolution of Western Tianshan Giant Au-Cu-Zn-Pb Metallogenic Belt and Prospecting Orientation. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2490–2531 (in Chinese with English abstract).
- Xue, C. J., Zhao, X. B., Mo, X. X., 2014b. Asian Gold Belt in Western Tianshan and Its Dynamic Setting, Metallogenic Control and Exploration. *Earth Science Frontiers*, 21(5): 128–155 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. Z., Xue, C. J., Zhao, X. P., et al., 2013. The Discovery of the Kateba'asu Large Au-Cu Deposit in Xinyuan County, Western Tianshan, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 32(10): 1613–1620 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. Q., Mao, J. W., Jiang, Z. S., et al., 2019. The Carboniferous Shikebutai Iron Deposit in Western Tianshan, Northwestern China: Petrology, Fe-O-C-Si Isotopes, and Implications for Iron Pathways. *Economic Geology*, 114(6): 1207–1222. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4681>
- Zhai, W., Sun, X. M., Su, L. W., 2010. Axi Gold Deposit: A Paleozoic Low-Sulfidation Type of Epithermal Gold Deposit in Xinjiang, China. *Earth Science Frontiers*, 17 (2): 266–285 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. C., Dong, Z. G., Chen, B., et al., 2021. Ore-Forming System and Regularity of Important Metallogenic Belts in East Tianshan, China. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 43(1): 12–35 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. C., Qin, K. Z., Ying, J. F., 2004. The Relationship between Ore-Forming Processes and Adakitic Rock in Tuwu-Yandong Porphyry Copper Metallogenic Belt, Eastern Tianshan Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 259–268 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. C., Xia, B., Niu, H. C., et al., 2006. Metallogenic Systems and Belts Developed on the Late Paleozoic Continental Margin in Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1387–1398 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X., Dong, Z. G., Zhang, B. L., et al., 2020. Geological Feature and Genesis of Shikebutai Iron Deposit in Western Tianshan, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 38 (3): 348–356 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. H., Hong, W., Jiang, Z. S., et al., 2012. Geological Features, Mineralization Types and Metallogenic Setting of Late Paleozoic Iron Deposits in Western Tianshan Mountains of Xinjiang. *Mineral Deposits*, 31(5): 941–964 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, S. M., Yang, W. Z., Wang, D. K., et al., 2012. Discuss of Geological Feature and Its Origin of Katebaasu Gold Deposit. *Mineral Deposit*, 31(Suppl.): 825–826 (in Chinese).
- Zhu, M. T., Wu, G., Xie, H. J., et al., 2010. Re-Os Isotopic Geochronology and Fluid Inclusion Study of the Lailisigao'er Porphyry Cu-Mo Deposit in Western Tianshan, Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (12): 3667–3682 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, M. T., Wu, G., Xie, H. J., et al., 2011. Geochronology and Geochemistry of the Kekesai Intrusion in Western Tianshan, NW China and Its Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 3041–3054 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, M. T., Wu, G., Xie, H. J., et al., 2012. Geochronology and Fluid Inclusion Studies of the Lailisigaoer and Lamusu Porphyry-Skarn Cu-Mo Deposits in Northwestern Tianshan, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49:

116—130. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.12.013>

Zhu, Z. X., Dong, L. H., Wang, K. Z., et al., 2013. Tectonic Division and Regional Tectonic Evolution of West Tianshan Organic Belt. *Geological Bulletin of China*, 32 (Z1): 297—306 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 安芳,朱永峰,2010.新疆吐拉苏盆地京希-伊尔曼德金矿地质和地球化学特征研究.岩石学报,26(8): 2275—2286.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局,1993.新疆维吾尔自治区区域地质志.北京:地质出版社.
- 曹胜楠,王博,2021.中亚造山带伊犁北缘早古生代海相斑脱岩地质意义.地球科学,46(8): 2804—2818.
- 车自成,刘良,刘洪福,等,1996.论伊犁古裂谷.岩石学报,12(3): 478—490.
- 成勇,李万平,俞彦龙,等,2013.新疆温泉县托克赛铅锌矿综合找矿模型.现代地质,27(1): 91—98.
- 成勇,闫存兴,朱生善,等,2012.新疆温泉县哈达坂层控型铅锌矿床的发现找矿意义.西北地质,45(3): 116—122.
- 董连慧,冯京,庄道泽,等,2011.新疆富铁矿成矿特征及主攻类型成矿模式探讨.新疆地质,29(4): 416—422.
- 董磊磊,2018.金矿中金的来源探索:以西天山两类金矿为例(博士学位论文).北京:中国科学院地质与地球物理研究所.
- 董志国,张帮禄,石方平,等,2021.新疆西天山莫托萨拉热水沉积型铁锰矿床矿物学与地球化学特征.岩石学报,37(4): 1099—1121.
- 段士刚,2011.新疆西天山寨里木微地块区域成矿规律与找矿方向(博士学位论文).北京:中国地质大学.
- 冯金星,石福品,汪帮耀,2010.西天山阿吾拉勒成矿带火山岩型铁矿.北京:地质出版社.
- 高俊,何国琦,李茂松,1997.西天山造山带的古生代造山过程.地球科学,22(1): 27—32.
- 高俊,钱青,龙灵利,等,2009.西天山的增生造山过程.地质通报,28(12): 1804—1816.
- 顾雪祥,董连慧,彭义伟,等,2016.新疆西天山吐拉苏火山盆地浅成低温热液-斑岩型金多金属成矿系统的形成与演化.岩石学报,32(5): 1283—1300.
- 顾雪祥,章永梅,彭义伟,等,2014a.西天山博罗科努成矿带与侵入岩有关的铁铜钼多金属成矿系统:成岩成矿地球化学与构造-岩浆演化.地学前缘,21(5): 156—175.
- 顾雪祥,章永梅,周超,等,2014b.西天山哈勒尕提铁铜多金属矿床成岩成矿时代:锆石U-Pb和辉钼矿Re-Os同位素年代学.矿物岩石地球化学通报,33(5): 614—623.
- 姜常义,吴文奎,谢广成,等,1993.西天山北部石炭纪火山岩特征与沟弧盆体系.岩石矿物学杂志,12(3): 224—231.
- 蒋宗胜,张作衡,侯可军,等,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.岩石学报,28(7): 2074—2088.
- 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(博士学位论文).北京:中国地质大学.
- 李凤鸣,彭湘萍,石福品,等,2011.西天山石炭纪火山-沉积盆地铁锰矿成矿规律浅析.新疆地质,29(1): 55—60.
- 李永军,王祚鹏,周继兵,2020.伊宁地块石炭纪火山岩.北京:地质出版社.
- 倪守斌,满发胜,陈江峰,1994.新疆青布拉克基性超基性岩带的Sm-Nd同位素年龄.岩石矿物学杂志,13(3): 227—231.
- 申萍,潘鸿迪,李昌昊,等,2020.新疆西天山大型铁矿床石炭纪控矿火山机构及成矿模式.岩石学报,36(9): 2845—2868.
- 王海涛,高纬,马海军,2007.新疆那拉提成矿带主要成矿类型、控矿地质因素及成矿规律探讨.新疆地质,25 (3): 253—257.
- 王涛,黄河,宋鹏,等,2020.地壳生长及深部物质架构研究与问题:以中亚造山带(北疆地区)为例.地球科学,45 (7): 2326—2344.
- 王新利,顾雪祥,章永梅,等,2013.新疆西天山博罗科努成矿带岩浆岩时空分布、构造演化与成矿响应.地质通报,32(5): 774—783.
- 王志华,张作衡,蒋宗胜,等,2012.西天山智博铁矿床磁铁矿成分特征及其矿床成因.矿床地质,31(5): 983—998.
- 夏林圻,夏祖春,徐学义,等,2004.天山石炭纪大火成岩省与地幔柱.地质通报,23(Z2): 903—910.
- 夏林圻,夏祖春,徐学义,等,2008.天山及邻区石炭纪-早二叠世裂谷火山岩岩石成因.西北地质,41(4): 1—68.
- 肖文交,韩春明,袁超,等,2006.新疆北部石炭纪-二叠纪独特的构造-成矿作用:对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约.岩石学报,22(5): 1062—1076.
- 肖文交,宋东方,Windley, B. F., 等,2019.中亚增生造山过程与成矿作用研究进展.中国科学(D辑),49(10): 1512—1545.
- 薛春纪,陈波,贾志业,等,2011.新疆西天山莱历斯高尔-3571斑岩铜钼矿田地质地球化学和成矿年代.地学前缘,18(1): 149—165.
- 薛春纪,赵晓波,莫宣学,2014a.西天山巨型金铜铅锌成矿带构造成矿演化和找矿方向.地质学报,88(12): 2490—2531.
- 薛春纪,赵晓波,莫宣学,2014b.西天山“亚洲金腰带”及其动力背景和成矿控制与找矿.地学前缘,21(5): 128—155.
- 杨维忠,薛春纪,赵晓波,等,2013.新疆西天山新发现新源

- 县卡特巴阿苏大型金铜矿床. 地质通报, 32(10): 1613—1620.
- 翟伟, 孙晓明, 苏丽薇, 2010. 新疆阿希金矿古生代的低硫型浅成低温热液金矿床. 地学前缘, 17(2): 266—285.
- 张连昌, 董志国, 陈博, 等, 2021. 东天山重要成矿区带、成矿系统与成矿规律. 地球科学与环境学报, 43(1): 12—35.
- 张连昌, 秦克章, 英基丰, 等, 2004. 东天山土屋—延东斑岩铜矿带埃达克岩及其与成矿作用的关系. 岩石学报, 20(2): 259—268.
- 张连昌, 夏斌, 牛贺才, 等, 2006. 新疆晚古生代大陆边缘成矿系统与成矿区带初步探讨. 岩石学报, 22(5): 1387—1398.
- 张新, 董志国, 张帮禄, 等, 2020. 新疆西天山式可布台铁矿床的地质特征及成因分析. 新疆地质, 38(3): 348—356.
- 张作衡, 洪为, 蒋宗胜, 等, 2012. 新疆西天山晚古生代铁矿床的地质特征、矿化类型及形成环境. 矿床地质, 31(5): 941—964.
- 赵树铭, 杨维忠, 王敦科, 等, 2012. 卡特巴阿苏金矿床地质特征及成因探讨. 矿床地质, 31(增刊): 825—826.
- 朱明田, 武广, 解洪晶, 等, 2010. 新疆西天山莱历斯高白斑岩型铜钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及流体包裹体研究. 岩石学报, 26(12): 3667—3682.
- 朱明田, 武广, 解洪晶, 等, 2011. 新疆西天山科克赛岩体年代学、地球化学及地质意义. 岩石学报, 27(10): 3041—3054.
- 朱志新, 董连慧, 王克卓, 等, 2013. 西天山造山带构造单元划分与构造演化. 地质通报, 32(2): 297—306.