

北山地区三道明水 Cu-Zn 矿床地质特征及矿床成因初探

高树起¹, 王云峰², 王晓东¹, 董珍¹, 宗飞超³, 狄廷川¹, 付旭¹

(1. 内蒙古地质勘查有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100029;
3. 西北核技术研究院, 陕西 西安 710000)

摘要: 三道明水矿床位于北山成矿带的西部, 是近年来新发现的一个中型 Cu-Zn 矿。为了解该矿床成因类型及主要控矿因素, 本文在前期勘探工作的基础之上, 对其矿床地质特征, 特别是蚀变矿化特征开展了野外及室内研究。根据热液蚀变、矿物组合及脉体间穿插关系的不同, 可将三道明水矿床的蚀变和矿化划分为早、中、晚 3 期。其中, 早期矿化以黄铁矿±黄铜矿±闪锌矿、黄铁矿-闪锌矿±黄铜矿组合, 以及零星浸染状黄铁矿-黄铜矿-闪锌矿组合为特征, 相关的热液蚀变为绿泥石±绢云母, 显示出块状硫化物矿床的蚀变矿化特征; 中期矿化为该矿床的主要成矿阶段, 以浸染状黄铜矿-闪锌矿-黄铁矿组合为特征, 相关蚀变为绢英岩化, 含 Cu、Zn 矿物(黄铜矿、闪锌矿)形成于韧性变形过程中; 晚期矿化主要以石英±黄铜矿±辉钼矿脉±黄铁矿脉、方解石脉发育为特征, 蚀变不明显。基于上述蚀变矿化特征的观察, 并通过与区域成矿作用的综合对比, 认为三道明水矿床早期可能为块状硫化物型(VMS)矿化, 中期经历了韧性剪切变形驱动下的热液改造, 在主剪切带富集形成了工业矿体, 晚期叠加了岩浆热液有关的 Cu-Mo 矿化。

关键词: 北山地区; 三道明水 Cu-Zn 矿床; VMS 成矿; 热液改造

中图分类号: P618.41; P618.43

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)06-1141-14

The geologic feature and genetic mechanism of the Sandaomingshui Cu-Zn deposit in the Beishan area

GAO Shu-qi¹, WANG Yun-feng², WANG Xiao-dong¹, DONG Zhen¹, ZONG Fei-chao³,
DI Ting-chuan¹ and FU Xu¹

(1. Inner Mongolia Geological Prospecting Co., Ltd., Hohhot 010010, China; 2. Institute of the Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100029, China; 3. Northwest Institute of Nuclear Technology, Shaanxi 710000, China)

Abstract: The Sandaomingshui deposit, located at the western part of the Beishan district, is a recently discovered medium-sized Cu-Zn deposit. Aim to understand its genesis type and controlling factors, geological characteristic of the Sandaomingshui Cu-Zn deposit is studied in this paper. According to the alteration features, mineral assemblages and crosscutting relationships, the mineralization and alteration process have be divided into the early- (stage I), middle- (stage II) and late-mineralization (stage III) stages. The early-mineralization stage is characterized by the occurring of pyrite±chalcopyrite±sphalerite and pyrite-sphalerite±chalcopyrite veins, and disseminated pyrite-chalcopyrite-sphalerite assemblage, with chlorite±sericite alteration occurred in wall rocks, which are similar to VMS-type deposits. The middle-mineralization stage, main mineralization stage, is marked by phyllic alteration and chalcopyrite-pyrite-sphalerite assemblage, in which Cu-Zn-rich minerals (chalcopyrite and sphalerite) occurred during

收稿日期: 2020-06-02; 接受日期: 2020-11-20; 编辑: 尹淑苹

作者简介: 高树起(1981-), 男, 博士在读, 高级工程师, 矿产勘查专业, E-mail: gaosq810706@163.com; 通讯作者: 王云峰(1989-), 男, 博士, 主要从事矿床学研究, E-mail: wangyunfeng@163.com。

ductile deformation. The late-mineralization stage is featured by the quartz±chalcopyrite±molybdenite±pyrite and calcite veins, with un conspicuous alteration, which were hosted by open fractures. According to the alteration and mineralization features of the Sandaomingshui Cu-Zn deposit and regional mineralization characteristics, Cu-Zn mineralization of the Stage I was likely VMS-type. The stage II Cu-Zn mineralization overprinted on the stage I and formed the major Cu-Zn orebodies of the Sandaomingshui, which was controlled by ductile shear zones. The stage III Cu-Mo mineralization superposed on the earlier Cu-Zn mineralization.

Key words: Beishan district; Sandaomingshui Cu-Zn deposit; VMS-mineralization; hydrothermal-modification

北山地区地处中亚造山带南缘,位于哈萨克斯坦板块、塔里木板块及华北板块的交汇地带(Mossakovskii *et al.*, 1993; 左国朝等, 2003; Windley *et al.*, 2007)。其西连天山山系,东接弱水断裂,与银额盆地相邻,呈东西向展布于甘肃省西北部及内蒙古西部等广大地区(左国朝等, 1990; 刘雪亚等, 1995)。中亚造山带主体形成于约 650~250 Ma 之间(Şengör and Natal'in, 1996; Windley *et al.*, 2007);在如此漫长的地质演化进程中,北山地区经历了复杂的构造演化、岩浆和沉积变质作用,形成了乌珠尔嘎顺 Cu-Au 矿、乌兰乌拉斑岩型 Cu-Mo 矿、黑鹰山 Fe 矿、小狐狸山斑岩型 Mo 矿及东七一山 Rb-W-Sn-萤石矿等一系列矿床,构成了北山成矿带(Xiao *et al.*, 2010; 吕博等, 2011; 张雨莲等, 2012; 于明杰等, 2014; Song *et al.*, 2016)。不过,与中亚造山带其他地区相比,北山地区矿点虽多,却以小型为主,鲜有大中型矿床的发现(Yang *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2016)。导致这一现象的一种可能是该区资源禀赋本身就差,而另一种可能是北山地区研究程度低,大中型矿床尚未得以发现。近年来,随着毗邻的新疆地区陆续发现了阿舍勒 Cu-Zn 矿、可可塔勒 Pb-Zn 矿、红海 Cu-Zn 矿以及小热泉子 Cu-Zn 矿等一系列大-中型 VMS 型矿床,具有相似构造背景的北山地区的成矿潜力究竟如何再次成为了关注的焦点(杨富全等, 2021)。

令人欣喜的是,2017 年内蒙古地质勘查有限责任公司在内蒙古北山成矿带西段经勘查发现了三道明水 Cu-Zn 矿床。初步勘查表明该矿床为中型 Cu-Zn 矿床;其中,金属 Cu 资源量为 9 万吨,平均品位为 0.81%;Zn 资源量为 13 万吨,平均品位为 1.44%。该矿床的勘查突破,无疑为北山地区下一步找矿突破带来了曙光;同时,详细了解该矿床地质、蚀变及矿化特征等信息将为区内进一步找矿提供重要线索。然而,由于矿床刚发现不久,尚缺少针对该矿区的矿床学研究,制约了对矿区成矿规律的认知。

为此,本文在前期勘查工作的基础之上,对三道明水矿区地质及蚀变矿化特征开展了调查,重点厘定了蚀变和矿化特征及期次,探讨了矿床的可能类型,并结合区域成矿作用的综合对比,初步提出了可能的成矿模式,以期通过上述工作对北山地区下一步找矿有所裨益。

1 区域地质概况

北山地区在前震旦纪统一结晶基底上发生裂解后,经历了多期次、多阶段的板块裂解-俯冲-碰撞-拼合的复杂地质演化过程,形成了一系列 NEE-NWW 走向、向北突起的弧形大断裂,由其分割而成的断块相互拼接,从而形成了北山多旋回复合造山带(何世平等, 2002; 张发荣等, 2003; 杨合群等, 2008; 毛景文等, 2013; 叶天竺等, 2017)。区内分布着 4 条近 EW-NW 向的蛇绿岩带,由北向南依次为:红石山-百合山-蓬勃山蛇绿岩带、茈茈台子-小黄山蛇绿岩带、红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿岩带以及辉铜山-账房山蛇绿岩带(杨合群等, 2010)。以红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿岩带和阿尔金断裂带为界,北山地区跨越了 3 个一级构造单元,即哈萨克斯坦板块(I)、塔里木板块(II)和华北板块(III)(图 1; 杨合群等, 2008)。其中,哈萨克斯坦板块(I)位于红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿岩带以北,由北向南依次可划分为 4 个构造带,即大南湖-雀儿山-狐狸山早古生代活动陆缘带(I-1)、雅满苏-红石山-黑鹰山晚古生代陆内裂谷带(I-2)、星星峡-明水-旱山地块(I-3)和窑洞努如-公婆泉-白云山-东七一山早古生代活动陆缘(I-4);塔里木板块(II)位于红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿岩带以南,阿尔金断裂带西北,由北向南同样可以划分为 4 个构造带:方山口-营毛沱-鹰嘴红山早古生代被动陆缘带(II-1)、花牛山早古生代陆缘裂谷带(II-2)、磁海-红柳园-大奇山-白山堂晚古生代陆内裂谷带(II-3)和敦

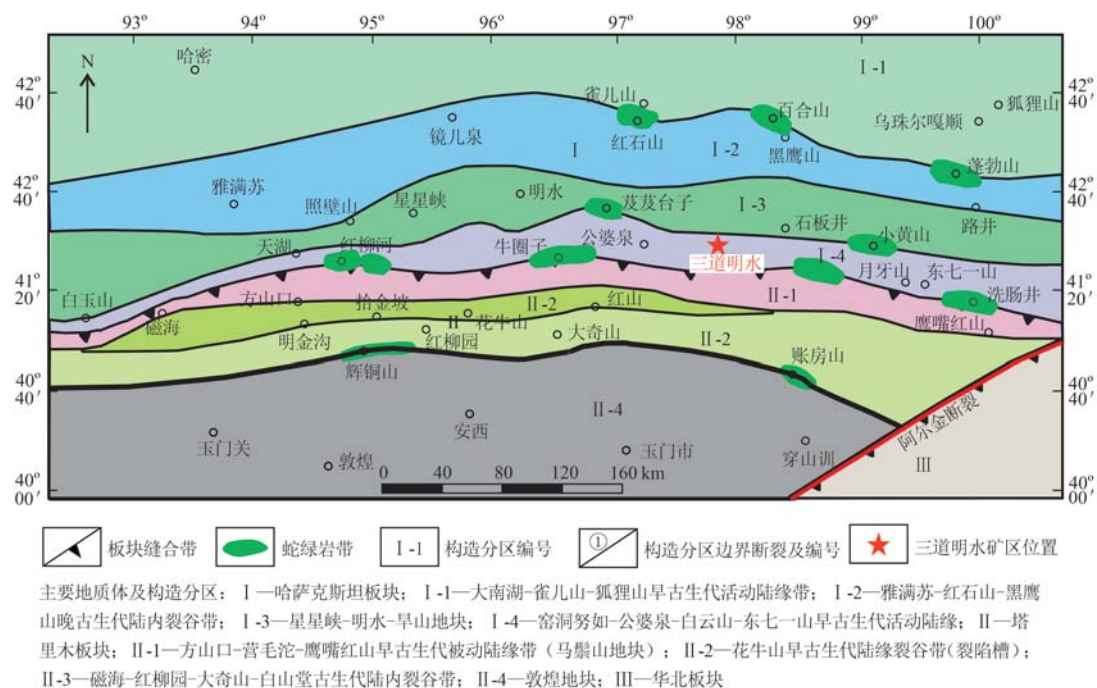


图 1 北山地区构造地质单元划分简图(据杨合群等, 2008; 陈超等, 2017)

Fig. 1 The brief map for the geological units of Beishan (after Yang Hequn *et al.*, 2008; Chen Chao *et al.*, 2017)

煌地块(Ⅱ-4);华北地块(Ⅲ)位于阿尔金断裂带东南侧。

三道明水矿床位于窑洞努如-公婆泉-白云山-东七一山活动陆缘弧带的中部。该带由牛圈子洋(古亚洲洋南支在北山牛圈子地区的分支洋盆简称)在奥陶纪-晚石炭世向北俯冲而形成(杨合群等, 2010)。牛圈子洋在晚石炭世闭合后, 窑洞努如-公婆泉-白云山-东七一山岛弧带经历了碰撞造山及后期的碰撞后伸展运动(何世平等, 2002; Tian *et al.*, 2014, 2017)。带内出露有前寒武纪到第四纪各时代的地层, 其中, 前寒武系主要为一套低角闪岩相-低绿片岩相褶皱基底, 原岩主要为蛇绿岩、玄武岩以及浊积岩等; 奥陶系主要由复理石、混杂岩、玄武岩等组成; 志留系主要为公婆泉组, 由安山岩、玄武岩、火山角砾岩、凝灰岩、砂岩、粉砂岩等组成, 岩石受构造作用影响, 呈片状产出; 泥盆系主要为海陆交互相中酸性火山沉积岩与碎屑岩建造; 石炭系以中基性火山岩-沉积岩与碎屑岩建造为主; 三叠系及中生代以陆相碎屑岩为主, 并夹有少量的煤层。带内构造以韧性剪切为主, 呈近东西向、压扭性特征; 带内岩石发生明显的构造变形, 矿物半定向排

列, 面理发育(张颖, 2012)。带内已报道的岩体年龄, 主要集中在奥陶纪~石炭纪, 为牛圈子洋俯冲阶段所形成的基性-酸性火山岩、侵入岩体, 如牛圈子北辉长岩(434~354 Ma; 王盛栋, 2017)、公婆泉中酸性岩体(420~336 Ma; 戴霜等, 2002)。此外, 带内出露少量的前寒武纪基性-酸性岩体, 形成于牛圈子洋盆形成阶段, 如月牙山杂岩(542~527 Ma; 胡新苗等, 2015)。这些岩体与带内金属矿床的形成密切相关。带内已发现的金属矿床主要有: 公婆泉 Cu 矿床(晚志留世-晚泥盆世; 王大为等, 1995; 杨合群等, 2006; 姜寒冰等, 2012; 杨晖, 2012)、东七一山 Rb-W-Sn-萤石矿床(约 510~355 Ma; 聂风军等, 2002a, 2002b) 和月牙山 V-Ti-Fe 矿床(536±7 Ma; 侯青叶等, 2012)。

2 矿区及矿床地质概况

2.1 矿区地质特征

矿区出露地层主要有古元古代北山群、晚奥陶世-晚志留世公婆泉组、早白垩世赤金堡组及第四纪冲洪积物(图2; 潘志龙等, 2016^①)。其中, 北山群

① 潘志龙, 刘增校, 魏文通. 2016. 内蒙古基东等四幅 1:5 万区域地质调查报告.

主要出露于矿区中东部,呈近南北向展布,多呈断块状或大小不等的残留体产出。根据岩性组合可将北山群划分为两个岩性段:一岩段主要为斜长角闪岩,二岩段为黑云斜长变粒岩(图2b)。公婆泉组主要出露于矿区中部及西部,岩性为一套玄武岩、安山岩、玄武安山岩、石英安山岩、富钙镁泥质碎屑岩组合,岩石地球化学特征显示,公婆泉组中基性火山岩具有钙碱性-拉斑玄武岩特征,形成于岛弧环境(王盛栋,2017)。经区域变质和动力变质作用形

成一套(低)绿片岩相变质岩(图2b;潘志龙等,2016^①)。公婆泉组地层由南向北出露于矿区中部,矿区内出露长度约9 km,走向NE至近NS,倾向NW-W,倾角60°~70°,宽度300~1 500 m不等,由南向北地层出露宽度逐渐变窄,与下伏北山群呈不连续的角度不整合接触。赤金堡组主要出露于矿区外北西部,岩性为泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩夹砂岩、砾岩等,为造山期后的沉积建造(陈超等,2017)。

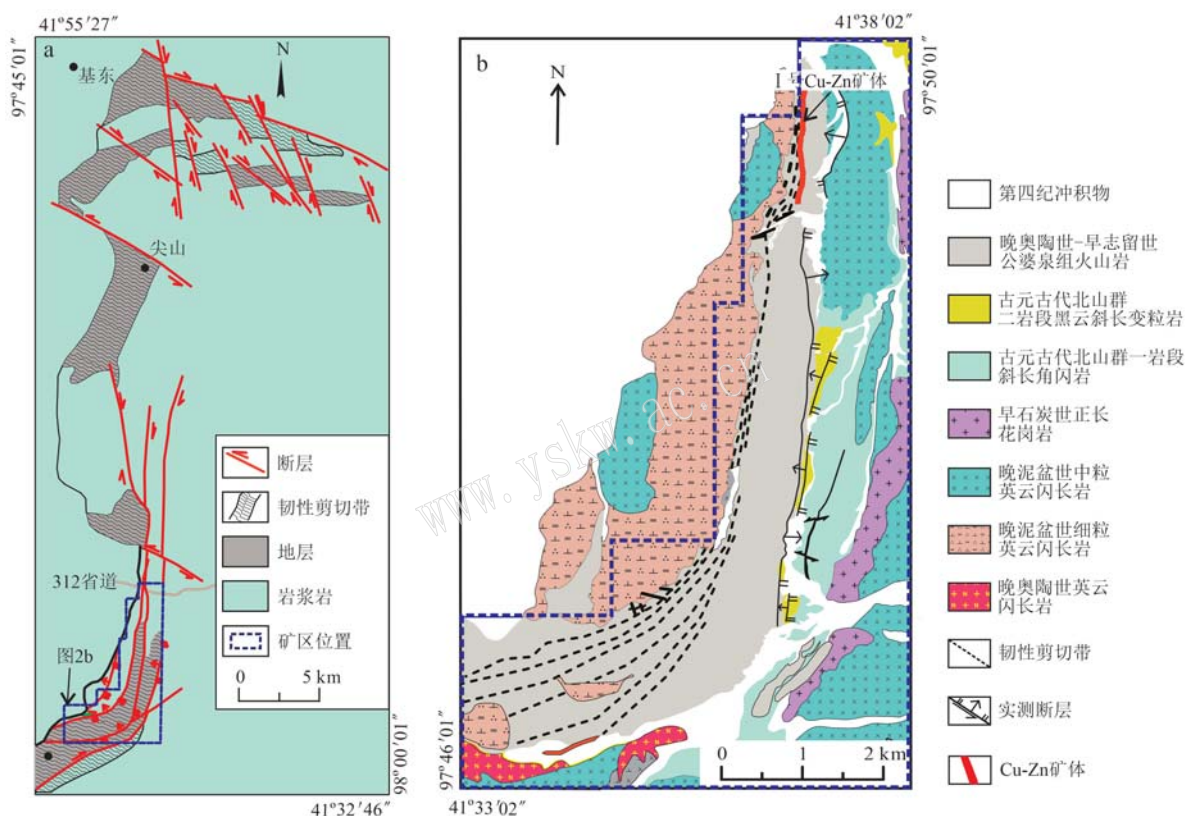


图2 三道明水矿区构造简图(a, 据潘志龙等, 2016^①修改)和Cu-Zn矿区地质图(b)

Fig. 2 Structural sketch of the Sandaomingshui area (a, modified after Pan Zhilong *et al.*, 2016^①) and simplified geologic map of the Sandaomingshui Cu-Zn deposit (b)

区域上发育的“尖山韧性剪切带”自南向北贯穿本矿区,为该区间的主要构造(图2b;陈超等,2017)。该韧性剪切带发育于矿区西部,成反L型展布,南侧走向NEE,向北逐渐转为NNE至近NS向,倾向NNW-W,倾角40°~70°,在矿区内延长约10 km。矿区内受该组韧性剪切带强变形构造作用,公婆泉组地层均具强片理化,局部见糜棱岩化,构造岩以片岩为主,局部发育变余糜棱岩。在强构造应力的作用下,大部分岩石及其中的石英、黄铁矿等矿物

均沿片理方向定向排列。矿区东部受尖山韧性剪切带的次级构造影响,其韧性变形程度远不如西侧强烈,以后期发育的伸展正断层为主,断层走向以近NS、NNE向为主。

矿区内北山群及公婆泉组地层两侧出露大面积英云闪长岩及花岗岩,其展布方向与韧性剪切带、地层片理方向基本一致(图2b)。其中,晚奥陶世英云闪长岩主要出露于矿区南部,分布面积较小,细粒结构,片麻状构造,岩体局部糜棱岩化较强。晚

① 潘志龙,刘增校,魏文通. 2016. 内蒙古基东等四幅1:5万区域地质调查报告.

泥盆世英云闪长岩则大面积出露于地层东西两侧, 中细粒结构, 块状构造, 受韧性剪切构造影响不大。早石炭世正长花岗岩主要出露于矿区东部, 中粗粒结构, 常呈岩枝状产出, 无明显的变形构造。

2.2 矿体地质特征

三道明水 Cu-Zn 矿位于公婆泉组中基性火山岩中, 已发现 14 条矿体(矿化体), 其中 I 号为矿区的主要 Cu-Zn 矿体(图 3)。该矿体位于矿区北部, 由南向北走向 $23^{\circ} \sim 331^{\circ}$, 倾向 $241^{\circ} \sim 293^{\circ}$, 倾角 $20^{\circ} \sim 85^{\circ}$, 平均倾角 60° , 属陡倾斜矿体(图 3b)。目前控制矿体长 1 600 m, 赋矿标高 500~1 505 m, 矿体真厚度 0.43~20.97 m, 平均 4.22 m。矿体形态简

单, 呈层状、似层状, 连续性较好, 局部见分支复合、膨大缩小现象, 少有后期断层或岩脉的破坏。矿区内分布一条近南北向韧性剪切带, 该剪切带呈压扭性、近南北向展布, 岩石片理同样呈近南北向, 带内中部韧性剪切变形较强, 由中心向两侧剪切变形逐渐减弱。I 号矿体严格受该韧性剪切带的控制, 分布于中部强韧性剪切带内(图 3b)。矿体中主成矿元素为 Cu、Zn, 伴生有少量的 Au、Ag、Pb 等元素。整体上, 三道明水矿床的 Cu 品位变化于 0.40%~3.43%之间, 平均为 0.81%, Cu 资源量为 9 万吨; Zn 品位变化于 1.00%~5.36%之间, 平均为 1.44%, 资源量为 13 万吨。

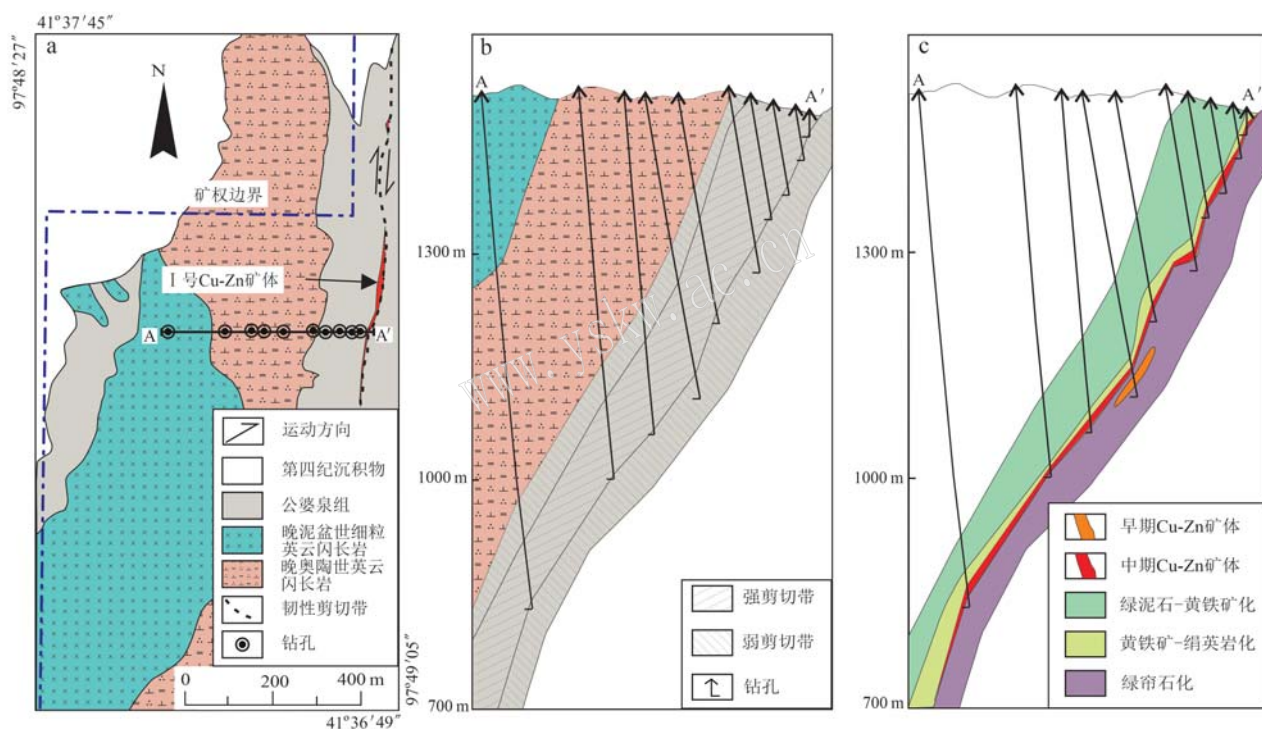


图 3 三道明水 Cu-Zn 矿床矿体分布图(a)及 AA' 勘探线剖面中岩石、构造(b)和蚀变、矿体分布图(c)
Fig. 3 Distribution of the orebody in the Sandaomingshui Cu-Zn deposit(a), rocks and ductile shear zone occurring(b) and alteration zones and orebody occurring(c) along exploration line AA'

此外, 弱韧性剪切带内也有零星浸染状黄铁矿-黄铜矿-闪锌矿组合, 且在局部部位可见 Cu-Zn 矿化, 矿脉宽以 5~10 cm 为主(图 3), 与片理方向大角度相交。

矿区赋矿围岩中主要发育绢英岩化、黄铁矿化、硅化、绿泥石化、绿帘石化等蚀变(图 3c)。矿区的金属矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿, 并含少量的钛铁矿、磁铁矿、辉钼矿等; 非金属矿物主要有石英、绢云母、绿泥石、绿帘石, 并含少量高岭石、黑云母、石膏、方解石等。

3 成矿期次划分

在野外及室内详细观察的基础上, 根据矿物间的热液蚀变特征、矿物共生组合类型以及脉体的穿插关系, 将三道明水 Cu-Zn 的成矿过程初步划分为早、中、晚 3 期(图 4)。

3.1 成矿早期

成矿早期主要矿物为绿泥石、黄铁矿、石英等, 并有少量的闪锌矿、黄铜矿及方解石等, 局部有绢

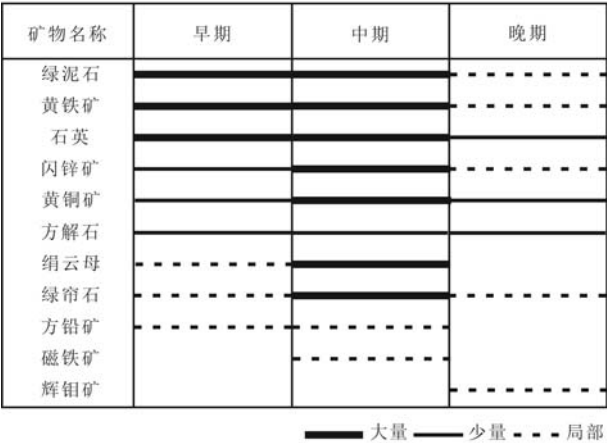


图 4 三道明水 Cu-Zn 矿床成矿期次图
Fig. 4 Alteration and mineral paragenesis of the Sandaomingshui Cu-Zn deposit

云母、绿帘石和方铅矿等出现(图 4)。该期蚀变和矿化主要分布在矿区弱韧性剪切带内公婆泉组火山岩地层中,并贡献了三道明水矿床约 15% 的 Zn 以及 <10% 的 Cu。

其中,黄铁矿主要以脉状、零星浸染状分布。脉状黄铁矿通常以石英-黄铁矿-绿泥石±黄铜矿±闪锌矿、黄铁矿-闪锌矿±黄铜矿±石英组合出现(图 5a, 5b),脉宽多在 5~10 cm 之间,主要出现在矿区内下盘弱韧性剪切带内。黄铁矿通常呈自形、半自形粒状,粒径<3 mm;闪锌矿通常呈半自形-它形粒状,粒径 0.5~2 mm,棕黑色,与黄铁矿伴生出现;黄铜矿常呈不规则状与黄铁矿伴生,或呈乳滴状(<0.3 mm)分布在黄铁矿颗粒内部,粒径<0.5 mm;石英通常呈烟灰色,它形粒状,常为 0.5~3 mm;绿泥石呈绿色片状、针柱状,主要分布在石英-硫化物脉体两侧围岩中,局部出现在脉体内部。局部脉体富集的部位,可形成工业矿体。脉状矿体中,Cu 的品位为 0.64%~3.42%,平均品位为 1.85%;Zn 的品位为 1.37%~5.36%,平均品位为 2.46%。零星浸染状黄铁矿常呈黄铁矿-黄铜矿-闪锌矿-绿泥石±绢云母组合(图 5c, 5d)。其中,黄铁矿常呈自形-半自形粒状,粒径多在 0.1~1.0 mm 之间,其内常包裹有少量乳滴状黄铜矿,粒径常在 0.1 mm 以下(图 5c);

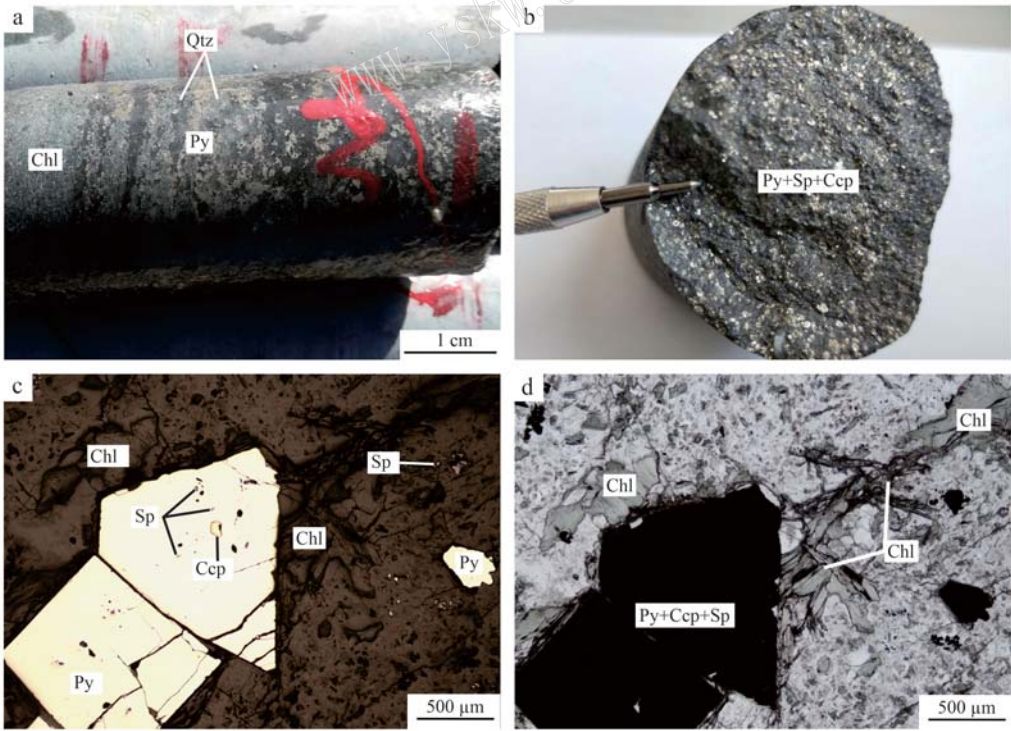


图 5 三道明水 Cu-Zn 矿床成矿早期典型手标本及镜下照片
Fig. 5 Representative hand specimen photographs and photomicrographs of the early stage of the Sandaomingshui Cu-Zn deposit
a—火山岩中脉状石英-黄铁矿-绿泥石-闪锌矿脉; b—黄铁矿-闪锌矿脉; c—火山岩中浸染状黄铁矿-闪锌矿-黄铜矿-绿泥石组合(反射光); d—早期 Cu-Zn 矿化伴生的绿泥石化蚀变(单偏光); Qtz—石英; Chl—绿泥石; Py—黄铁矿; Sp—闪锌矿; Ccp—黄铜矿
a—quartz-pyrite-chlorite-sphalerite vein in volcanic rocks; b—pyrite-sphalerite vein; c—disseminated pyrite-sphalerite-chalcopyrite-chlorite assemblage (reflected light); d—Cu-Zn mineralization of the early stage with chlorite alteration (plane polarized light); Qtz—quartz; Chl—chlorite; Py—pyrite; Sp—sphalerite; Ccp—chalcopyrite

闪锌矿常呈它形粒状, 0.5 mm 以下, 零星分布在围岩中(图 5c); 绿泥石多呈片状、针柱状, 0.1~1 mm, 与黄铁矿及 Cu-Zn 矿化关系密切(图 5d)。零星浸染状矿化主要分布在弱韧性剪切带内, 该形式的 Cu-Zn 矿化通常不能达到工业品位。

3.2 成矿中期

成矿中期蚀变和矿化同样出现在公婆泉组火山岩中, 叠加在早期蚀变和矿化之上。该期所形成的矿物有绿泥石、石英、闪锌矿、黄铜矿、绢云母、黄铁矿、方解石、绿帘石等。

该期形成了大量绿泥石、石英、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、绢云母和绿帘石, 并有少量的磁铁矿和方铅矿(图 4)。蚀变和矿化明显受韧性剪切构造作用控制; 在强韧性剪切带内, 岩石发生强变形、强绢英岩化及弱的绿泥石化蚀变, 矿物明显呈定向排列, 片理发育(图 6a, 6b); 由强韧性剪切带向外, 岩石变形作用减弱, 绢英岩化蚀变逐渐变弱, 绿泥石化及绿帘石化蚀变增强(图 6c)。Cu-Zn 矿化主要出现在强韧性剪切带内, 与绢英岩化蚀变关系密切(图 6a, 6b)。

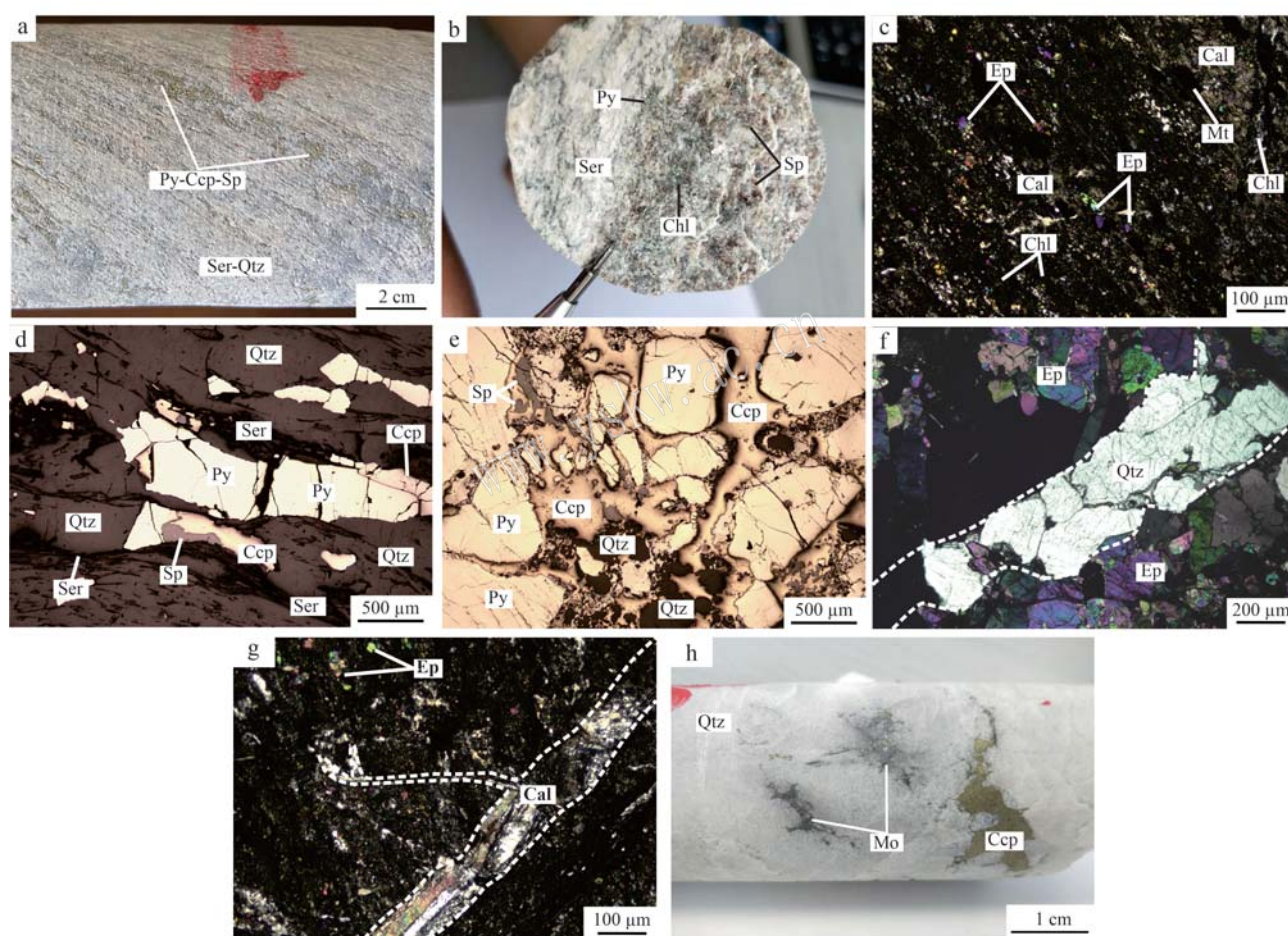


图 6 三道明水 Cu-Zn 矿床成矿中、晚期典型手标本及镜下照片

Fig. 6 Representative hand specimen photographs and photomicrographs of the middle and late stages of the Sandaomingshui Cu-Zn deposit

a—成矿中期黄铁矿-黄铜矿-闪锌矿沿绢英岩化片理方向分布; b—成矿中期黄铁矿绢英岩化火山岩中, 沿片理方向分布的浸染状闪锌矿; c—成矿中期围岩中绿帘石-磁铁矿-绿泥石-方解石组合(+); d—成矿中期定向排列的石英-绢云母-黄铁矿-黄铜矿-闪锌矿组合(反射光); e—成矿中期石英-黄铜矿-闪锌矿组合交代成矿早期黄铁矿(反射光); f—成矿晚期石英脉切穿成矿中期绿帘石化火山岩围岩(+); g—成矿晚期方解石脉切穿成矿中期绿帘石化火山岩围岩(+); h—成矿晚期石英脉-黄铜矿-辉钼矿脉; Py—黄铁矿; Ser—绢云母; Sp—闪锌矿; Qtz—石英; Ccp—黄铜矿; Ep—绿帘石; Cal—方解石; Mo—辉钼矿; Chl—绿泥石

a—pyrite-chalcopyrite-sphalerite assemblage distributed along the schistosity of phyllic rocks (middle stage); b—pyrite-sericite-quartz altered volcanic rocks, and disseminated sphalerite distributed along the schistosity of phyllic rocks (middle stage); c—epidote-magnetite-chlorite-calcite assemblage in wall rocks (middle stage; crossed-polarized light); d—directional distributed quartz-sericite-pyrite-chalcopyrite-sphalerite assemblage (middle stage; reflected light); e—quartz-chalcopyrite-sphalerite assemblage of the middle stage altered pyrite of the early stage (reflected light); f—quartz vein cutting the epidote volcanic rocks (middle stage; crossed-polarized light); g—calcite vein (late stage) cutting the epidote altered volcanic rocks (middle stage; crossed-polarized light); h—quartz-chalcopyrite-molybdenite vein of the late stage; Py—pyrite; Ser—sericite; Sp—sphalerite; Qtz—quartz; Ccp—chalcopyrite; Ep—epidote; Cal—calcite; Mo—molybdenite; Chl—chlorite

强韧性剪切带内,黄铁矿多为半自形或者它形,粒径多在0.1~0.5 mm之间,沿片理方向定向排列,呈浸染状出现在绢英岩化蚀变带中(图6b, 6d),成矿早期所形成的黄铁矿在该期发生破碎和溶蚀现象(图6e)。黄铜矿、闪锌矿呈它形粒状,粒径多在0.1~2 mm之间,且常交代成矿早期所形成的黄铁矿(图6e);部分闪锌矿中,可以看到出溶乳滴状黄铜矿的现象。绢云母呈针状、纤维状,长约0.1~3 mm,定向、半定向排列,主要分布在中部带中(图6b, 6d);石英、方解石、绿帘石常呈它形粒状,粒径多<0.5 mm;绿泥石常呈片状,多在0.2~1 mm之间;这些矿物均呈定向、半定向分布在公婆泉组火山岩中(图6b)。在弱韧性剪切带内,靠近强韧性剪切带的围岩主要发生方解石、绿泥石、绿帘石化蚀变,并有少量的磁铁矿(图6c, 6f, 6g)。其中,绿泥石呈它形片状、粒状,粒径多<0.1 mm,浸染状分布在火山岩中;绿帘石呈半自形、它形粒状,粒径多<0.3 mm;磁铁矿呈它形粒状,粒径多<0.2 mm,零星分布在火山岩中;方解石呈它形粒状,粒径多<0.1 mm,充填于绿帘石、磁铁矿等矿物颗粒之间。弱韧性剪切带中,矿物呈半定向、无定向分布,局部定向特征明显,矿化不明显(图6b, 6f, 6g)。通过野外与镜下观察可知,该期为三道明水矿区提供了约90%的Cu和85%的Zn资源量。该期矿体中Cu的品位为0.40%~1.28%,平均值为0.68%,Zn的品位为1.00%~3.51%,平均品位为1.25%。

3.3 成矿晚期

成矿晚期主要矿物为石英、黄铜矿、方解石,并有少量的绿泥石、绿帘石、黄铁矿、辉钼矿和闪锌矿(图4)。该阶段矿物主要呈脉状产出,无明显变形。黄铜矿呈石英-黄铜矿±辉钼矿脉状产出,脉宽2~15 cm,黄铜矿呈它形粒状,粒径多在0.5~2 cm;辉钼矿呈自形片状,粒径多在0.5 mm以下(图6h)。绿帘石、绿泥石常呈石英±绿帘石±绿泥石脉、绿帘石脉、绿泥石细脉等产出(图6f),脉体多在1~5 mm,绿帘石常呈自形粒状,粒径约为0.1~0.5 mm,绿泥石多呈它形片状分布,粒径约为0.1~0.5 mm。方解石通常呈它形、粒状,粒径<0.2 mm,多以脉状形式出现(图6g)。该期脉状矿体在强、弱韧性剪切带内均有出现,为三道明水矿区提供了少量的Cu和Zn资源。

4 矿床成因初探

4.1 早期矿化类型及可能时限

笔者认为三道明水矿床早期矿化可能为火山成因块状硫化物矿化。火山成因块状硫化物矿床(VMS)产于大洋中脊、火山岛弧、洋内弧后、陆缘弧后和大陆裂谷等伸展构造背景下,是全球Zn、Pb、Cu、Au、Ag等金属资源的重要来源。Lydon(1988)通过研究全球多个VMS型矿床,提出该类矿床是由上部与地层整合的块状硫化物矿体与下部不整合的脉状、浸染状矿体组成;上部块状矿体中,由下到上黄铁矿-黄铜矿±磁黄铁矿含量逐渐减少,闪锌矿±方铅矿±重晶石含量逐渐增加,伴随蚀变主要为硅化、黄铁矿化、绢英岩化、重晶石化等。而下部脉状、浸染状矿化中,从由中心向外,黄铜矿-黄铁矿组合逐渐变为黄铁矿-闪锌矿±方铅矿组合,伴随蚀变主要为绿泥石、绢云母化。中亚造山带已发现的古生代VMS型矿床(如阿舍勒Cu-Zn矿、小热泉子Cu-Zn矿及红海Zn-Cu矿等)的蚀变及矿化特征与上述模型较为一致。三道明水Cu-Zn矿床早期矿化同样呈浸染状、脉状分布,矿体呈透镜状,矿化过程伴有绢英岩化、黄铁矿化、硅化、碳酸盐化、绿泥石化、绿帘石化等多种蚀变,与同期典型VMS矿床下部特征相似,但缺失上部块状矿体,这可能是因为风化剥蚀的原因(图7a)。

在成矿时代方面,三道明水早期Cu-Zn矿化赋存于公婆泉组地层中,矿区南部公婆泉组钠长阳起片岩(变质安山岩)锆石U-Pb同位素年龄为430.9±4.7 Ma(潘志龙等,2016^①)、区域北部的尖山地区公婆泉组斜长角闪片岩(变质玄武岩)锆石U-Pb同位素年龄为436.0±2.9 Ma(潘志龙等,2016^①)、基东东部公婆泉组一岩段黑云斜长变粒岩(变质火山岩)锆石U-Pb同位素年龄为447.9±8.4 Ma(潘志龙等,2016^①)、公婆泉铜矿二矿区公婆泉组火山岩全岩Rb-Sr等时线年龄为415~408 Ma(王伏泉,1998)。这些证据表明公婆泉组地层的形成时限为晚奥陶世-晚志留世。前人研究表明,VMS型矿床矿化与火山岩地层近乎同时形成(毛启贵等,2010),由此推测三道明水成矿早期Cu-Zn矿化应形成于晚奥陶世-晚志留世。

① 潘志龙,刘增校,魏文通. 2016. 内蒙古基东等四幅1:5万区域地质调查报告.

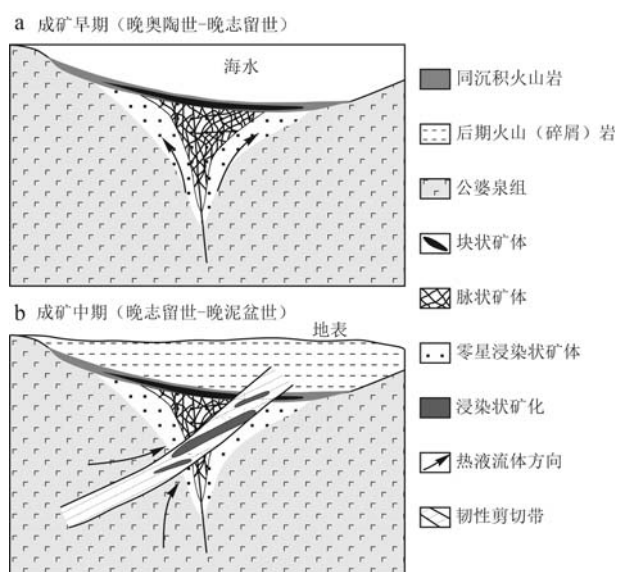


图7 三道明水 Cu-Zn 矿成矿模式图

Fig. 7 Metallogenic schematic model of the Sandaomingshui Cu-Zn deposit

成矿构造背景方面,虽然大洋中脊及弧后被认为是最有利于形成 VMS 型矿床的环境,世界上绝大多数 VMS 矿床均形成于这些构造背景中。但在中亚造山带中,古生代 VMS 型矿床却多形成于岛弧环境中(表 1)。在北山地区,王盛栋(2017)通过岩石地球化学、年代学、地层学及古生物研究,认为红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿岩带为南天山缝合带的东

延,而芨芨台子-小黄山蛇绿混杂岩带中辉长岩、玄武岩均形成于石炭纪弧后盆地环境中(宋泰忠等, 2008; 李向民等, 2012; Zheng *et al.*, 2013)。位于两条蛇绿岩带之间的窑洞努如-公婆泉-白云山-东七一山带中,岩浆岩大多具有岛弧岩浆特征(东七一山地区为微陆块; 聂凤军等, 2002b),形成于岛弧环境(戴霜等, 2003; 王立社等, 2009; 于明杰等, 2014; Song *et al.*, 2017)。因此,赋存于公婆泉组火山岩中的三道明水早期 Cu-Zn 矿化与中亚造山带中古生代 VMS 矿床形成环境一致,均为岛弧环境(杨晖, 2012; 王盛栋, 2017)。

赋矿围岩方面,三道明水矿床与阿舍勒、小热泉子及红海等矿床相似,均赋存于一套古生代火山岩-火山碎屑岩-火山沉积岩-沉积岩中。

以上对比表明,三道明水早期 Cu-Zn 矿化与同产于中亚造山带的阿舍勒、小热泉子、红海等矿床在蚀变与矿化特征、大地构造背景、赋矿围岩及成矿时代方面均较为相似。因此,可认为三道明水早期 Cu-Zn 矿化为 VMS 型矿化。

4.2 中、晚期矿化类型及可能时限

通过对比北山地区典型矿床的特征可以发现(表 2),早古生代主要形成以公婆泉为代表的 Cu 矿床和以东七一山为代表的萤石矿;前者被认为形成于岛弧环境(杨晖, 2012),后者被认为形成于哈萨克斯坦-北山板块早古生代解体而成的古陆块内(聂

表 1 三道明水矿床与中亚造山带内典型 VMS 矿床特征对比

Table 1 Comparison of the characteristics of the Sandaomingshui deposit with the typical VMS deposits in the CAO

矿床	新疆阿舍勒	新疆小热泉子	新疆红海	内蒙古三道明水(早期)
矿化类型	Cu-Zn	Cu-Zn	Zn-Cu	Cu-Zn
规模	大型	中型	中型	中型
品位	Cu: 2.46%, Zn: 2.93%	Cu: 0.52%~1.61%, Zn: 0.44%~1.92%	Cu: 1.49%, Zn: 3.51%	Cu: 0.64%~3.42%, Zn: 1.37%~5.36%
大地构造背景	岛弧	岛弧	岛弧	岛弧
矿化特征	细脉浸染状、脉状	条带状、条纹状、块状、浸染状、细脉状、网脉状	块状、脉状及浸染状矿化	浸染状、脉状
矿体形态	层状	透镜状、似层状	透镜状	透镜状
赋矿围岩	玄武岩、凝灰岩、沉凝灰岩、灰岩等	火山凝灰岩、安山-英安质火山岩、凝灰质砂岩	英安质熔结凝灰岩、凝灰质角砾岩、沉凝灰岩	玄武岩、安山岩、玄武安山岩、石英安山岩、富钙镁泥质碎屑岩
蚀变特征	硅化、黄铁绢英岩化、青磐岩化、重晶石化、钠长石化、碳酸盐化	硅化、碳酸盐化、绿泥石化、绢英岩化等	绿泥石化、黄铁绢英岩化及重晶石化	绢英岩化、黄铁矿化、硅化、碳酸盐化、绿泥石化、绿帘石化等
成矿时代	约 390~380 Ma	约 354 Ma	约 420 Ma	晚奥陶世-晚志留世
文献来源	Yang <i>et al.</i> , 2018	Yang <i>et al.</i> , 2018; 杨富全等, 2021	毛启贵等, 2015; 黄健瀚等, 2016	本文

表 2 北山地区代表性矿床特征对比

Table 2 Comparison of the characteristics of representative deposits in the Beishan

矿床	公婆泉	东七一山	东七一山	拾金坡	小狐狸山	三道明水(中期)
矿种	Cu	W-Sn 多金属矿	萤石	Au	Mo	Cu-Zn
规模	中型	大型	大型	中型	大型	中型
形成时代	晚志留世-晚泥盆世	约 355 Ma	约 510 Ma	约 365 Ma	约 220 Ma	晚志留世-晚泥盆世
矿体形态	透镜状, 少量不规则	透镜状	脉状	大脉状、脉状、透镜状	带状	层状、似层状
矿体分布特征	与韧性剪切平行, 与岩体关系不明显	主要分布在花岗岩与围岩接触带	似斑状岩体及其附近前寒武变质岩地层中	复式花岗岩边部	花岗岩边缘相及过渡相	强韧性剪切带内
矿化相关蚀变	云英岩化	矽卡岩化、角岩化、硅化、叶腊石化、萤石化	硅化、高岭石化、碳酸盐化、绿泥石化和绢云母化	硅化、绢云母化、黄铁矿化、绿泥石化	黄铁矿化、硅化、云英岩化、绿帘石化、萤石化等	绢英岩化、绿泥石、绿帘石化
参考文献	杨晖, 2012	张善明等, 2014	聂凤军等, 2002b	朱江等, 2013;	王继春等, 2014	本文

凤军等, 2002b)。这些矿床在形成之后经历了志留纪末哈萨克板块与塔里木板块沿红柳河-牛圈子-洗肠井一带的碰撞造山、碰撞后伸展等过程(杨岳清等, 2013), 常遭受后期构造-岩浆-成矿过程的叠加和改造。在公婆泉矿区, 存在 3 期成矿作用, 3 期 Cu 矿化分别与 3 期韧性剪切作用密切相关, 矿化伴随有云英岩化蚀变。在公婆泉 Cu 矿化形成之前, 晚奥陶世细粒英云闪长岩(452.5 ± 3.2 Ma; 潘志龙等, 2016^①)、公婆泉组火山岩(415 ~ 409 Ma; 王伏泉, 1998)发生了明显的韧性剪切作用; 在 Cu 矿化之后, 矿区有晚泥盆世中粒英云闪长岩(358 ± 2 Ma; 潘志龙等, 2016^①)、细粒辉长岩(361.75 ± 0.97 Ma; 潘志龙等, 2016^①)侵入地层, 且侵入体整体变形、矿物定向特征不明显(潘志龙等, 2016^①)。在东七一山矿区, W-Sn 多金属矿化形成于约 355 Ma, 此时矿区主要形成张性断裂(张善明等, 2014)。此外, 在石板井地区, 韧性剪切带内岩石锆石 U-Pb 年龄为 405 Ma, 而该区 363 Ma 的中粒花岗闪长岩未发生变形(张欢等, 2021)。在拾金坡造山型金矿区, 绢云母 Ar-Ar 定年显示韧性剪切带形成于 364.6 ± 3 Ma; 该矿床被认为其形成于碰撞造山作用晚期挤压-伸展转换环境中(朱江等, 2013)。由此可以推断, 北山地区哈萨克斯坦板块与塔里木板块间的碰撞发生在 365 Ma 以前, 在此过程中形成了大量的韧性剪切带; 此后, 北山地区可能进入了碰撞后伸展阶段, 构造作用以脆性构造为主(王继春等, 2014)。

三道明水成矿中期是 Cu-Zn 的主要矿化阶段, 该阶段矿区岩石发生明显的韧性变形及绢英岩化, 矿石片理发育(图 6a, 6b); 黄铜矿、闪锌矿主要呈

浸染状沿片理分布在强绢英岩化带中; 矿石中早期所形成硫化物在该阶段被溶蚀、交代(图 6e)。在该期成矿带外, 岩石剪切作用较弱, 且通常有磁铁矿、绿泥石、绿帘石蚀变, 这可能是由于强剪切过程中暗色矿物分解, Fe 元素迁出, 在外带应力较弱的部位重新结晶的所致。这些特征表明韧性剪切作用控制着该期的 Cu-Zn 矿化, 并叠加和改造早期 VMS 型矿化(图 7b)。三道明水中期 Cu-Zn 矿化与公婆泉 Cu 矿在大地构造背景、矿床成因、矿体形态及蚀变特征等方面具有高度的相似性, 暗示其可能形成于同期韧性剪切作用中。由此, 可认为在三道明水 Cu-Zn 矿床, 成矿中期矿化与韧性剪切作用同时形成, 该阶段成矿可能在晚志留世-晚泥盆世。

成矿晚期石英-黄铜矿±辉钼矿脉状、石英±绿帘石±绿泥石脉、绿帘石脉、绿泥石细脉及方解石脉等, 均沿张性裂隙填充(图 6f, 6g, 6h), 且切穿成矿早期及中期蚀变的围岩(图 6f, 6g), 表明其形成于 365 Ma 之后, 可能与矿区后期岩浆作用相关。

5 结论

(1) 三道明水 Cu-Zn 矿床的蚀变及矿化可以划分为早、中、晚 3 期, 早期为 VMS 型矿化, 中期为韧性剪切作用驱动下的热液成矿, 晚期为岩浆热液沿张性裂隙充填成矿; Cu-Zn 矿化主要形成于中期。

(2) 三道明水矿床早期矿化形成于晚奥陶世-晚志留世; 中期矿化可能形成于晚志留世-晚泥盆世, 而晚期矿化可能形成于 365 Ma 以后。

① 潘志龙, 刘增校, 魏文通. 2016. 内蒙古基东等四幅 1:5 万区域地质调查报告.

致谢 本研究基于内蒙古自治区额济纳旗三道明水北矿区北段铜锌矿勘探工作展开,地质找矿工作得到了内蒙古地质勘查有限责任公司鹿建华、王海宽和项目组成员的帮助;中国地质科学院地质研究所杨志明研究员对该矿床成因的确定及论文的写作提出了建设性的意见;室内研究得到了中国地质科学院地质研究所孙茂好博士、董磊磊博士的帮助;评审专家对论文提出了宝贵的修改意见;在此一并表示感谢!

References

- Chen Chao, Xiu Di, Pan Zhilong, *et al.* 2017. Early Paleozoic crustal extensional tectonic regime in the central part of Beishan orogenic belt: New evidence from geochronology and geochemistry of gabbro in Shibanjing[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(8): 1 661~1 673(in Chinese with English abstract).
- Dai Shuang, Fang Xiaomin, Zhang Xiang, *et al.* 2003. Island arc north of the Tarim-SK plate the geology and geochemistry of Gongpoquan Group[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 39(4): 80~88(in Chinese with English abstract).
- Dai Shuang, Ren Yuzhi, Cheng Yu, *et al.* 2002. The ore-bearing porphyry at island-arc in the Gongpoquan copper deposit, its geology and geochemistry[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 38(5): 100~107(in Chinese with English abstract).
- He Shiping, Ren Bingshen, Yao Wenguang, *et al.* 2002. The division of tectonic units of Beishan area, Gansu-Inner Mongolia[J]. *Northwestern Geology*, 35(4): 30~40(in Chinese with English abstract).
- Hou Qingye, Wang Zhong, Liu Jinbao, *et al.* 2012. Geochemistry characteristics and SHRIMP dating of Yueyashan ophiolite in Beishan orogen[J]. *Geoscience*, 26(5): 1 008~1 018(in Chinese with English abstract).
- Hu Xinzhuo, Zhao Guochun, Hu Xinyue, *et al.* 2015. Geological characteristics, formation epoch and geotectonic significance of the Yueyashan ophiolitic tectonic mélange in Beishan area, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(2~3): 425~436(in Chinese with English abstract).
- Huang Jianhan, Chen Huayong, Han Jinsheng, *et al.* 2016. Spacial and temporal characteristics of mineralization and alteration zonation of the Honghai VMS Cu-Zn deposit in the Kalatag District, East Tianshan, NW China[J]. *Geochemica*, 45(6): 582~600(in Chinese with English abstract).
- Jiang Hanbing, Yang Hequn, Dong Fuchen, *et al.* 2012. Division of metallogenic unit in the East Tianshan-Beishan area[J]. *Northwestern Geology*, 45(3): 1~11(in Chinese with English abstract).
- Li Xiangmin, Yu Jiyan, Wang Guoqiang, *et al.* 2012. Geochronology of Jijitai ophiolite in Beishan area, Gansu Province, and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(12): 2 025~2 031(in Chinese with English abstract).
- Liu Xueya and Wang Quan. 1995. Tectonic evolution of the Beishan orogenic belt in western China[J]. *Geoscientific Research*, 28: 37~38(in Chinese with English abstract).
- Lü Bo, Yang Yueqing, Meng Guixiang, *et al.* 2011. Geochemical characteristics and petrogenesis of Dongqiyishan alkali feldspar granite, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(3): 543~552(in Chinese with English abstract).
- Lydon J. 1988. Ore deposit models #14. Volcanogenic massive sulphide deposits Part 2: Genetic models[J]. *Geoscience Canada*, 15(1): 43~65.
- Mao Jingwen, Zhou Zhenhua, Wu Guang, *et al.* 2013. Metallogenic regularity and minerogenetic series of ore deposits in Inner Mongolia and adjacent areas[J]. *Mineral Deposits*, 32(4): 715~729(in Chinese with English abstract).
- Mao Qigui, Fang Tonghui, Wang Jingbin, *et al.* 2010. Geochronology studies of the Early Paleozoic Honghai massive sulfide and its geological significance in Kalatage area, eastern Tianshan Mountain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 3 017~3 026(in Chinese with English abstract).
- Mao Qigui, Wang Jingbin, Fang Tonghui, *et al.* 2015. Lead and sulfur isotope studies of sulfides from Honghai VMS-type deposit in Kalatage ore belt of eastern Tianshan Mountains[J]. *Mineral Deposits*, 34(4): 730~744(in Chinese with English abstract).
- Mossakovskii A A, Ruzhentsev S V, Samygin S G, *et al.* 1993. Central Asian Foldbelt: Geodynamic evolution and formation history[J]. *Geotektonika*, 6: 3~32(in Russian).
- Nie Fengjun, Jiang Sihong, Bai daming, *et al.* 2002a. Metallogenic Regularity and Prospecting Direction of Metal Deposits in Beishan Area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 118~259(in Chinese).
- Nie Fengjun, Jiang Sihong, Liu Yan, *et al.* 2002b. Sm-Nd isotopic dating of fluorite separates from Dongqiyishan fluorite deposit, Alxa, Western Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 21(1): 10~15(in Chinese with English abstract).
- Şengör A M C and Natal'in B A. 1996. Turkic-type orogeny and its role in the making of the continental crust[J]. *Annual Review of Earth and*

- Planetary Sciences, 24: 263~337.
- Song Dongfang, Xiao Wenjiao, Han Chunming, *et al.* 2017. Geochronological and geochemical study of gneiss-schist complexes and associated granitoids, Beishan Orogen, southern Altaids [J]. International Geology Review, 55(14): 1 705~1 727.
- Song Dongfang, Xiao Wenjiao, Windley Brian F, *et al.* 2016. Metamorphic complexes in accretionary orogens: Insights from the Beishan collage, southern Central Asian Orogenic Belt[J]. Tectonophysics, 688: 135~147.
- Song Taizhong, Wang Jin, Lin Hai, *et al.* 2008. The geological features of opiolites of Xiaohuangshan in Beishan area, Inner Mongolia [J]. Northwestern Geology, 41(3): 55~63 (in Chinese with English abstract).
- Tian Zhonghua, Xiao Wenjiao and Windley B F. 2014. Structure, age and tectonic development of the Huoshishan-Niujuanzi ophiolitic mélange, Beishan, southernmost Altaids [J]. Gondwana Research, 25(2): 820~841.
- Tian Zhonghua, Xiao Wenjiao and Windley B F. 2017. Carboniferous rifted arcs leading to an archipelago of multiple arcs in the Beishan-Tianshan orogenic collages (NW China) [J]. International Journal of Earth Sciences, 106(7): 2 319~2 342.
- Wang Dawei, Zou Zhiping and Li Shaoxiong. 1995. On the ore-forming geological features and ore deposit genesis of Gongpoquan copper deposit, Gansu province [J]. Northwest Geoscience, 16(1): 116~122 (in Chinese with English abstract).
- Wang Fuquan. 1998. The Rb-Sr isochron ages of whole rock and its tectono-metallogenetic meaning of the volcanic rocks in the second mining area of the Gongpoquan copper deposit [J]. Geotectonica et Metallogenia, 22: 23~27 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jichun, Xiao Rongge, Wang Jingfan, *et al.* 2014. The metallogenic type of the Xiaohulishan molybdenum polymetallic ore deposit in the Beishan area, Inner Mongolia and prospecting direction [J]. Geology and Exploration, 50(5): 921~931 (in Chinese with English abstract).
- Wang Lishe, Yang Jianguo, Wang Yuxi, *et al.* 2009. Isotopic dating of basalt from Gongpoquan Group in Yingmaotuo area of the Beishan Mountain, Gansu Province, and its geological significance [J]. Earth Science, 30(3): 363~368 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shengdong. 2017. Reconstruction of Paleozoic Ocean Plate Stratigraphy in the Middle Beishan Area, Gansu Province [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 1~155 (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 [J]. Journal of the Geological Society, 164: 31~47.
- Xiao Wenjiao, Mao Qigui, Windley Brian F, *et al.* 2010. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage [J]. American Journal of Science, 310: 1 553~1 594.
- Yang Fuquan, Geng, Xinxia, Wang Rui, *et al.* 2018. A synthesis of mineralization styles and geodynamic settings of the Paleozoic and Mesozoic metallic ore deposits in the Altay Mountains, NW China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 159: 233~258.
- Yang Fuquan, Geng Xinxia, Wu Feng, *et al.* 2021. VMS deposits in the northern Xinjiang: Geological characteristics and metallogeny [J]. Earth Science, Doi: 10. 3799/dqkx. 2021. 118 (in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Bierlein F P, *et al.* 2009. A review of the geological characteristics and geodynamic mechanisms of Late Paleozoic epithermal gold deposits in North Xinjiang, China [J]. Ore Geology Reviews, 35: 217~234.
- Yang Hequn, Li Ying, Li Wenming, *et al.* 2008. General discussion on metallogenetic tectonic setting of Beishan mountain, Northwestern China [J]. Northwestern Geology, 41(1): 26~32 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hequn, Li Ying, Yang Jianguo, *et al.* 2006. Main metallogenic characteristics in the Beishan orogen [J]. Northwestern Geology, 39(2): 78~96 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hequn, Li Ying, Zhao Guobin, *et al.* 2010. Character and structural attribute of the Beishan ophiolite, Northwestern China [J]. Northwestern Geology, 43(1): 26~36 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hui. 2012. Metallogenic Environment and Discussion on Genetic Type of Gongpoquan Copper Deposit, in Beishan Area, Gansu Province [D]. Xi'an: Chang'an University (in Chinese with English abstract).
- Yang Yueqing, Lü Bo, Meng Guixiang, *et al.* 2013. Geochemistry, SHRIMP zircon U-Pb dating and formation environment of Dongqiyishan granite, Inner Mongolia [J]. Acta Geoscientica Sinica, 34(2): 163~175 (in Chinese with English abstract).
- Ye Tianzhu, Wei Changshan and Wang Yuwang. 2017. Theory and Method of Prospecting Prediction in Exploration Area [M]. Beijing: Geological Publishing House, 140~141 (in Chinese).
- Yu Mingjie, Mao Qigui, Fang Tonghui, *et al.* 2014. Geochemical characteristics, zircon U-Pb ages and Hf isotopic characteristics of the ore-bearing porphyry in the Gongpoquan copper deposit [J]. Geology

and Exploration, 50(1): 145~155 (in Chinese with English abstract).

Zhang Farong and Niu Maosheng. 2003. Divisions and basic features of the metallogenic belts in Beishan area of Gansu Province[J]. Acta Geologica Gansu, 12(1): 50~57 (in Chinese with English abstract).

Zhang Huan, Wang Hui, Pan Zhilong, *et al.* 2021. Geochronological constraints and deformation of the western section of Shibanjing ductile shear zone in Beishan, Inner Mongolia[J]. Geological Bulletin of China, 40(6): 930~941 (in Chinese with English abstract).

Zhang Shanming, Wang Tingyuan, Zhang Hua, *et al.* 2014. Ore-controlling factors and geological features of the W-Sn polymetallic ore deposits in East Qiyi Shan, Inner Mongolia[J]. Geology and Exploration, 50(6): 1 038~1 049 (in Chinese with English abstract).

Zhang Ying. 2012. Geological and Geochemical Characteristics and Mineralization of Gongpoquan Copper in Beishan, Gansu[D]. Xi'an: Chang'an University (in Chinese with English abstract).

Zhang Yulian, Xu Rongke, Shan Liang, *et al.* 2012. Rock-forming and ore-forming ages of the Xiaohulishan molybdenum deposit in Beishan area, Inner Mongolia[J]. Geological Bulletin of China, 31(2~3): 469~475 (in Chinese with English abstract).

Zhao Yun, Xue Chunji, Zhao Xiaobo, *et al.* 2016. Origin of anomalously Ni-rich parental magmas and genesis of the Huangshannan Ni-Cu sulfide deposit, Central Asian Orogenic Belt, Northwestern China [J]. Ore Geology Reviews, 77: 57~71.

Zheng Rongguo, Wu Tairan and Zhang Wen, *et al.* 2013. Late Paleozoic subduction system in the southern Central Asian Orogenic Belt: Evidences from geochronology and geochemistry of the Xiaohuangshan ophiolite in the Beishan orogenic belt [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 62: 463~475.

Zhu Jiang, Lü Xinbiao, Mo Yalong, *et al.* 2013. Ore genesis of the Shijinpo gold deposit in Gansu province, NW China: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, ore-forming fluid and H-O-S isotopes constrains [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 43(2): 427~439 (in Chinese with English abstract).

Zuo Guochao and He Guoqi. 1990. Beishan Plate Tectonics and Metallogenic Regularity[M]. Beijing: Peking University Press, 2~7 (in Chinese).

Zuo Guochao, Liu Yike and Liu Chunyan. 2003. Framework and evolution of the tectonic structure in Beishan area across Gansu province, Xinjiang Autonomous Region and Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Acta Geologica Gansu, 12(1): 2~16 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈超,修迪,潘志龙,等. 2017. 北山造山带中部早古生代伸展构造体制: 来自石板井辉长岩的年代学及地球化学证据[J]. 地质学报, 91(8): 1 661~1 673.

戴霜,方小敏,张翔,等. 2003. 塔里木-中朝板块北缘的志留纪岛弧-公婆泉群火山岩地质地球化学及构造意义[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 39(4): 80~88.

戴霜,任育智,程彧,等. 2002. 公婆泉铜矿岛弧型含矿斑岩地质化学特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 38(5): 100~107.

何世平,任秉琛,姚文光,等. 2002. 甘肃内蒙古北山地区构造单元划分[J]. 西北地质, 35(4): 30~40.

侯青叶,王忠,刘金宝,等. 2012. 北山月牙山蛇绿岩地球化学特征及 SHRIMP 定年[J]. 现代地质, 26(5): 1 008~1 018.

胡新苗,赵国春,胡新悦,等. 2015. 内蒙古北山地区月牙山蛇绿岩构造混杂岩带地质特征、形成时代及大地构造意义[J]. 地质通报, 34(2~3): 425~436.

黄健瀚,陈华勇,韩金生,等. 2016. 新疆东天山卡拉塔格红海 VMS 铜锌矿床蚀变与矿化时空分布特征[J]. 地球化学, 45(6): 582~600.

姜寒冰,杨合群,董福辰,等. 2012. 东天山-北山地区成矿单元划分[J]. 西北地质, 45(3): 1~11.

李向民,余吉远,王国强,等. 2012. 甘肃北山地区芨芨台子蛇绿岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. 地质通报, 31(12): 2 025~2 031.

刘雪亚,王荃. 1995. 中国西部北山造山带的大地构造及其演化[J]. 地学研究, 28: 37~38.

吕博,杨岳清,孟贵祥,等. 2011. 内蒙古东七一山碱长花岗岩的地球化学特征和成因[J]. 岩石矿物学杂志, 30(3): 543~552.

毛景文,周振华,武广,等. 2013. 内蒙古及邻区矿床成矿规律与成矿系列[J]. 矿床地质, 32(4): 715~729.

毛启贵,方同辉,王京彬,等. 2010. 东天山卡拉塔格早古生代红海块状硫化物矿床精确定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 26(10): 3 017~3 026.

毛启贵,王京彬,方同辉,等. 2015. 东天山卡拉塔格矿带红海 VMS 型矿床 S、Pb 同位素地球化学研究[J]. 矿床地质, 34(4): 730~744.

聂风军,江思宏,白大明,等. 2002a. 北山地区金属矿床成矿规律及找矿方向[M]. 北京:地质出版社, 118~259.

聂风军,江思宏,刘妍,等. 2002b. 阿拉善东七一山大型萤石矿床

- 萤石-钨同位素年龄及地质意义[J]. 矿床地质, 21(1): 10~15.
- 宋泰忠, 王瑾, 林海. 2008. 内蒙古北山地区小黄山蛇绿岩地质特征[J]. 西北地质, 41(3): 55~63.
- 王大为, 邹治平, 李绍雄. 1995. 甘肃公婆泉铜矿成矿地质特征及矿床成因[J]. 西北地质科学, 16(1): 116~122.
- 王伏泉. 1998. 公婆泉铜矿二矿区火山岩的全岩 Rb-Sr 等时线年龄及其构造-成矿意义[J]. 大地构造与成矿学, 22: 23~27.
- 王继春, 肖荣阁, 王竞繁, 等. 2014. 北山地区小狐狸山钨多金属矿床成矿类型探讨及其找矿方向[J]. 地质与勘探, 50(5): 921~931.
- 王立社, 杨建国, 王育习, 等. 2009. 甘肃北山营毛沱地区公婆泉群中玄武岩同位素定年及其地质意义[J]. 地球学报, 30(3): 363~368.
- 王盛栋. 2017. 甘肃北山中部地区古生代洋板块地层重建与构造演化[D]. 武汉: 中国地质大学, 1~155.
- 杨富全, 耿新霞, 武峰, 等. 2021. 新疆北部 VMS 矿床地质特征及成矿规律[J]. 地球科学, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20210830.1330.008.html>.
- 杨合群, 李英, 李文明, 等. 2008. 北山成矿构造背景概论[J]. 西北地质, 41(1): 26~32.
- 杨合群, 李英, 杨建国, 等. 2006. 北山造山带的基本成矿特征[J]. 西北地质, 39(2): 78~96.
- 杨合群, 李英, 赵斌国, 等. 2010. 北山蛇绿岩特征及构造属性[J]. 西北地质, 43(1): 26~36.
- 杨晖. 2012. 甘肃北山公婆泉铜矿成矿环境及矿床成因类型探讨[D]. 西安: 长安大学.
- 杨岳清, 吕博, 孟贵祥, 等. 2013. 内蒙古东七—山花岗岩地球化学、锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及岩体形成环境探讨[J]. 地球学报, 34(2): 163~175.
- 叶天竺, 韦昌山, 王玉往. 2017. 勘查区找矿预测理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 140~141.
- 于明杰, 毛启贵, 方同辉, 等. 2014. 甘肃公婆泉铜矿床含矿斑岩体地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征研究[J]. 地质与勘探, 50(1): 145~155.
- 张发荣, 牛卵胜. 2003. 甘肃北山地区成矿带划分及基本特征[J]. 甘肃地质学报, 12(1): 50~57.
- 张欢, 王慧, 潘志龙, 等. 2021. 内蒙古北山地区石板井韧性剪切带西段变形特征及年龄约束[J]. 地质通报, 40(6): 930~941.
- 张善明, 王庭院, 张华, 等. 2014. 内蒙古东七—山钨锡多金属矿床成矿特征与控矿因素分析[J]. 地质与勘探, 50(6): 1 038~1 049.
- 张颖. 2012. 甘肃北山公婆泉铜矿地质地球化学特征及成矿作用研究[D]. 西安: 长安大学.
- 张雨莲, 许荣科, 陕亮, 等. 2012. 内蒙古北山地区小狐狸山钨矿辉钨矿 Re-Os 年龄和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 31(2~3): 469~475.
- 朱江, 吕新彪, 莫亚龙, 等. 2013. 甘肃拾金坡金矿床成因: 来自 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年、成矿流体及 H-O-S 同位素证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(2): 427~439.
- 左国朝, 何国琦. 1990. 北山板块构造及成矿规律[M]. 北京: 北京大学出版社, 2~7.
- 左国朝, 刘义科, 刘春燕. 2003. 甘新蒙北山地区构造格局及演化[J]. 甘肃地质学报, 12(1): 2~16.