

# 内蒙古红岭铅锌-多金属矿床二叠系火山碎屑岩中 硫化物压力影的发现及成矿意义

单小瑀<sup>1</sup>, 谢玉玲<sup>1</sup>, 陈佳德<sup>2</sup>, 任国顺<sup>2</sup>, 魏良民<sup>2</sup>, 于超<sup>1</sup>, 柳爱新<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 赤峰山金红岭有色金属矿业有限责任公司, 内蒙古 赤峰 025420)

**摘要:** 内蒙古东部的黄岗-甘珠尔庙锡、铜多金属成矿带中发育多个与燕山期岩浆活动有关的富铜的锡多金属矿床, 如大井子、安乐、毛登和敖脑达坝等, 矿床的主要围岩为二叠系的页岩和板岩, 但对二叠系地层与成矿的关系目前仍存在不同认识。本文以红岭铅锌-多金属矿床为研究对象, 通过详细的野外地质调研、显微岩矿相、SEM/EDS、硫化物的原位微区元素和同位素分析等, 对矿区二叠系黑色板岩及其中的硫化物压力影进行了详细工作。结果表明, 红岭矿床主要赋矿围岩为二叠系黑色板岩和大理岩, 其中黑色板岩的原岩为晶屑凝灰岩, 碎屑以石英、钾长石晶屑为主, 并可见少量浆屑和锆石、磷灰石、铬铁尖晶石等晶屑, 胶结物主要由黑云母、石英和钾长石组成。岩石经历了明显的轴向为NE向的褶皱变形, 其中构造片理发育, 走向与区域构造线方向一致。黑色板岩中顺岩石层理可见压力影构造, 其核部由磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿组成, 影子矿物主要为石英和绿泥石。压力影中影子矿物的延伸方向与岩石片理方向一致, 为NE向, 可被成矿期的热液脉体穿切, 表明其核部矿物形成与地层同期, 为同生成因, 并经历了成岩后的挤压变形。压力影中硫化物的原位硫同位素组成(-0.33‰ ~ +1.75‰)与前人获得的矿石中硫化物的S同位素组成一致, 表明其可能为成矿提供了部分S和Cu等成矿物质。这一认识不仅对理解区内富铜多金属矿床的成矿物质来源提供了重要依据, 同时对指导区域找矿具有指导意义。

**关键词:** 红岭铅锌-多金属矿床; 二叠系火山碎屑岩; 压力影; 原生矿化; 成矿物质来源

中图分类号: P618.4; P578.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)04-0555-13

## The discovery of sulfide pressure shadow and their metallogenic significance in Hongling Pb-Zn-polymetallic deposit, Inner Mongolia

SHAN Xiao-yu<sup>1</sup>, XIE Yu-ling<sup>1</sup>, CHEN Jia-de<sup>2</sup>, REN Guo-shun<sup>2</sup>, WEI Liang-min<sup>2</sup>, YU Chao<sup>1</sup> and  
LIU Ai-xin<sup>2</sup>

(1. Civil and Resource Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Chifeng Hongling Nonferrous Mining Co. Ltd. (Shandong Gold Group), Chifeng 025420, China)

**Abstract:** A series of Yanshanian magmatic hydrothermal Cu, Sn polymetal deposits have been reported in Eastern Inner Mongolia Huang Gang-Ganzhuermiao tin and copper polymetallic metallogenic belt, such as Dajingzi, Anle, Maodeng and Aonaodaba. These deposits are mainly hosted in Permian, but the genetic link between Permian and metallogeny is still unknown. Based on our new discovery of sulfide pressure shadow in Permian slate and detailed petrographic and SEM/EDS, in-situ isotopic results, this paper discusses the genesis Permian wall rock in Hongling

收稿日期: 2023-01-15; 接受日期: 2023-06-20; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0601302)

作者简介: 单小瑀(1990-), 女, 博士研究生, 研究方向为矿床学, E-mail: xy\_shan928@126.com; 通讯作者: 谢玉玲(1963-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事矿床学和矿床地球化学研究, E-mail: yulingxie63@hotmail.com。

Pb-Zn-polymetallic deposit and their contribution to Cu, Zn skarn in the area. The results show that the main wall rock of Hongling deposit are Permian marine volcanic and sedimentary rocks. The slate of the deposit has a slightly deformed volcanic origin, and shows pyroclastic texture and with mainly quartz, K-feldspar as the pyroclasts with minor zircon, apatite, ilmenite, and spinel pyroclasts. The cement composed of micro-grained biotite, quartz, K-feldspar, and plagioclase. The pressure shadow comprises a sulfide core and a quartz and chlorite shadow trending along the schistosity of the slate and deformed together with the bedding. The pressure can be crosscut by hydrothermal vein of main ore-stage which shows no fold deformation. The sphalerite and chalcopyrite in the shadow and their similar S isotopic composition ( $-0.33\text{‰} \sim +1.75\text{‰}$ ) with the sulfide in skarn ore implying a contribution of Permian to the mineralization in the area. The results are helpful for understanding the Cu and Zn mineralization in the area and have important guiding to regional exploration.

**Key words:** Hongling Pb-Zn-polymetallic deposit; Permian pyroclastic rocks; pressure shadow; primary mineralization; source of the ore-forming materials

**Fund support:** National Key Research and Development Program of China (2017YFC0601302)

矿床地质是矿床学研究的基础,其中赋矿围岩性质和岩石成因是研究成矿构造背景、区域构造演化和成矿物质来源的重要依据。红岭铅锌-多金属矿床位于内蒙古中部,是黄岗-甘珠尔庙 Sn-Fe-Cu-Pb-Zn-Ag 多金属成矿带内一处重要的铅锌多金属矿床。目前该带内已发现有白音诺尔铅锌矿、黄岗梁铁锡矿、维拉斯托锡铜矿、拜仁达坝银铅锌矿、红岭(浩布高)铅锌-多金属矿、双尖子山铅锌银矿等一系列大、中型矿床,具有重要的资源潜力。区内已发现的矿床类型包括矽卡岩型(如白音诺尔、红岭、黄岗梁)、热液脉型(如大井、布金黑、拜仁达坝、双尖子山、白音查干)和斑岩型(如东山湾、敖仑花、小东沟)等,其中矽卡岩型和热液脉型铅锌多金属矿床是该成矿带最主要的工业类型(张德全, 1989)。成矿年代学资料表明,大兴安岭南段的成矿主要集中在燕山期,例如双尖子山铅锌银矿床[ $131.4 \pm 0.5$  Ma, 赵家齐等(2022)]、黄岗梁铁锡矿床[ $134.9 \pm 5.2$  Ma, Zhai *et al.* (2014)]、大井锡铜矿床[ $144 \pm 16$  Ma, 廖震等(2014)]、白音诺尔铅锌矿床等[ $149.9 \pm 2.5 \sim 140.3 \pm 2.6$  Ma, 蒋斌斌等(2020)]。区内铜-锡多金属矿床多产在二叠系中,二叠系的页岩和板岩常构成矿体的主要赋矿围岩,如维拉斯托、白音查干、黄岗梁、白音诺尔、红岭等矿床,因此有学者提出,二叠系海相火山喷发沉积地层和中生代构造岩浆活动共同控制了区内矿床的展布(张德全, 1989)。尽管有学者提出区内二叠系哲斯组及大石寨组地层中锡、铅、锌、银、铜等成矿元素含量高(李伟等, 2009; 郭守钰, 2011),可能与成矿有关(吕志成等, 2002),但大多学者认为其成矿物质主要来源于岩浆(Zhu *et*

*al.*, 2001; 邵济安等, 2010; 吕新彪等, 2020; Wang *et al.*, 2022),对二叠纪地层与区内多金属成矿的关系,仍缺少足够的证据支持。

本文通过对红岭铅锌-多金属矿区二叠系板岩详细的野外地质、岩矿相、SEM/EDS 等研究发现,其原岩为一套碱性晶屑凝灰岩,并经历了 NW-SE 向的挤压变形,板岩中可见由闪锌矿、黄铜矿和磁黄铁矿组成的沿岩石层理展布的硫化物压力影。矿区成矿期的矿化和蚀变可切穿岩石层理、片理和压力影构造,表明压力影中硫化物的形成早于构造变形和矽卡岩成矿,应代表了与二叠纪火山岩同期的原生硫化物矿化。压力影中硫化物的原位 S 同位素分析结果与前人获得的矿石中主要硫化物的 S 同位素组成相近,表明二叠系地层可以为成矿提供部分硫和铜、锌等成矿物质,这可能也是造成大兴安岭地区热液型铅锌-多金属矿常产于二叠系中的原因。二叠纪变质火山岩中原生铜、锌矿化的发现为研究区内铜-锌-多金属矿床的成矿物质来源和指导区域找矿提供了新的思路。

## 1 矿区地质概况

研究区大地构造上位于中亚造山带东部的兴蒙造山带(图 1a),区域岩浆活动强烈,发育古生代和中生代的火山岩、火山碎屑岩和侵入岩,主体呈近 NE 向带状展布。区内出露的侵入岩以燕山期花岗岩侵入体为主,岩性包括花岗岩、花岗闪长岩和斑状花岗岩等,并可见少量海西期侵入岩(Jahn *et al.*, 2000; 刘锐等, 2016)。

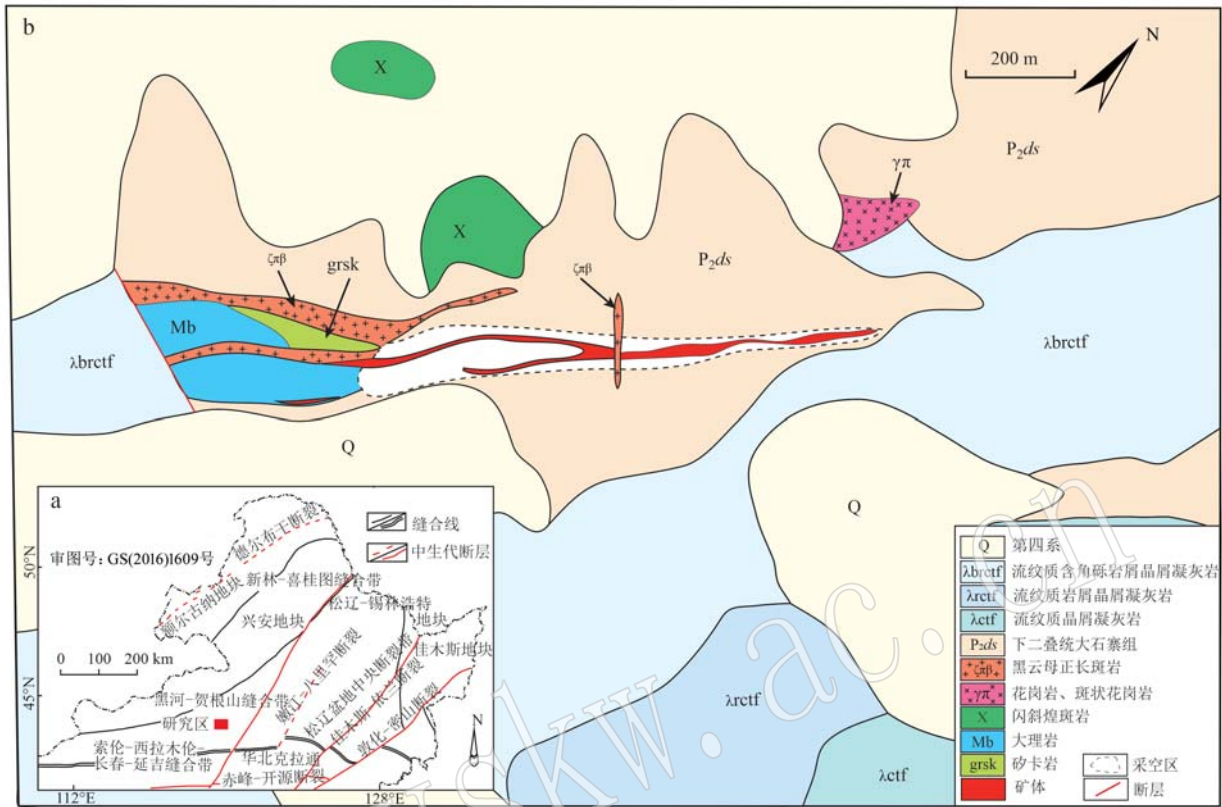


图 1 大兴安岭南段大地构造分区简图(a, 据 Liu Y J *et al.*, 2017) 和红岭铅锌-多金属矿床地质简图 (b, 据内蒙古一一五地质队, 1992)

Fig. 1 Tectonic frame of the Southern Da Hinggan Mountains (a, after Liu Y J *et al.*, 2017) and geological sketch map of Hongling Pb-Zn-polymetallic deposit (b, after No. 115 Geological Team in Inner Mongolia, 1992)

红岭铅锌-多金属矿床(也称浩布高铅锌矿床)位于大兴安岭南段西缘,矿区褶皱和断裂构造作用极为发育,区域构造线方向为 NE 向,由古生代地层组成的 NE-SW 复式背斜贯穿本区。矿区断裂构造发育,主要见 NE 和 NW 向两组断层,其中 NE 向断裂为矿区最主要的断裂构造。矿区出露的地层较为单一,包括下二叠统大石寨组大理岩、黑色板岩及其中的火山岩夹层,上侏罗统满克头鄂博组流纹岩和晶屑凝灰岩以及第四系(图 1b),上侏罗统满克头鄂博组与下伏的二叠系呈角度不整合接触。

矿区出露的侵入岩包括燕山期黑云母二长花岗岩(140.2±1.3 Ma, 作者未发表资料)、黑云母正长斑岩和闪斜煌斑岩,其中黑云母二长花岗岩未在地表出露,仅见于钻孔深部。黑云母正长斑岩(135.68±0.44 Ma, 作者未发表资料)和闪斜煌斑岩脉多侵位于 NW 和 NE 向断层中。黑云母正长斑岩在地表和井下大量揭露,呈岩墙或岩脉,厚度在数十米至不足一米。闪斜煌斑岩呈岩脉或岩墙,厚几米至几十

厘米。根据侵位关系,黑云母二长花岗岩侵位早于闪斜煌斑岩和黑云母正长斑岩脉(单小瑀等, 2022)。

目前矿区内的已知矿体均赋存于大石寨组中,黑云母正长斑岩和闪斜煌斑岩中也可见弱的铅锌矿化和铜矿化。矿区已探明 Zn 0.29 Mt(平均品位 4.24%)、Pb 0.15 Mt(平均品位 2.25%)、Fe 2.91 Mt(平均品位 28.7%)、Cu 0.02 Mt(平均品位 0.14%)和 Ag 114 t(平均品位 16.8 g/t)(孙九达等, 2018)。矿区矿体和蚀变带明显受 NE 和 NW 向断层带控制,矿体总体呈 NE 走向,倾向 NW,矿体沿走向厚度变化较大,总体为 SW 厚度大、垂向延深大,向 NE 逐渐变薄、矿化深度也明显变浅,在 NE 与 NW 向构造交汇处矿体厚度明显膨大。矿区的矿化类型以矽卡岩型为主,包括矽卡岩型铁矿化、铅锌矿化和铁铜-多金属矿化,矿石矿物主要为磁铁矿、黄铜矿、闪锌矿和方铅矿。除矽卡岩型矿化外,矿区二叠系板岩中还发育有受构造或裂隙控制的脉状-网脉状铜、铅、

锌矿化,矿石矿物除黄铜矿、方铅矿、闪锌矿外,还可见黝铜矿、辉银矿、辉铋矿、辉锑矿等(单小瑀等, 2022)。

## 2 样品和测试方法

本文测试的实验样品采自红岭矿区钻孔岩芯。显微岩相学和 SEM/EDS 分析在北京科技大学土木与资源工程学院岩石矿物实验室完成,使用仪器分别为日本奥林巴斯 BX53M 系列显微镜和 Phenom XL 台式能谱型扫描电镜。SEM/EDS 测试采用高真空、15 kV 加速电压。

硫化物的原位 LA-ICP-MS 元素组成分析在合肥工业大学资源与环境工程学院矿床成因与勘查技术研究中心(OEDC)矿物微区分析实验室完成,分析使用仪器为与 Cetac Analyte HE 激光剥蚀系统(193 nm ArF 准分子激光器)联用的 Agilent 7900 电感耦合等

离子体质谱仪。激光剥蚀过程中采用氦气作载气,氩气为补偿气以调节灵敏度,详细的仪器操作步骤和数据处理方法见汪方跃等(2017)和聂利青等(2018)。

硫化物的原位 S 同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,激光剥蚀系统为 193 nm 准分子激光剥蚀系统(RESOLUTION M-50, ASI),多接收等离子体质谱为 ASI 公司的 Nu Plasma 1700 MC-ICP-MS。 $\delta^{34}\text{S}$  的测试误差小于 0.1‰,具体实验方法参考 Chen 等(2017)。

## 3 分析结果

### 3.1 二叠系板岩的岩石学特征

红岭矿区新鲜的二叠系板岩呈黑色-灰黑色,板状或层理构造(图 2a),板岩经热液蚀变后呈黄褐-浅灰色。显微镜下岩石呈火山碎屑结构(图 2b),可

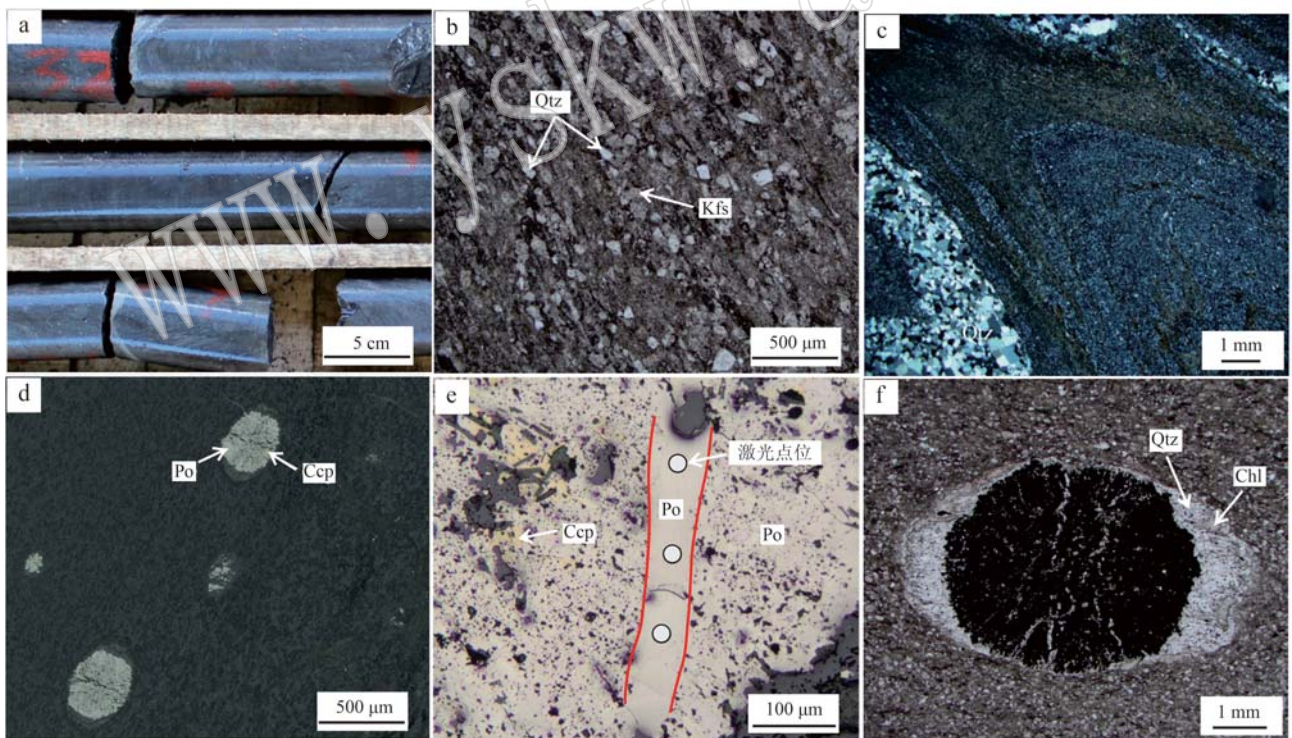


图 2 矿区二叠系板岩的手标本和显微照片

Fig. 2 Hand specimen photo and petrography of Permian slate

a—晶屑凝灰岩手标本照片; b—晶屑凝灰岩中的石英和长石晶屑(-); c—晶屑凝灰岩中的轴面劈理构造(+); d—晶屑凝灰岩的压力影(反射光); e—核部磁黄铁矿、黄铜矿以及后期石英脉和重结晶磁黄铁矿(反射光); f—影子矿物为石英和绿泥石(-); Qtz—石英; Kfs—钾长石; Ccp—黄铜矿; Po—磁黄铁矿; Chl—绿泥石

a—hand-specimen photo of crystal tuff; b—photomicrograph of quartz and feldspar in crystal tuff (-); c—micro fold of crystal tuff (+); d—pressure shadow in crystal tuff (reflected light); e—chalcopyrite and pyrrhotite in the pressure shadow core (reflected light); f—quartz and chlorite in the shadow (-); Qtz—quartz; Kfs—K-feldspar; Ccp—chalcopyrite; Po—pyrrhotite; Chl—chlorite

见显微褶皱构造,轴面劈理不发育(图 2c),石英和长石均未见明显的拉长变形(图 2b)。显微镜下和 SEM/EDS 结果表明,板岩中矿物碎屑多呈棱角状-次棱角状,碎屑多为石英、钾长石晶屑,另可见少量锆石、磷灰石和铬铁尖晶石晶屑(图 3a、3b),胶结物主

要由黑云母、钾长石、钠长石和石英组成。由于矿区普遍发育成矿期的热液蚀变,板岩中的火山碎屑呈现不规则晶体边界(图 3a)。根据岩石结构和矿物组成,矿区黑色板岩的原岩应为碱性晶屑凝灰岩,并非前人认为的变质沉积岩(李剑锋, 2015; 牛吉芳, 2017)。

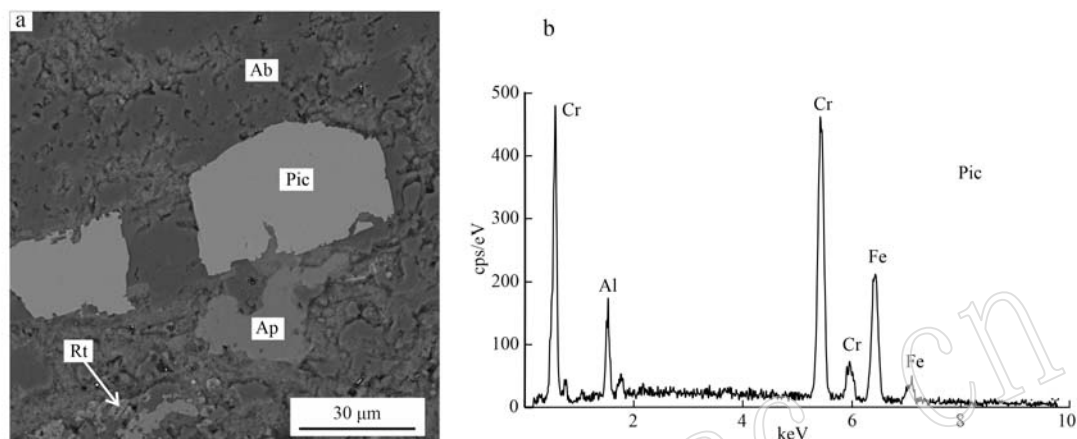


图 3 板岩中铬铁尖晶石的背散射电子照片(a)和 X 射线能谱图(b)

Fig. 3 Back-scattered electron photograph(a) and X-ray energy spectrum(b) of picotite

Ab—钠长石; Pic—铬铁尖晶石; Ap—磷灰石; Rt—金红石

Ab—albite; Pic—spinel; Ap—apatite; Rt—rutile

### 3.2 硫化物压力影的显微镜下特征和矿物组成

野外和手标本上均可见黑色板岩中主要由硫化物组成的压力影,压力影的排列明显沿层理分布,其影子矿物的长轴方向与岩石层理或片理方向一致(图 2d),与矿区矽卡岩型矿化相关的热液脉可切穿岩石层理、片理及压力影构造(图 2e)。岩矿相和 SEM/EDS 分析表明,压力影的核部主要由硫化物组成,包括磁黄铁矿、闪锌矿和黄铜矿(图 2e),影子矿物为石英和绿泥石(图 2f),且影子矿物的延伸方向与岩石层理或片理一致。

### 3.3 压力影核部硫化物的原位微量元素和 S 同位素组成

为进一步探讨矿区成矿与二叠系地层的关系,对压力影核心的原生硫化物和因热液活动而重结晶的硫化物分别进行了原位 LA-ICP-MS 微量元素分析和原位硫同位素分析,结果分别列于表 1 和表 2。典型原生磁黄铁矿和黄铜矿的 LA-ICP-MS 质谱图见图 4a 和图 4b。部分测试位置硫化物的化学组成较为均匀,质谱信号总体平滑(图 4a);而有些硫化物中由于存在超显微包裹体而出现谱峰的跳跃(图 4b)。对含有明显包裹物的数据处理时已避开包裹物的影响。

压力影中硫化物的原位微量元素分析结果显示,原生黄铜矿中具有较高的 Ag、Pb 和 Zn 含量,原生磁黄铁矿中同样具有高的 Ag、Pb、Sb 和 Bi 值(表 1、图 5)。相比于压力影中的原生硫化物,重结晶磁黄铁矿中 Ag、Pb、Cu、Zn、Sb、Bi 等元素含量明显降低(图 5),暗示流体对原生磁黄铁矿的改造过程中可能带出部分金属元素。

压力影中原生硫化物的原位微区硫同位素分析结果表明,无论是黄铜矿、磁黄铁矿,其  $\delta^{34}\text{S}$  值均较为集中,分布于  $-0.33\text{‰} \sim +1.72\text{‰}$  的范围内,且主要集中在  $0.5\text{‰} \sim 1.5\text{‰}$ ,显示了幔源 S 的同位素特征。

## 4 讨论

### 4.1 二叠纪地层的岩石成因和变形特征

野外和岩相学结果表明,矿区的主要赋矿围岩二叠系大石寨组板岩的原岩为火山碎屑岩,岩性应为晶屑凝灰岩,其中碎屑主要为石英和钾长石,并可见少量锆石、磷灰石、尖晶石等,胶结物为黑云母、钾长石、钠长石、石英等,与区域上出露的大石寨组晶屑凝灰岩的矿物组合基本一致(Yu *et al.*, 2017)。研究区的二叠系板岩普遍发育轴向 NE 的紧闭褶皱

表 1 压力影中硫化物的微区原位 LA-ICP-MS 微量元素分析结果  
 Table 1 Results of in-situ LA-ICP-MS analysis of trace elements in sulfide microzone of pressure shadow

点号	矿物	Li	Ag	Ba	Pb	Fe	Mn	Cu	Zn	Al	As	Sn	Sb	Bi	Ni	Co	Cr	Ti	V	P
1		0.96	189.00	1.00	181.00	321 928.00	457.00	325 835.00	841.00	39.00	16.90	13.30	34.50	116.00	283.00	164.00	0.62	0.989	0.06	-
3		1.65	190.00	0.13	85.40	286 944.00	145.00	362 629.00	1468.00	31.90	17.10	13.30	17.30	58.30	72.10	41.40	-	1.01	0.12	-
4		-	218.00	0.21	26.90	276 292.00	5.55	373 254.00	2 439.00	3.26	-	16.20	3.45	26.90	3.20	4.38	-	-	0.04	-
5		2.46	253.00	0.48	38.50	271 732.00	38.90	377 788.00	958.00	6.66	-	15.50	9.64	40.50	3.90	3.02	-	1.24	0.22	-
6	黄铜矿	5.03	175.00	1.87	212.00	298 289.00	764.00	346 649.00	2 790.00	781.00	4.63	16.50	32.50	76.80	98.40	65.80	50.70	3.46	0.72	-
14	(原生)	0.74	146.00	0.30	55.00	233 151.00	22.50	417 072.00	3 253.00	154.00	-	11.50	11.00	35.50	74.30	50.50	35.40	0.83	0.12	-
15		-	129.00	-	5.11	212 446.00	1.81	442 000.00	522.00	4.91	22.10	12.30	1.09	3.44	3.21	1.69	2.68	1.56	0.06	-
16		-	140.00	0.12	7.84	213 974.00	2.64	440 283.00	534.00	1.37	25.30	10.70	2.33	7.76	4.09	2.29	1.70	1.61	0.14	43.20
17		-	117.00	0.31	55.80	225 884.00	154.00	427 603.00	442.00	6.43	11.90	10.70	6.92	30.30	60.30	48.00	-	-	-	40.60
24		2.82	254.00	0.30	129.00	226 977.00	6.38	425 286.00	761.00	273.00	5.72	21.70	22.80	66.90	88.90	58.90	1.30	1.07	0.14	57.60
18		11.50	13.90	-	81.10	631 219.00	20.20	-	11.10	400.00	13.30	-	9.25	97.50	2 192.00	1 021.00	2.34	12.70	0.13	6.39
20	磁黄铁矿	-	48.70	0.58	1 094.00	628 068.00	133.00	-	6.77	1 033.00	47.10	-	153.00	515.00	1 949.00	994.00	5.84	21.00	2.63	-
21	(原生)	5.98	39.60	-	779.00	628 543.00	413.00	1.13	0.20	754.00	4.37	0.81	91.80	356.00	2 074.00	1 070.00	86.40	19.70	2.44	49.90
22		1.70	34.80	-	351.00	622 776.00	3 424.00	6.79	8.70	2 135.00	21.50	1.07	53.10	243.00	2 177.00	973.00	19.60	21.60	3.12	203.00
7		4.86	0.74	-	2.42	631 930.00	4.47	-	-	76.40	2.65	-	0.21	1.22	2 275.00	1 064.00	5.78	-	-	54.30
8		0.31	2.64	-	9.52	631 934.00	3.32	0.45	2.28	9.78	50.40	-	0.37	17.50	2 404.00	1 088.00	8.59	-	-	3.21
9		-	0.42	-	1.91	632 114.00	0.98	1.36	3.13	1.85	38.90	0.24	0.32	1.64	2 304.00	1 046.00	4.30	0.51	0.02	32.50
10	磁黄铁矿	-	0.48	-	1.63	632 002.00	0.50	-	4.16	-	83.20	0.24	0.13	0.61	2 376.00	1 094.00	-	1.64	-	-
11	(重结晶)	-	0.36	3.48	2.17	632 043.00	-	-	-	-	26.60	0.13	0.23	1.38	2 301.00	1 054.00	3.80	-	0.15	70.60
12		-	-	3.05	1.33	632 446.00	0.69	1.38	2.45	-	16.30	0.19	0.02	1.08	2 116.00	1 015.00	3.58	-	-	-
13		2.1	0.31	0.58	5.35	632 320.00	2.01	-	1.94	1.31	40.00	-	0.12	7.14	2 053.00	1 024.00	1.87	-	0.32	57.10

样品号 HL-2053, -代表低于检测限。

表 2 压力影中金属硫化物原位硫同位素及矿石硫化物的硫同位素组成

Table 2 In-situ sulfur isotope composition of metal sulfide in pressure shadow and sulfur isotope composition of ore sulfide

样品号	矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$	数据来源	样品号	矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$	数据来源	
HL-2053-1	黄铜矿	-0.33	本文	HL-4	闪锌矿	-0.9	李剑锋等, 2015	
HL-2053-2	黄铜矿	1.75		HL-5	闪锌矿	-1.4		
HL-2053-3	黄铜矿	0.71		HL-6	闪锌矿	-1.6		
HL-2053-4	黄铜矿	1.18		HL-7	方铅矿	-2		
HL-2053-5	黄铜矿	1.1		HL-8	方铅矿	-2.7		
HL-2053-6	黄铜矿	1.72		HL-9	方铅矿	-2.3		
HL-2053-7	磁黄铁矿	1.54		863-0-5	闪锌矿	-0.5		Liu <i>et al.</i> , 2017
HL-2053-8	磁黄铁矿	1.16		863-3-3	闪锌矿	-1		
HL-2053-9	磁黄铁矿	0.82		863-3-5	闪锌矿	-1.5		
HL-2053-10	磁黄铁矿	1.53		863-3-7	闪锌矿	-2		
HL-2053-11	磁黄铁矿	0.81		863-5-2	闪锌矿	-0.8		
HL-2053-12	磁黄铁矿	1.04		863-5-4	闪锌矿	-1.7		
HL-2053-13	磁黄铁矿	1.16		863-5-5-1	闪锌矿	-1.9		
HL-2053-14	黄铜矿	1.11		863-5-7	闪锌矿	-1.7		
HL-2053-15	黄铜矿	-0.1		863-7-6	闪锌矿	-2.3		
HL-2053-16	黄铜矿	0.85		863-9-7	闪锌矿	-2		
HL-2053-17	黄铜矿	0.32		863-13-2	闪锌矿	-0.7		
HL-2053-18	磁黄铁矿	0.88		863-13-4	闪锌矿	-0.6		
HL-2053-19	磁黄铁矿	0.64		863-21-3	闪锌矿	-1.4		
HL-2053-20	磁黄铁矿	1.33		855-1-4	闪锌矿	-1.3		
HL-2053-21	磁黄铁矿	0.58		855-1-5	闪锌矿	-2.3		
HL-2053-22	磁黄铁矿	1.07		855-1-10	闪锌矿	-2.1		
HL-2053-23	磁黄铁矿	0.94		855-1-12	闪锌矿	-0.8		
805-32	闪锌矿	-1.5	855-5-3	闪锌矿	-1.1			
805-14	闪锌矿	-1.5	855-5-5	闪锌矿	-1.1			
LG-401	黄铜矿	-0.6	855-5-11	闪锌矿	-1			
LG-401	磁黄铁矿	-1.3	890-3-1	闪锌矿	-2.1			
LG-203	闪锌矿	0	890-3-4	闪锌矿	-0.9			
HBG03-03	毒砂	-0.6	HL13-26	闪锌矿	-2.2			
HBG05-03	毒砂	0.6	HL13-5	闪锌矿	-0.5			
HBG03-06	磁黄铁矿	-2.1	863-11-2	黄铜矿	-1.2			
HBG03-10	磁黄铁矿	-1.8	863-13-5	黄铜矿	-0.6			
HBG04-01	方铅矿	-5	HL13-3	黄铜矿	-0.1			
HBG01-04	黄铁矿	0.1	HL13-5	黄铜矿	-0.7			
HBG01-09	黄铁矿	-0.3	HL13-15-2	方铅矿	-2			
HBG03-06	黄铁矿	-2.6		磁黄铁矿	-0.4			
HBG03-01	闪锌矿	-0.1		毒砂	0.9			
HBG03-07	闪锌矿	-1.2		黄铜矿	1.3			
HBG04-01	闪锌矿	-3.3		闪锌矿	-2.9			
HL-1	黄铜矿	-1.1	李剑锋等, 2015	闪锌矿	3.5	盛继福等, 1999		
HL-2	黄铜矿	-1.2		方铅矿	-4.7			
HL-3	黄铜矿	-1.6		方铅矿	0.9			

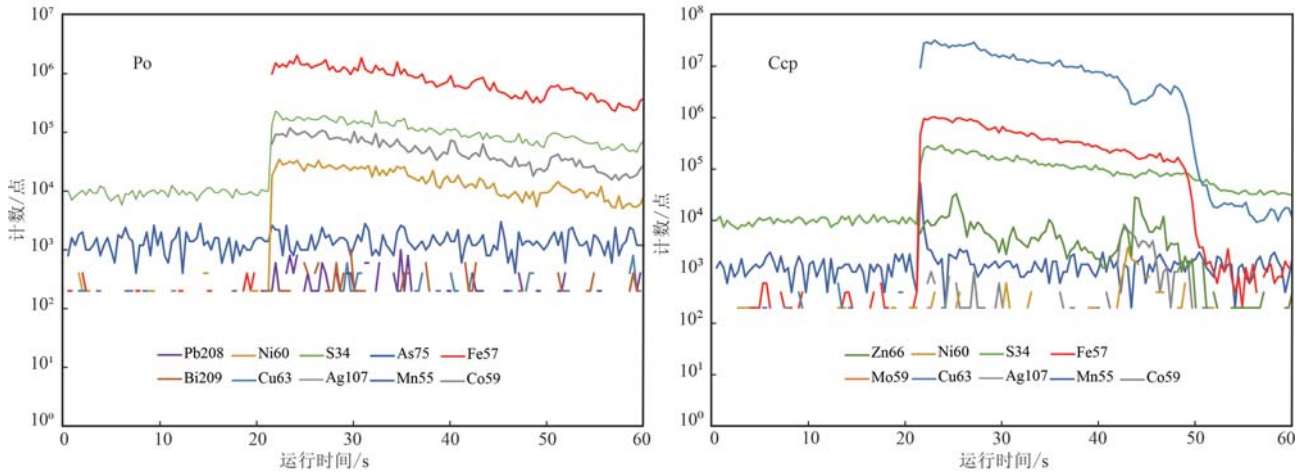


图4 压力影核心磁黄铁矿(a)和黄铜矿(b)的LA-ICP-MS质谱图  
Fig. 4 LA-ICP-MS spectrum of pyrrhotite (a) and chalcopyrite (b) in pressure shadow core

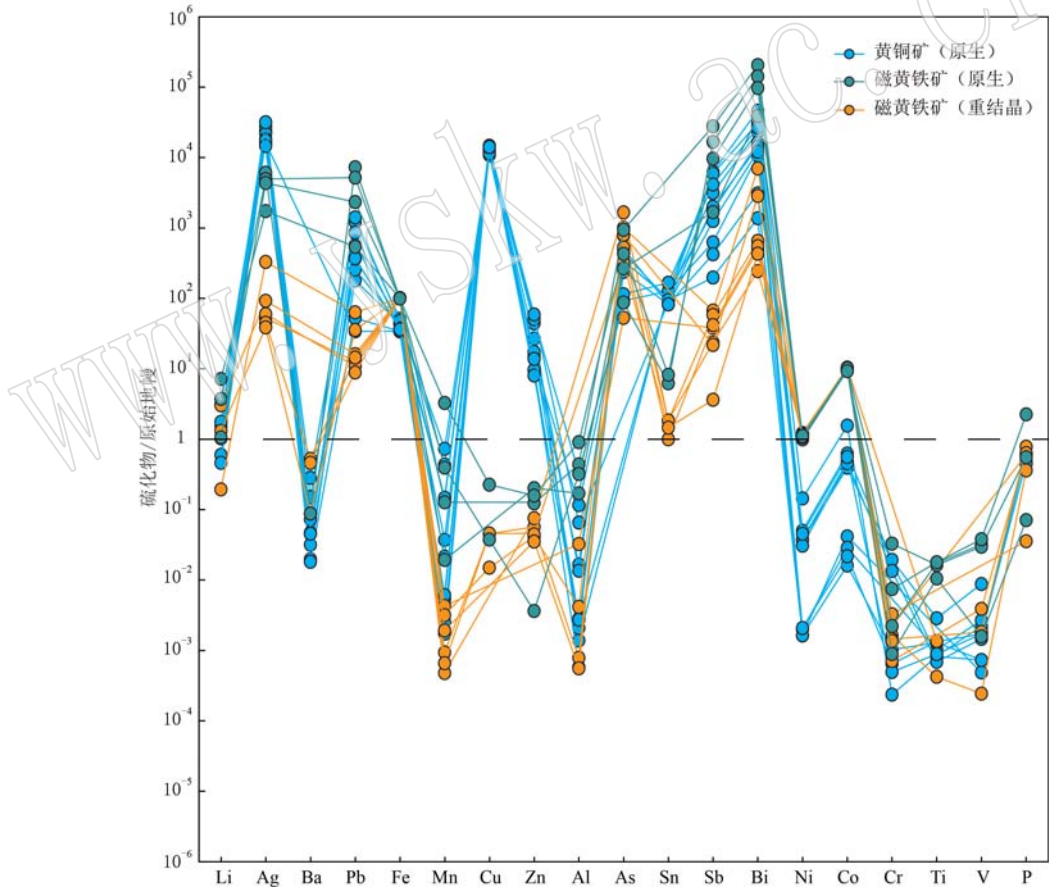


图5 压力影中原生黄铜矿、磁黄铁矿和重结晶磁黄铁矿的元素组成原始地幔标准化蛛网图  
(标准化数据据 McDonough and Sun, 1995)  
Fig. 5 Primitive mantle normalized spider diagram of primary pyrrhotite, chalcopyrite and secondary pyrrhotite in the pressure shadow (normalized data after McDonough and Sun, 1995)

和 NE 向的轴面劈理,但在弱变形域中,岩石的火山碎屑结构保留较为完好(图 2b),表明矿区二叠系板岩中的板理应为构造成因,并非强烈的区域变质作

用所致。

已有研究结果显示,内蒙古东部大石寨组火山的锆石 U-Pb 年龄介于 298~276 Ma 之间,统计峰



值年龄为 288 Ma(张健, 2012), 晚二叠世-早三叠世的区域挤压背景导致早二叠世火山岩中形成了轴面走向为 NE-SW 向的褶皱(张逸鹏, 2016)。矿区成矿时代为  $139.10 \pm 5.40$  Ma 至  $140.70 \pm 1.89$  Ma (Hong *et al.*, 2021), 远晚于区域大规模挤压变形的时间。压力影的形成机制在于应力作用下核心矿物与周围矿物刚性程度的差异, 导致了岩石局部变形程度的差异。研究区二叠纪晶屑凝灰岩中, 相对于富含云母、长石的凝灰质地层而言, 硫化物更为刚性, 因此在区域挤压过程中, 硫化物变形弱, 而周围的软矿物(如云母等)变形强, 因此在硫化物周围形成低压区, 并充填影子矿物。矿区板岩压力影中影子矿物的延伸方向与挤压片理方向一致, 表明其形成与区域挤压有关, 而核心矿物的形成早于区域挤压, 应为火山沉积同期产物。

#### 4.2 二叠系火山岩对中生代热液型矿床成矿物质来源的启示

中国东部中生代普遍发育与燕山期岩浆活动有关的钼(钨、锡)-铅锌(银)成矿系统, 如内蒙古东部(谢玉玲等, 2015, 2020; Zhai *et al.*, 2018)、大别东段(杜建国, 2000; Wu and Zheng, 2013; 任志等, 2014; 谢玉玲等, 2015; Mi *et al.*, 2015)、东北地区(张旗等, 2009)等, 但这些成矿系统中除钨、锡、钼外, 外围多发育热液脉状铅锌(银)矿, 但铜矿化较弱, 如白音诺尔铅锌银矿床(Jiang *et al.*, 2017)、阿尔哈达铅锌银矿(谢玉玲等, 2020)等。同时, 大兴安岭东段还发育有一系列富铜的燕山期成矿系统, 其成矿岩浆性质、岩浆源区等与中国东部大多铅锌成矿系统一致, 但相对富铜, 如大井铜锡矿(王莉娟等, 2000)、维拉斯托锡铜多金属矿(Liu *et al.*, 2016)、毛登锡铜矿(Chen *et al.*, 2022)、莲花山铜矿(康欢等, 2019)等, 对这些矿床中铜的来源前人有多种不同的认识。前人通过对内蒙东部二叠系黑色板岩的岩石化学研究发现, 岩石具有较高的成矿金属含量, 其中铜可达  $52.12 \times 10^{-6}$ , 锌可达  $84.17 \times 10^{-6}$ (杨月厚等, 2012), 均明显高于地壳平均值, 并认为二叠系可为区域成矿提供成矿金属, 但对造成地层富铜的原因尚不清楚。

本次研究发现, 二叠系火山碎屑岩中见有顺层理产出的原生铜、锌矿化, 在变形过程中形成压力影。矿区成矿期的热液脉体明显切穿板岩的板理, 岩石中的火山碎屑中可见被成矿期流体交代的现象(图 3a), 且显微镜下明显可见成矿期热液脉切穿硫

化物压力影, 并可见硫化物的重结晶(图 2e), 表明成矿期流体活动对板岩和其中的压力影进行了改造。压力影中硫化物的微区原位微量元素组成分析结果显示, 原生黄铜矿和磁黄铁矿中具有高的 Ag、Pb、Zn、Sb、Bi 元素含量, 而经成矿期流体改造的磁黄铁矿中 Ag、Pb、Cu、Zn、Sb、Bi 等元素含量明显降低(图 5), 矿区矿石中常见辉铋矿、辉银矿、辉锑矿等, 表明矿区除铁、铅、锌、铜矿化外还发育少量银、锑、铋矿化, 其可能来源于二叠系的原生硫化物。

矿物原位 LA-MC-ICP-MS 是近年开发出来的硫同位素测量新技术(Graddock *et al.*, 2008; Buhn *et al.*, 2012), 具有精度高、空间分辨率高的特点(Chen *et al.*, 2017)。由于其不受矿物内部包裹物等影响, 且可详细地示踪同一矿物晶体中不同期次的 S 同位素组成(Cook *et al.*, 2013; 李洪梁等, 2021), 因此广泛用于示踪成矿物质来源及成矿过程的物理化学条件变化(Barker *et al.*, 2009; Cook *et al.*, 2016; Xie *et al.*, 2018; Wei *et al.*, 2019; Petrella *et al.*, 2020), 通过对板岩中原生黄铜矿和磁黄铁矿的 S 同位素分析结果表明, 其分布范围[主要集中在  $-0.5\text{‰} \sim 1.5\text{‰}$ ] 与前人得到的矿石中矿化物的 S 同位素分布范围[主要集中在  $-2.5\text{‰} \sim 0.5\text{‰}$ , 牛吉芳(2017); Liu *et al.*(2018)]非常接近(图 6), 也表明其可能对成矿有一定贡献。发育于海相火山岩中的 VMS(VHMS)型铜矿床是世界铜的主要来源(Franklin *et al.*, 2005), 尽管目前区内并未发现有经济意义的同生铜矿化, 但是区域高铜、锌背景值可能与二叠纪的海底火山活动有关。区域上二叠系大石寨组火山岩具有陆缘弧岩浆岩的特征(关庆彬等, 2016; Yu *et al.*, 2017; 许强伟等, 2019),

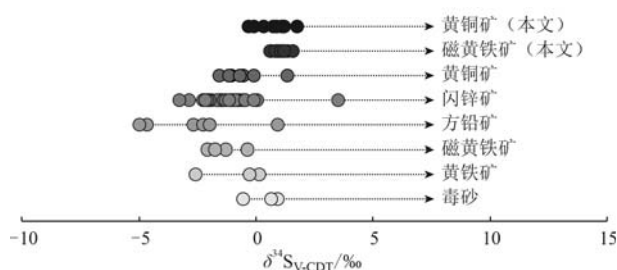


图 6 压力影中硫化物与矿石中硫化物的硫同位素分布图(矿石中不同硫化物的硫同位素数据来源见表 2)

Fig. 6 Graphic of the sulfur isotope of the sulfide in the pressure shadow and the sulfide minerals in the Hongling deposit (the data sources of sulfur isotopes of different sulfides in ores are shown in Table 2)

其岩浆源区有俯冲板块交代的地幔的贡献 (Yu *et al.*, 2017), 这可能是造成其高 Cu、Pb、Zn 等含量的原因。二叠系地层可能为区内铜矿化提供了物质基础, 燕山期岩浆热液与二叠系地层的相互作用萃取了其中的 Cu、Zn 等成矿金属, 这可能是造成区内富铜矿床形成的可能原因。

## 5 结论

(1) 二叠系黑色板岩为红岭铅锌-多金属矿床的主要赋矿围岩, 其原岩为一套碱性火山碎屑岩, 并经历了 NW-SE 向的挤压变形, 形成了轴向 NE 的紧闭褶皱。

(2) 黑色板岩中的硫化物压力影可能代表了与海相火山活动有关的原生铜、锌矿化, 这些原生硫化物的存在可能是导致区域内二叠系黑色板岩普遍具有较高的铜、锌背景值的原因。

(3) 压力影中原生和重结晶硫化物微量元素组成的变化和与矿区的矿石硫化物相似的 S 同位素组成, 表明二叠系火山碎屑岩可能为区内富铜矿床的形成提供了成矿金属和硫。

## References

- Barker S L L, Hickey K A, Cline J S, *et al.* 2009. Uncloaking invisible gold: Use of Nano SIMS to evaluate gold, trace elements, and sulfur isotopes in pyrite from Carlin-type gold deposits[J]. *Economic Geology*, 104(7): 897~904.
- Bühn B, Santos R V, Dardenne M A, *et al.* 2012. Mass-dependent and mass-independent sulfur isotope fractionation ( $\delta^{34}\text{S}$  and  $\delta^{33}\text{S}$ ) from Brazilian Archean and Proterozoic sulfide deposits by laser ablation multi-collector ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 312: 163~176.
- Chen L, Chen K Y, Bao Z A, *et al.* 2017. Preparation of standards for in situ sulfur isotope measurement in sulfides using femtosecond laser ablation MC-ICP-MS[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 32(1): 107~116.
- Chen X K, Zhou Z H, Zhao J Q, *et al.* 2022. Chronology and geochemical composition of cassiterite and zircon from the Maodeng Sn-Cu deposit, Northeastern China: Implications for magmatic-hydrothermal evolution and ore-forming process[J]. *Ore Geology Reviews*, 150: 105159.
- Cook N, Ciobanu C L, George L, *et al.* 2016. Trace element analysis of minerals in magmatic-hydrothermal ores by laser ablation inductively-coupled plasma mass spectrometry: Approaches and opportunities [J]. *Minerals*, 6(4): 111.
- Cook N J, Ciobanu C L, Meria D, *et al.* 2013. Arsenopyrite-pyrite association in an orogenic gold ore: Tracing mineralization history from textures and trace elements[J]. *Economic Geology*, 108(6): 1 273~1 283.
- Du Jianguo. 2000. On Researching of Mesozoic Magmatism and Geochemistry of Mineralization in Dabie Orogenic Belt[D]. Anhui: Hefei University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Franklin J M, Gibson H L, Jonasson I R, *et al.* 2005. Volcanogenic massive sulfide deposits[J]. *Economic Geology 100th Anniversary*, 523~560.
- Graddock P R, Rouxel O J, Ball L A, *et al.* 2008. Sulfur isotope measurement of sulfur and sulfide by high-resolution MC-ICP-MS [J]. *Chemical Geology*, 253(3/4): 102~113.
- Guan Qingbin, Liu Zhenghong, Bai Xinhui, *et al.* 2016. Age and tectonic setting of volcanic rocks of the Dashizhai Formation from Xinkaiba, Balinyouqi area, Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(7): 2 029~2 040(in Chinese with English abstract).
- Guo Shouyu. 2011. Permian Stratigraphy and Mineralization Inbackground Analysis in Central and South Section of Daxinganling Mountains[D]. Hebei: Shijiazhuang University of Economics (in Chinese with English abstract).
- Hong J, Zhang H, Zhai D, *et al.* 2021. The geochronology of the Haobugao skarn Zn-Pb deposit (NE China) using garnet LA-ICP-MS U-Pb dating[J]. *Ore Geology Reviews*, 139: 104437.
- Jahn B M, Wu F Y and Chen B. 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 91: 93~181.
- Jiang Binbin, Zhu Xinyou, Huang Xingkai, *et al.* 2020. Determination of metallogenic age and prospecting significance of the Baiyinnuoer lead-zinc deposit in the southern Da Hinggan Mountains[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(10): 2 844~2 855(in Chinese with English abstract).
- Jiang S H, Chen C L, Bagas L, *et al.* 2017. Two mineralization events in the Baiyinnuoer Zn-Pb deposit in Inner Mongolia, China: Evidence from field observations, S-Pb isotopic compositions and U-Pb zircon ages[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 144: 339~367.
- Kang Huan, Liu Yifei and Jiang Sihong. 2019. Molybdenite Re-Os dating and ore S-Pb isotopes of the Lianhuashan Cu deposit Inner Mongolia, and their genetic significanc [J]. *Acta Geologica Sinica*, 93

- (12): 3 082~3 094(in Chinese with English abstract).
- Li Hongliang, Li Guangming, Zhang Zhi, *et al.* 2021. Genesis of Jienagepu gold deposit in Zhaxikang ore concentration area, Eastern Tethys Himalayas: Constraints from He-Ar and in-situ S isotope of pyrite[J]. *Earth Science*, 46(12): 4 291~4 315.
- Li Jianfeng. 2015. Mineralization and Periphery Metallogenic Prediction of the Hongling Pb-Zn Polymetallic Deposit in Chifeng Inner Mongolia [D]. Jilin: Jilin University(in Chinese with English abstract).
- Li Jianfeng, Wang Keyong, Lu Jisheng, *et al.* 2015. Ore-forming fluid geochemical characteristics and genesis of Pb-Zn deposit in Hongling, Inner Mongolia[J]. *Journal of Earth Science*, 40 (6): 995~1 005 (in Chinese with English abstract).
- Li Wei, Han Xue, Du Bo, *et al.* 2009. Geological characteristics of Middle Permian Dashizhai Formation in Balin Right Banner Chifeng City Inner Mongolia[J]. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 28 (24): 45~46 (in Chinese).
- Liao Zhen, Wang Yuwang, Wang Jingbin, *et al.* 2014. LA-MC-ICP-MS U-Pb dating of cassiterite from the Dajing tin polymetallic deposit in Inner Mongolia and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 33 (S1): 421~422(in Chinese).
- Liu L J, Zhou T F, Zhang D Y, *et al.* 2018. S isotopic geochemistry, zircon and cassiterite U-Pb geochronology of the Haobugao Sn polymetallic deposit, southern Great Xing'an Range, NE China[J]. *Ore Geology Reviews*, 93: 168~180.
- Liu Rui, Yang Zhen, Xu Qidong, *et al.* 2016. Zircon U-Pb ages, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of the Hercynian granitoids from the southern segment of the Da Hinggan Mts: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(5): 1 505~1 528(in Chinese with English abstract).
- Liu Y F, Jiang S H, Leon B, *et al.* 2016. The genesis of metal zonation in the Weilasituo and Bairendaba Ag-Zn-Pb-Cu-(Sn-W) deposits in the shallow part of a porphyry Sn-W-Rb system, Inner Mongolia, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 72(2): 150~173.
- Liu Y J, Li W M, Feng Z Q, *et al.* 2017. A review of the Paleozoic tectonics in the eastern part of Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 43: 123~148.
- Lü Xinbiao, Yang Junsheng, Fan Xiejun, *et al.* 2020. Geology and genesis of lead-zinc polymetallic deposits in the Great Xing'an Range[J]. *Earth Science*, 45(12): 4 399~4 427(in Chinese with English abstract).
- Lü Zhicheng, Duan Guozheng, Hao Libo, *et al.* 2002. The petrological and geochemical characteristics and petrogenesis significance of spilitic from lower Permian Dashizai Group in the middle section of Da Hinggan Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 212~222(in Chinese with English abstract).
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 120(3~4): 223~253.
- Mi M, Chen Y J, Yang Y F, *et al.* 2015. Geochronology and geochemistry of the giant Qian'echong Mo deposit, Dabie Shan, eastern China: Implications for ore genesis and tectonic setting [J]. *Gondwana Research*, 27: 1 217~1 235.
- Nie Liqing, Zhou Taofa, Wang Fangyue, *et al.* 2018. Scheelite trace element compositions from Anhui Dongyuan porphyry deposit: Implications for tungsten mineralization [J]. *Mineral Deposits*, 37 (6): 1 237~1 246(in Chinese with English abstract).
- Niu Jifang. 2017. The Geological Characteristics Study and Metallogenic Prediction of the Haobugao Pb-Zn-Cu Deposit in Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Petrella L, Thébaud N, Laflamme C, *et al.* 2020. In-situ sulfur isotopes analysis as an exploration tool for orogenic gold mineralization in the Granites-Tanami Gold Province, Australia: Learnings from the Callie deposit[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 214: 106542.
- Ren Zhi, Zhou Taofa, Yuan Feng, *et al.* 2014. The stages of magmatic system in Shapinggou molybdenum deposit district, Anhui Province: Evidence from geochronology and geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 1 097~1 116 (in Chinese with English abstract).
- Shan Xiaoyu, Wei Liangmin, Ren Guoshun, *et al.* 2020. Geological characteristics of Hongling Pb-Zn polymetallic deposit in Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(3): 628~642(in Chinese with English abstract).
- Shao Ji'an, Mou Baolei, Zhu Huizhong, *et al.* 2010. Material source and tectonic settings of the Mesozoic mineralization of the Da Hinggan Mts [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 649~656(in Chinese with English abstract).
- Sheng Jifu and Fu Xianzheng. 1999. Metallogenic Environment and Geological Characteristics of Copper-Polymetallic Ore Deposits in Middle Part of Da Hinggan Mts[M]. Seismological Press(in Chinese).
- Sun Jiuda, Liu Wenchao, Ren Guoshun, *et al.* 2018. Discussion on ore-forming material sources of Haobugao Pb-Zn deposit in Chifeng, Inner Mongolia[J]. *Advances in Geosciences*, 8(8): 1 330~1 337(in Chinese with English abstract).
- Wang Fangyue, Ge Can, Ning Siyuan, *et al.* 2017. A new approach to LA-ICP-MS mapping and application in geology[J]. *Acta Petrologica*

- Sinica, 33(11): 3 422~3 436 (in Chinese with English abstract).
- Wang Lijuan, Wang Yuwang, Wang Jingbin, *et al.* 2000. Study of tin and copper metallogenetic fluid from Dajing deposit and its genetic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(4): 609~614 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhigang, Li Ke, Zhang Zhicheng, *et al.* 2022. Carboniferous to Early Permian magmatism in the Uliastai continental margin (Inner Mongolia) and its correlation with the tectonic evolution of the Hegen-shan Ocean[J]. *Lithos*, 414~415: 106635.
- Wei B, Wang Y C, Wang Y, *et al.* 2019. S and C isotope constraints for mantle-driven sulfur source and organic carbon-induced sulfide saturation of magmatic Ni-Cu sulfide deposits in the Central Asian Orogenic Belt, North China[J]. *Economic Geology*, 114(4): 787~806.
- Wu Xinli, Mao Jingwen, Zhou Zhenhua, *et al.* 2012. H-O-S-Pb isotopic components of the Budunhua Cu deposit in the middlesouth part of the Da Hinggan Mountains and their implications for the oreforming process[J]. *Geology in China*, 39(4): 1 812~1 829 (in Chinese with English abstract).
- Wu Y B and Zheng Y F. 2013. Tectonic evolution of a composite collision orogen: An overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu orogenic belt in central China[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1 402~1 428.
- Xie Yuling, Cui Kai, Xia Jiaming, *et al.* 2020. The origin of ore forming materials of the Yanshanian porphyry Mo-hydrothermal Pb-Zn(Ag) metallogenetic system in eastern China[J]. *Earth Science Frontier*, 27(2): 182~196 (in Chinese with English abstract).
- Xie Yuling, Li Lamei, Li Yingxu, *et al.* 2015. Porphyry molybdenum (Tungsten)-epithermal lead-zinc (Silver) metallogenetic system in Dongwuqi area, Inner Mongolia[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(S1): 81 (in Chinese with English abstract).
- Xie Z J, Xia Y, Cline Jean S, *et al.* 2018. Magmatic origin for sediment-hosted Au deposits, Guizhou Province, China; In situ chemistry and sulfur isotope composition of pyrites, Shuiyindong and Jinfeng Deposits[J]. *Economic Geology*, 113(7): 1 627~1 652.
- Xu Qiao, Tang Guo, Zou Tao, *et al.* 2020. Metallogenetic system and target area prediction of the Haobugao tin polymetallic orefield in the Bairin Left Banner, southern section of Daxinganling[J]. *Geology and Exploration*, 56(2): 265~276 (in Chinese with English abstract).
- Xu Qiangwei, Wang Pin, Wang Zhiqiang, *et al.* 2019. LA-ICP-MS Zircon U-Pb ages, geochemical characteristics of the Dashizhai Formation tuffs in Hexigten Banner, Inner Mongolia and their tectonic significance[J]. *Geological Review*, 65(1): 119~149 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yuehou, Lian Shien and Ba Tu. 2012. Geochemical characteristics and metallogenetic significance of Permian in the middle part of Greater Khingan Mountains[J]. *Western Resources*, 40(2): 178~181 (in Chinese with English abstract).
- Yu Q, Ge W, Zhang J, *et al.* 2017. Geochronology, petrogenesis and tectonic implication of Late Paleozoic volcanic rocks from the Dashizhai Formation in Inner Mongolia, NE China [J]. *Gondwana Research*, 43: 164~177.
- Zhai D, Liu J, Zhang H, *et al.* 2014. S-Pb isotopic geochemistry, U-Pb and Re-Os geochronology of the Huanggangliang Fe-Sn deposit, Inner Mongolia, NE China[J]. *Ore Geology Reviews*, 59: 109~122.
- Zhai D, Liu J, Zhang H, *et al.* 2018. A magmatic-hydrothermal origin for Ag-Pb-Zn vein formation at the Bianjiadayuan deposit, Inner Mongolia, NE China: Evidences from fluid inclusion, stable (CHO) and noble gas isotope studies[J]. *Ore Geology Reviews*, 101: 1~16.
- Zhang Dequan. 1989. Geological settings and ore types of the Huanggang-Ganzhuermiao tin, silver and polymetallic ore zone in eastern Inner Mongolia[C]//Bulletin of the Institute of Mineral deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 44~57 (in Chinese).
- Zhang Jian. 2012. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of volcanic rocks from the dashizhai Formation in Eastern Inner Mongolia [D]. Jilin: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, *et al.* 2009. Yanshanian large-scale magmatism and lithosphere thinning in Eastern China: Relation to large igneous province[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 21~51 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yipeng. 2016. Structural Deformation of Permian Dashizhai and Zhesi Formation in Central Inner Mongolia and Its Implications for the Tectonic Evolution of Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Zhu Y, Sun S, Gu L, *et al.* 2001. Permian volcanism in the Mongolian orogenic zone, northeast China: Geochemistry, magma sources and petrogenesis[J]. *Geological Magazine*, 138(2): 101~115.
- Zhao Jiaqi, Zhou Zhenhua, Ouyang Hegen, *et al.* 2022. Zircon U-Pb age and geochemistry of quartz syenite porphyry in Shuangjianzishan Ag-Pb-Zn(Sn) deposit, Inner Mongolia, and their geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 41(2): 324~344 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 杜建国. 2000. 大别造山带中生代岩浆作用与成矿地球化学研究 [D]. 安徽: 合肥工业大学.
- 关庆彬, 刘正宏, 白新会, 等. 2016. 内蒙古巴林右旗新开坝地区大石寨组火山岩形成时代及构造背[J]. 岩石学报, 32(7): 2 029~2 040.
- 郭守钰. 2011. 大兴安岭中南段二叠系地层特征及成矿背景分析 [D]. 河北: 石家庄经济学院.
- 蒋斌斌, 祝新友, 黄行凯, 等. 2020. 大兴安岭南段白音诺尔铅锌矿床成矿时代确定及其找矿意义[J]. 地质学报, 94(10): 2 844~2 855.
- 康欢, 刘翼飞, 江思宏. 2019. 内蒙古莲花山铜矿床辉钼矿铼-钷年代学、矿石硫-铅同位素地球化学与矿床成因[J]. 地质学报, 93(12): 3 082~3 094.
- 李洪梁, 李光明, 张志, 等. 2021. 特提斯喜马拉雅东段扎西康矿集区姐纳各普金矿床成因: 黄铁矿 He-Ar 及原位 S 同位素约束[J]. 地球科学, 46(12): 4 291~4 315.
- 李剑锋. 2015. 内蒙古赤峰红岭铅锌多金属矿床成矿作用及外围成矿预测[D]. 吉林: 吉林大学.
- 李剑锋, 王可勇, 陆继胜, 等. 2015. 内蒙古红岭铅锌矿床成矿流体地球化学特征及矿床成因[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 40(6): 995~1 005.
- 李伟, 韩雪, 杜波, 等. 2009. 内蒙古赤峰市巴林右旗中二叠统大石寨组地质特征[J]. 内蒙古科技与经济, 28(24): 45~46.
- 廖震, 王玉往, 王京彬, 等. 2014. 内蒙古大井锡多金属矿床锡石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 测年及其意义[J]. 矿床地质, 33(S1): 421~422.
- 刘锐, 杨振, 徐启东, 等. 2016. 大兴安岭南段海西期花岗岩类锆石 U-Pb 年龄、元素和 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学: 岩石成因及构造意义[J]. 岩石学报, 32(5): 1 505~1 528.
- 吕新彪, 杨俊声, 范谢均, 等. 2020. 大兴安岭地区铅锌多金属矿床时空分布、地质特征及成因[J]. 地球科学, 45(12): 4 399~4 427.
- 吕志成, 段国正, 郝立波, 等. 2002. 大兴安岭中段二叠系大石寨组细碧岩的岩石学地球化学特征及其成因探讨[J]. 岩石学报, 18(2): 212~222.
- 内蒙古一一五地质队. 1992. 浩布高多金属矿详查地质报告[R].
- 聂利青, 周涛发, 汪方跃, 等. 2018. 安徽省东源斑岩型钨矿床白钨矿原位微量元素特征及其指示意义[J]. 矿床地质, 37(6): 1 237~1 246.
- 牛吉芳. 2017. 内蒙古浩布高铅锌铜矿床地质特征研究与成矿预测 [D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 任志, 周涛发, 袁峰, 等. 2014. 安徽沙坪沟钨矿区中酸性侵入岩期次研究——年代学及岩石化学约束[J]. 岩石学报, 30(4): 1 097~1 116.
- 单小瑀, 魏良民, 任国顺, 等. 2022. 内蒙古红岭铅锌多金属矿床地质特征[J]. 岩石矿物学杂志, 41(3): 628~642.
- 邵济安, 牟保磊, 朱慧忠, 等. 2010. 大兴安岭中南段中生代成矿物质的深部来源与背景[J]. 岩石学报, 26(3): 649~656.
- 盛继福, 傅先政. 1999. 大兴安岭中段成矿环境与铜多金属矿床地质特征[M]. 北京: 地震出版社.
- 孙九达, 刘文超, 任国顺, 等. 2018. 内蒙古赤峰浩布高铅锌矿成矿物质来源的探讨[J]. 地球科学前沿, 8(8): 1 330~1 337.
- 汪方跃, 葛黎, 宁思远, 等. 2017. 一个新的矿物面扫描分析方法开发和地质学应用[J]. 岩石学报, 33(11): 3 422~3 436.
- 王莉娟, 王玉往, 王京彬, 等. 2000. 大井矿床锡铜矿体成矿流体研究及其成因意义[J]. 岩石学报, 16(4): 609~614.
- 谢玉玲, 崔凯, 夏加明, 等. 2020. 中国东部燕山期斑岩钨-热液型铅锌(银)成矿系统的成矿物质来源[J]. 地学前缘, 142(2): 190~204.
- 谢玉玲, 李腊梅, 李应栩, 等. 2015. 内蒙古东乌珠穆沁旗地区燕山期钨(钼)-铅锌(银)成矿系统[M]. 北京: 地质出版社.
- 许强伟, 王玘, 王志强, 等. 2019. 内蒙古克什克腾旗大石寨组凝灰岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. 地质评论, 65(1): 119~149.
- 杨月厚, 连世恩, 巴图. 2012. 大兴安岭中段二叠系地球化学特征及其成矿意义[J]. 西部资源, 40(2): 178~181.
- 张德全. 1989. 内蒙东部黄岗-甘珠尔庙锡钨多金属成矿带地质背景及矿床类型[C]//中国地质科学院矿床地质研究所文集, 北京, 44~57.
- 张健. 2012. 内蒙古东部大石寨组火山岩锆石 U-Pb 年代学及其地球化学研究[D]. 吉林大学.
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 等. 2009. 中国东部燕山期大规模岩浆活动与岩石圈减薄: 与大火成岩省的关系[J]. 地学前缘, 16(2): 21~51.
- 张逸鹏. 2016. 内蒙古二连浩特西南部大石寨组、哲斯组变形及其对兴安造山带构造演化的意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 赵家齐, 周振华, 欧阳荷根, 等. 2019. 内蒙古双尖子山银铅锌(锡)矿床石英正长斑岩 U-Pb 年龄、地球化学及其地质意义[J]. 矿床地质, 41(2): 324~344.